СПРАВОЧНИК

# СУДОВОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В ТРЕХ ТОМАХ

Под общей редакцией
Г. И. КИТАЕНКО

Издание 2-е,
переработанное
и дополненное

157879 у

ТОМ 1

# СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

Библиотека
СЕВМАШВТУЗА

ЛЕНИНГРАД
«СУДОСТРОЕНИЕ»
1980

621.31 : 629.12 (031)

ББК 31.26
С74
УДК 629.12.066 (03)

С74 **Справочник** судового электротехника. Т. 1. Судовые электроэнергетические системы и устройства/Под ред. Г. И. Китаенко. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Судостроение, 1980. — 528 с., ил.

Первый том справочника содержит краткую теоретическую часть, материалы по проектированию судовых электроэнергетических систем, электроприводов, гребных электрических установок и систем освещения судовых помещений, а также практические методы и примеры расчета установившихся и переходных режимов.

По сравнению с первым изданием (1975 г.) в книгу внесены изменения, продиктованные выпуском новых нормативных материалов.

Справочник предназначен для инженерно-технических и научных работников проектных организаций судостроительной промышленности, морского, речного и рыбопромыслового флота, а также может быть использован специалистами по проектированию и эксплуатации автономных и транспортных установок других отраслей народного хозяйства, аспирантами и студентами, изучающими электроэнергетические установки судов.

С $\frac{31805—041}{048(01)—80}$ 30—80 3605040000 31.26

© Издательство «Судостроение», 1980 г.

# ОТ РЕДАКТОРА

Директивы XXV съезда КПСС по десятому пятилетнему плану предусматривают увеличение грузооборота морского транспорта за пятилетие примерно в 1,3 раза, а речного транспорта — на 22%.

Морской и речной флот должен пополниться крупнотоннажными высокоэффективными судами, предназначенными для перевозки пассажиров и грузов, добычи и переработки рыбы, а также для выполнения специализированных задач по освоению водных бассейнов.

Проектирование и строительство таких судов должно осуществляться в кратчайшие сроки и на высоком современном техническом уровне. При выполнении этой комплексной задачи судовые электроэнергетики сталкиваются с большими трудностями, вызванными необходимостью использовать в своей практической работе обширный справочный материал, который в разрозненном виде содержится в большом количестве отраслевой документации и в многочисленных литературных источниках.

Выпущенный издательством «Судостроение» в 1975 г. «Справочник судового электротехника» в трех томах в значительной мере исправил указанное положение, однако за истекшие годы судовая электротехника значительно продвинулась в своем развитии. Появилась необходимость в переиздании справочника в переработанном виде.

Опыт использования справочника при проектировании судовых электроэнергетических установок показал, что целесообразно наряду со справочными сведениями иметь основные положения из теории и практики рассматриваемого вопроса, а также примеры расчетов и использования справочного материала.

Настоящее издание справочника состоит из трех томов, содержание которых переработано авторами с учетом современного уровня развития судовой электротехники.

В первом томе помещены справочные сведения по общим вопросам электрооборудования судов, проектированию судовых электроэнергетических систем, судовым электроприводам, гребным электрическим установкам и судовым системам освещения.

Второй том содержит справочные сведения по судовым электрическим машинам, преобразователям, аппаратам, приборам, кабелям и другому электрооборудованию, которое находит применение на современных судах.

Третий том справочника посвящен вопросам технологии судовых электромонтажных работ.

Большую творческую работу по подготовке настоящего справочника к печати выполнили: по первому тому — Г. А. Мелешкин, по второму тому —

Ю. П. Коськин, по третьему — Д. А. Чечин. Этим товарищам, а также Р. И. Гладких — бессменному секретарю всего издания научный редактор справочника приносит искреннюю благодарность за большой труд в работе с авторским коллективом.

Настоящее издание справочника может иметь недостатки, поэтому авторский коллектив с благодарностью примет критические замечания, которые просит направлять по адресу: 191065, Ленинград, ул. Гоголя, 8, издательство «Судостроение».

Научный редактор справочника *Г. И. Китаенко*

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Широкое и интенсивное освоение Мирового океана обусловливает постоянно растущее строительство разнообразных надводных и подводных судов, имеющих различное назначение: от перевозки грузов между континентами и ловом рыбы до выполнения специальных научных исследований.

Все эти суда оснащаются современными, в высшей степени надежными электротехническими системами, включающими в себя сотни электрических машин, тысячи электрических аппаратов и других приборов; протяженность кабельных трасс составляет сотни километров.

Мощность электроэнергетических установок современных судов транспортного флота достигает десятков тысяч киловатт.

Надежность работы судовых энергетических установок обеспечивается не только качественным изготовлением элементов этих установок, но и широким внедрением автоматических устройств контроля, управления и регулирования на основе современных достижений электро-, радио- и вычислительной техники.

Проектирование электротехнической части судов в настоящее время является многоцелевой задачей, поскольку режимы электроэнергетических систем, электроприводов, гребных электрических установок, так же как и их конструкции, отличаются сложностью. Поэтому справочник судового электротехника должен отражать все многообразие электротехнических судовых устройств, их сложные конструкции, режимы работы и необычные условия эксплуатации их главных и вспомогательных элементов.

Первый том настоящего справочника состоит из пяти разделов, содержащих основные теоретические положения и методы расчетов режимов работы электротехнических устройств.

Первый раздел отражает общие вопросы электрооборудования судов, их автоматизацию, моделирование процессов в установках, их надежность работы, электробезопасность и способы электрических измерений.

Во втором разделе изложены рекомендации по структурным схемам электроэнергетических установок, выбору генераторов; рассмотрена параллельная работа генераторов, кабельных трасс и токопроводов; приведены методы расчета токов коротких замыканий, выбора аппаратуры и защит; расчеты провалов напряжения, качества электроэнергии, устойчивости режимов электроустановок, а также колебаний напряжения в последних.

В третьем разделе изложены методы выбора электроприводов рулевых машин, якорно-швартовных механизмов, механизмов общесудовых систем, лебедок и грузоподъемных механизмов.

Четвертый раздел содержит вопросы проектирования гребных электрических установок постоянного и переменного тока; здесь даны методы расчета статических и переходных режимов этих установок.

В пятом разделе приведены методы проектирования судовой осветительной сети.

Теоретический материал справочника подкрепляется практическими методами расчетов и иллюстрируется числовыми примерами. В справочнике использованы общепринятые в литературе условные обозначения и Международная система единиц — СИ.

Первый том справочника написан большим авторским коллективом, в который входят: Б. И. Норневский, В. А. Михайлов (гл. 1.1), Л. П. Веретенников (гл. 1.2 и 2.11), Ю. Н. Киреев, И.А. Рябинин, Н. М. Хомяков (гл. 1.3), Г. И. Китаенко, В. В. Назаров, Е. А. Иванов, В. С. Семенов (гл. 1.4), Е. А. Иванов (гл. 1.5), Г. С. Яковлев (гл. 2.1—2.3), Л. Н. Токарев (гл. 2.4), Н. Б. Гурвич (гл. 2.5), Ф. А. Шуйский (гл. 2.6), В. И. Финагин (гл. 2.7), Ю. В. Рокотян (гл. 2.8), Д. В. Вилесов, О. Н. Климанов (гл. 2.9), В. В. Шейнихович (гл. 2.10), Г. А. Мелешкин (гл.2.12), В. В. Денисов, Н. М. Хомяков (гл. 3.1 и 3.4), В. В. Тихонов (гл. 3.2), И. Р. Фрейдзон, А. А. Городничев (гл. 3.3), Е. Б. Айзенштадт, Ю. М. Гилерович (гл. 4.1—4.4), И. М. Фундылер (гл. 5.1—5.2).

Судовая электротехника постоянно развивается, что находит отражение в государственных стандартах и других официальных постоянно корректируемых отраслевых материалах. Поэтому при пользовании справочником следует учитывать, что приводимые в нем конкретные данные по устройствам, механизмам, системам, а в равной степени и методы расчета не могут служить основанием для окончательного выбора или заказа оборудования без проверки соответствия официальным материалам.

*Г. А. Мелешкин*

# РАЗДЕЛ 1

# ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СУДОВ

## Глава 1.1. ВОПРОСЫ РАСЧЕТА АВТОМАТИЧЕСКИХ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК И СИСТЕМ

### § 1.1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Современное судно представляет собой сложный технический комплекс, в котором широко использованы различные электрифицированные и автоматизированные технические средства. При этом под *судовыми техническими средствами* подразумеваются основные и вспомогательные устройства, предназначенные для выполнения определенных функций. К ним относятся: снабжение потребителей необходимым видом энергии, обеспечение движения и маневрирования судна, предотвращение аварий и борьба с их последствиями, создание условий жизнеобеспечения и нормальных условий эксплуатации судового оборудования.

Наиболее важное техническое средство судна — *судовая электроэнергетическая система* (СЭЭС). Она является многофункциональной системой, поскольку выполняет несколько функций: выработку, распределение, передачу и потребление электроэнергии. Этим обусловлена ее ярко выраженная иерархическая структура.

Проектирование СЭЭС отличается рядом особенностей и требует специального подхода, который необходим для формулировки общих условий, обеспечивающих успешную работу ряда независимых частей при объединении их в единое целое.

Электроэнергетическая система, являясь составной частью комплекса технических средств судна, в свою очередь состоит из ряда подсистем, объединяемых общей целью функционирования.

Процесс функционирования СЭЭС в значительной степени имеет вероятностный характер. Это связано в основном со случайным характером процесса потребления, а также с влиянием окружающей среды и отказами элементов СЭЭС. Обеспечение высоких показателей качества электроэнергии при большом количестве ответственных потребителей и недетерминированном режиме их работы требует высокой степени автоматизации СЭЭС. Вместе с тем большая роль в ее работе отводится человеку — оператору. Поэтому при проектировании СЭЭС необходимо уделять большое внимание вопросам, связанным с согласованием действий оператора и систем автоматики [20].

*Эффективность* СЭЭС определяется степенью удовлетворения предъявляемых к ней требований. Большое число этих требований, их противоречивость и различное влияние на общую оценку СЭЭС в значительной мере затрудняют решение задачи оптимизации.

Таким образом, современная СЭЭС представляет собой многофункциональную, высокоавтоматизированную систему с иерархической структурой, имеющую статистический характер функционирования, эффективность которой определяется совокупностью большого числа различных показателей.

Эти особенности СЭЭС являются характерными для так называемых *сложных* систем. Успешное проектирование таких систем возможно лишь на основе

специальной методологии, получившей название системного подхода [23, 38].

Основной тезис системного подхода — максимальный учет взаимосвязей как разрабатываемой системы с другими системами, так и отдельных подсистем между собой — принимался во внимание специалистами и раньше. Однако лишь в настоящее время, при широком внедрении в проектную практику современных средств вычислительной техники, автоматизации проектирования и дальнейшего развития ряда математических методов, оказалось возможным выполнение основных требований системного подхода к проектированию [14].

**Основные особенности системного подхода.** Системный подход требует исследования возможно большего числа вариантов решения задачи проектирования. Смысл этого требования состоит в том, что при разработке большого числа вариантов значительно повышается вероятность появления новых плодотворных идей и методов решения стоящих перед проектировщиками задач. Поэтому системный подход к проектированию тесно связан с повышением квалификации проектировщиков, рассчитан на известную смелость и нестандартность их мышления, специальные формы организации их работы на начальных этапах проектирования. Следует иметь в виду, что достаточно подробная проработка большого числа вариантов сложной системы влечет за собой расход значительных средств и времени даже при использовании современной вычислительной техники. В связи с этим при системном подходе большое внимание уделяется вопросам прогнозирования значений показателей рассматриваемых вариантов системы и сравнительной оценки этих вариантов.

Одним из важных моментов при системном подходе является выбор оптимального варианта системы. При решении этой задачи необходимо учитывать следующие обстоятельства.

К сложной системе, какой является СЭЭС, предъявляется большое число требований — функциональных, эксплуатационных, конструктивных, технико-экономических и др. Однако решить задачу оптимизации СЭЭС с помощью существующих аналитических или алгоритмических методов, учитывая как большое число показателей, характеризующих ее эффективность, так и ограничения (по стоимости, срокам проектирования и изготовления системы и т. п.), которые объективно всегда существуют, — практически невозможно. Поэтому при разработке сложной системы задача оптимизации решается как задача выбора лучшего варианта системы из множества возможных ее вариантов в соответствии с принятым критерием эффективности.

При системном подходе важное значение придается методам, позволяющим сократить сроки, снизить стоимость проектирования и изготовления системы, обеспечить ее эффективную эксплуатацию. При этом исходят из того, что любая сколь угодно сложная система может быть построена на основе некоторого набора типовых узлов. Естественно, что в этом случае часть ее характеристик будет несколько хуже, чем при индивидуальном проектировании, но зато может быть получен заметный выигрыш по другим показателям. Развитием этого принципа является широко применяемый в настоящее время агрегатный метод построения сложных систем.

Агрегат представляет собой функционально и конструктивно законченный узел, согласованный с остальными входящими в набор агрегатами по алгоритмам функционирования, метрологическим характеристикам, резервированию, режимам работы и конструкции, который может применяться в различных системах.

Для обеспечения длительного эффективного функционирования система должна обладать высокой модернизационной способностью. Эта способность может быть обеспечена лишь при условии, что проектировщики ясно представляют себе тенденции дальнейшего развития разрабатываемых систем, а набор агрегатных средств, на которых строится система, позволяет в дальнейшем реализовать эти тенденции путем замены отдельных агрегатов или подсоединением новых без существенной перестройки всей системы.

Весь процесс проектирования сложной системы обычно делят на два этапа: внешнее проектирование (или макропроектирование) и внутреннее проектирование (или микропроектирование).



К внешнему проектированию относятся проектные работы, которые связаны с определением входных воздействий на разрабатываемую систему и ее выходных характеристик, т. е. затрагивают вопросы взаимодействия разрабатываемой системы со всеми остальными. Сюда входят вопросы определения требований к системе (установленная мощность, напряжение на шинах, частота и т. д.), разработка вариантов структуры (число электростанций и количество генераторных агрегатов в них), выработка методов оценки эффективности.

К внутреннему проектированию относятся вопросы, решение которых не влияет на взаимодействие проектируемой системы с другими системами. На данном этапе выполняются работы, связанные с логическим и монтажно-коммутационным проектированием подсистем, устройств и блоков на базе основных требований к ним, определенных при внешнем проектировании.

Однако такое разделение проектных работ в известной мере является условным. Более важное значение имеет другая особенность процесса проектирования сложной СЭЭС. Если при проектировании небольших систем решение задач каждого этапа не требует, как правило, пересмотра решений предыдущего этапа или прогнозирования результатов последующего, то при разработке сложной системы учет связей между отдельными этапами проектных работ становится необходимым.

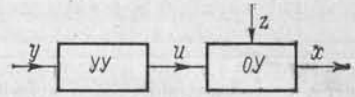


Рис. 1.1.1. Структурная схема автоматической системы.

**Основные понятия и классификация автоматических систем.** На современных судах автоматические системы (АС) выполняют самые разнообразные функции, необходимые для обеспечения нормальной работы главных и вспомогательных механизмов. Важную роль АС играют в обеспечении нормальной работы СЭЭС. Здесь автоматические устройства выполняют следующие функции: стабилизацию напряжения и частоты синхронных генераторов, распределение активной и реактивной нагрузок между параллельно работающими генераторами, включение агрегатов на параллельную работу, защиту генераторов и установок от токов короткого замыкания и перегрузок, включение резервного генератора для восстановления питания приемников электрической энергии, контроль и сигнализацию поведения объекта управления и т. д.

Автоматическая система (система автоматического управления) представляет собой совокупность управляемого объекта и автоматического управляющего устройства, взаимодействующих между собой. В общем случае в автоматической системе может быть несколько управляемых объектов и автоматических управляющих устройств. В соответствии с данным определением на рис. 1.1.1 представлена структурная схема автоматической системы. Управляемый объект *ОУ* — это устройство, требуемый режим работы которого должен поддерживаться извне специально организованными управляющими воздействиями.

В качестве управляемого объекта рассматривается техническое устройство, физическая природа которого может быть самой различной, — генератор, дизель, турбина, судно и т. д.

Автоматическое управляющее устройство *УУ* — это устройство, осуществляющее воздействие на управляемый объект в соответствии с заложенным в нем законом управления. Управляющее устройство состоит из отдельных, связанных между собой элементов, которые качественно или количественно преобразуют воздействие, полученное от одного элемента, и передают его другому.

Управлением в технических системах называется преднамеренное воздействие на управляемый объект, обеспечивающее достижение определенных целей. Управление в простейших системах часто называют регулированием.

Автоматическим называется управление, осуществляемое без непосредственного участия человека. Если управляющее воздействие вырабатывается с участием человека, то такое управление называется полуавтома-

тическим, а системы — автоматизированными системами управления.

Состояние объекта управления определяется воздействием на объект как внешней среды, так и управляющих устройств.

Воздействие внешней среды на автоматическую систему называется внешним воздействием $z$. Внутреннее воздействие — воздействие одной части автоматической системы на другую. Управляющее воздействие $u$ — это воздействие управляющего устройства на управляемый объект. Контрольным воздействием называют воздействие

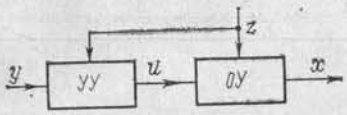



Рис. 1.1.2. Структурная схема разомкнутой системы, функционирующей по возмущающему воздействию.

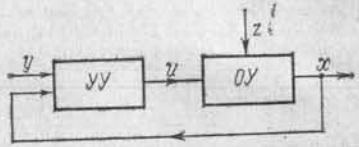



Рис. 1.1.3. Структурная схема замкнутой автоматической системы.

объекта управления на управляющее устройство. Задающее воздействие $y$ — планируемое воздействие на входе автоматической системы. Параметры, по которым ведется управление, носят название управляемых или регулируемых координат $x$.

Приведенное выше определение автоматической системы охватывает различные частные формы ее выполнения. При этом *по назначению* автоматические системы разделяются на автоматические системы стабилизации, следящие системы, системы программного управления.

Под автоматической системой стабилизации понимается система, в которой поддерживается заданное значение управляемой координаты. Следящая система — это такая система, в которой управляемая величина изменяется в зависимости от значения заранее не известной переменной величины на входе системы. В автоматических системах программного управления управляемая координата изменяется в соответствии с заранее заданной функцией.

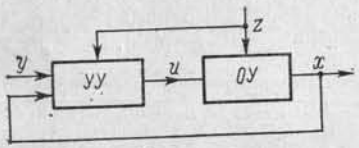



Рис. 1.1.4. Структурная схема комбинированной автоматической системы.

Автоматические системы *по принципу построения* классифицируются следующим образом:

1) системы с разомкнутой цепью воздействия (разомкнутые системы);
2) системы с замкнутой цепью воздействия (замкнутые системы);
3) комбинированные системы;
4) самонастраивающиеся системы.

Разомкнутая АС (рис. 1.1.2) — это такая система, в которой входными воздействиями управляющего устройства являются только внешние воздействия (возмущения). В системах данного типа управляющее воздействие вырабатывается в зависимости от одного или нескольких внешних возмущающих воздействий. Этот прием управления называют принципом компенсации (принцип Понселе — Чиколева). В замкнутых АС (рис. 1.1.3) входными воздействиями для управляющего устройства являются как внешние, так и контрольные воздействия. В таких системах, которые часто называют системами, функционирующими по отклонению управляемой координаты (принцип Ползунова — Уатта), управляющее воздействие вырабатывается в зависимости от сигнала ошибки.

Комбинированная АС (рис. 1.1.4) сочетает в себе два принципа: по отклонению управляемой координаты и по внешнему воздействию. Такие



системы позволяют увеличить динамическую точность без ухудшения устойчивости. Они целесообразны в тех случаях, когда имеется возможность непосредственного измерения внешних возмущений, действующих на систему. Теоретическим фундаментом комбинированных систем является математическая теория инвариантности. Эта теория дает подход к синтезу структуры и параметров систем на основе выполнения условий инвариантности [3], обеспечивающих независимость управляемой координаты от внешних возмущающих воздействий и изменения параметров системы. Примером комбинированной системы может служить система токового или фазового компаундирования синхронного генератора с корректором напряжения. Здесь контур компаундирования осуществляет регулирование по разомкнутому циклу, а корректор напряжения — по замкнутому.

С развитием техники все более остро встает вопрос повышения точности управления при определенном изменении параметров объекта, что привело к созданию самонастраивающихся, или самоприспосабливающихся, систем. Самонастраивающейся системой называется такая АС, в составе которой имеется дополнительное автоматическое устройство, изменяющее алгоритм управления основного управляющего устройства таким образом, чтобы АС в целом осуществляла заданный алгоритм функционирования.

*По характеру управляющих сигналов* АС разделяются на непрерывные и дискретные, а *по характеру используемой информации об условиях работы* — на системы с жесткими и изменяемыми структурой и законом управления.

*По характеру математических соотношений* различают линейные и нелинейные автоматические системы. Как те, так и другие АС могут быть подразделены на непрерывные, дискретные и дискретно-непрерывные; на стационарные (с постоянными параметрами) и нестационарные (с переменными параметрами). Стационарные и нестационарные системы могут быть с сосредоточенными и распределенными параметрами.

*По количеству выходных координат объекта управления* системы разделяются на одномерные и многомерные. Последние делятся на системы связанного и несвязанного управления. В системах связанного управления отдельные управляющие устройства связаны друг с другом внешними связями. Входящая в состав многомерной системы отдельная система управления называется автономной, если управляемая ею выходная координата не зависит от значений остальных управляемых координат.

*По поведению в установившемся режиме* различают: статические и астатические системы.

Классификация отдельных элементов АС производится по нескольким признакам.

*По функциональному назначению* различают:

измерительные элементы — функциональные элементы автоматического управляющего устройства, предназначенные для определения величин воздействий, поступающих на автоматическую систему, а также ошибки управления;

усилительно-преобразовательные элементы — функциональные элементы автоматического управляющего устройства, воспринимающие сигналы измерительного элемента, усиливающие их и преобразующие к виду, удобному для передачи на исполнительный элемент;

исполнительные элементы — функциональные элементы автоматического управляющего устройства, осуществляющие выработку управляющих воздействий;

корректирующие элементы — устройства, включаемые в автоматическую систему для улучшения ее динамических свойств.

*По принципу действия* различают: электрические; механические; гидравлические; пневматические и комбинированные элементы.

*По наличию или отсутствию вспомогательного источника энергии* элементы АС подразделяются на активные и пассивные.

## § 1.1.2. ЛИНЕЙНЫЕ НЕПРЕРЫВНЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Проектирование АС часто производится на базе линейной теории. Автоматические системы, рассматриваемые как линейные, в действительности являются системами, которые с достаточной для практики точностью могут приближенно характеризоваться линейными дифференциальными уравнениями. В реальных условиях строго линейных систем не существует, поскольку характеристики любого звена могут быть линейными лишь в определенных условиях или же на определенном участке работы.

### УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ РАБОТЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Установившимся режимом работы АС называется такое состояние системы, при котором все переменные величины, описывающие ее состояние, не меняются во времени или находятся в так называемом вынужденном движении, характер которого определяется видом внешнего воздействия.

Таким образом, существует два вида установившихся (стационарных) режимов АС: статический и динамический.

Статический стационарный режим характеризуется тем, что все внешние воздействия и параметры самой системы не меняются во времени. Динамический стационарный режим — это режим, при котором приложенные к системе внешние воздействия изменяются по некоторому установившемуся закону, в результате чего система приходит в режим установившегося вынужденного движения.

Критерием качества работы системы в стационарном режиме служат ошибки, вызываемые действием детерминированных задающих и возмущающих воздействий. Ошибки статического и динамического стационарных режимов называют соответственно статическими и динамическими.

Связь между входной и выходной величинами для отдельных звеньев системы в установившемся (статическом) состоянии представляет собой уравнение статики, или статическую характеристику звена,

$$x_{\text{вых}} = f(x_{\text{вх}}).$$

Примерами статических характеристик элементов судовых систем могут служить нагрузочные характеристики генераторов $U_{\text{г}} = f(I_{\text{в}})$, механические характеристики электродвигателей $n = f(M)$, внешние характеристики дизелей $N_e = f(n)$ и т. д.

Если звенья системы имеют линейные статические характеристики, то

$$x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}},$$

где $k$ — коэффициент усиления (передачи) звена.

При нелинейных статических характеристиках коэффициент усиления определяется как приращение выходной величины $\Delta x_{\text{вых}}$ к приращению входной величины $\Delta x_{\text{вх}}$ в зоне рабочего режима:

$$k = \frac{\Delta x_{\text{вых}}}{\Delta x_{\text{вх}}}.$$

Приведенное выше определение коэффициента усиления справедливо лишь для статических систем.

Автоматическая система называется статической по отношению к внешнему воздействию, если при воздействии, стремящемся к некоторому установившемуся значению, отклонение управляемой координаты также стремится к постоянному значению, зависящему от величины воздействия.

Автоматическая система называется астатической по отношению к внешнему воздействию, если при воздействии, стремящемся к некоторому установившемуся значению, отклонение управляемой координаты стремится к нулю. Астатические системы имеют различный порядок астатизма в зависимости от числа интегрирующих звеньев в прямой цепи передачи воздействий.



Астатическим называется звено, у которого при постоянном входном воздействии сигнал на выходе в установившемся режиме непрерывно растет с постоянной скоростью, ускорением и т. д.

Для астатических звеньев под уравнением статики понимается зависимость установившегося значения $\nu$-й производной выходной величины от входной, и тогда коэффициент усиления по $\nu$-й производной будет

$$k_\nu = \frac{\left| \frac{d^\nu x_{\text{вых}}}{dt^\nu} \right|_{\text{уст}}}{x_{\text{вх}}}.$$

Результирующую статическую характеристику систем строят на основе статических характеристик отдельных элементов.

При параллельном соединении элементов направленного действия входной сигнал является общим для всех элементов, а выходной представляет собой сумму всех выходных сигналов. Следовательно, при $n$ элементах общий коэффициент усиления будет равен сумме коэффициентов усиления отдельных элементов.

При последовательном соединении элементов направленного действия выходной сигнал предыдущего звена является входным для последующего. В этом случае общий коэффициент усиления является произведением коэффициентов усиления отдельных элементов.

Если тот или иной элемент с коэффициентом усиления $k$ будет охвачен обратной связью с коэффициентом усиления $k_{\text{о. с}}$, то связь между входной и выходной величинами будет определяться выражением

$$x_{\text{вых}} = \frac{k}{1 \pm kk_{\text{о. с}}} x_{\text{вх}},$$

где знак минус для положительной, а знак плюс для отрицательной обратной связи. Если положить в последнем выражении $k_{\text{о. с}} = 1$, то можно вычислить коэффициент усиления замкнутой системы

$$k_{\text{з}} = \frac{k}{1 + k}.$$

При нелинейных статических характеристиках отдельных элементов результирующую характеристику можно определить в результате графических построений.

Статическую погрешность в АС при коэффициенте усиления, равном $k$, находят из выражения

$$\Delta = \frac{\Delta x}{1 + k},$$

где $\Delta x$ — отклонение управляемой координаты при отсутствии регулятора.

Динамические ошибки автоматических систем определяются с помощью коэффициентов ошибок [3, 58].

### ДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РАБОТЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Динамический (переходный) режим характеризуется как состояние системы, существующее во время изменения ее переменных величин при переходе от одного установившегося состояния к другому.

В процессе исследования (анализа) динамических режимов обычно решают две задачи: определяют устойчивость системы и оценивают характер переходного процесса при тех или иных внешних воздействиях.

Выбор структуры и параметров системы управления в соответствии с предъявляемыми требованиями является задачей синтеза.

Для того чтобы АС отвечала поставленным требованиям технического задания, она должна быть устойчивой и иметь определенную форму кривой переходного процесса при заданном характере внешнего воздействия. При исследовании динамики АС составляют ее дифференциальное уравнение, которое получается из уравнений отдельных звеньев в результате исключения промежуточных переменных. Часто уравнения составляются в отклонениях переменных величин от некоторого установившегося значения и в безразмерной форме.

Линеаризация нелинейной функции, выражающей соотношение различных величин звена системы, производится разложением ее в ряд Тейлора в окрестности равновесного состояния; при этом нелинейные члены ряда во второй и более высоких степенях не учитываются.

Во многих случаях удается составить структурную схему АС и по типовым звеньям такой системы определить передаточную функцию. Такой подход используется при частотном анализе АС.

В общем случае для обыкновенных линейных систем исходное уравнение динамики имеет вид

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \cdots + a_{n-1} p + a_n)\, x = \\ = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \cdots + b_{m-1} p + b_m)\, z, \qquad (1.1.1)$$

где $a_0, a_1, \ldots, a_{n-1}, a_n, b_0, b_1, \ldots, b_{m-1}, b_m$ — постоянные коэффициенты, определяемые параметрами данной системы; $n$, $m$ — целые положительные числа, причем чаще $m < n$; $x$ — отклонение управляемой координаты; $z$ — внешнее воздействие; $p = \frac{d}{dt}$ — символ дифференцирования.

Полученное уравнение можно записать короче:

$$D(p)\, x = Q(p)\, z,$$

где $D(p)$ и $Q(p)$ — обозначения операторных многочленов, стоящих в уравнении (1.1.1) перед переменными $x$ и $z$.

Если учитывается несколько внешних воздействий, например возмущающее и управляющее, то соответственно появляются дополнительные слагаемые в правой части уравнения (1.1.1).

При исследовании свободного движения системы, когда $z = 0$, уравнение будет иметь вид

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \cdots + a_{n-1} p + a_n)\, x = 0.$$

Решение этого уравнения

$$x(t) = c_1 e^{p_1 t} + c_2 e^{p_2 t} + \cdots + c_n e^{p_n t},$$

где $c_1, c_2, \ldots, c_n$ — постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий; $p_1, p_2, \ldots, p_n$ — корни характеристического уравнения

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \cdots + a_{n-1} p + a_n = 0. \qquad (1.1.2)$$

Следует иметь в виду, что в уравнениях (1.1.1) и (1.1.2) символ $p$ имеет разный смысл.

Аналогично основному уравнению системы записываются и уравнения отдельных звеньев, связывающие между собой выходную координату $x_{вых}$ с входной координатой $x_{вх}$:

$$d(p)\, x_{вых} = q(p)\, x_{вх}.$$

Преобразуя по Лапласу входную и выходную величины, получим

$$d(p)\, x_{вых}(p) = q(p)\, x_{вх}(p).$$



В дальнейшем при использовании изображений функций комплексная величина будет также обозначаться буквой $p$, которую не следует путать с символом дифференцирования $p = \frac{d}{dt}$.

Отношение изображений выходной координаты к входной при нулевых начальных условиях называется передаточной функцией звена $W(p)$:

$$W(p) = \frac{x_{вых}(p)}{x_{вх}(p)} = \frac{q(p)}{d(p)}. \qquad (1.1.3)$$

Понятиями передаточных функций обычно пользуются при исследовании АС частотными методами.

Физический смысл передаточной функции легко раскрывается, если произвести подстановку в выражение (1.1.3) $p = j\omega$, что соответствует приложению ко входу звена гармонического сигнала. Тогда

$$W(j\omega) = \frac{q(j\omega)}{d(j\omega)} = \\ = U(\omega) + jV(\omega) = A(\omega)\, e^{j\varphi(\omega)},$$

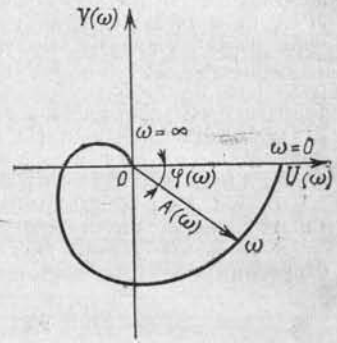



Рис. 1.1.5. Амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы.

т. е. получается комплексное число, модуль которого $A(\omega)$ определяет отношение амплитуды сигнала на выходе к амплитуде сигнала на входе, а аргумент — фазу $\varphi(\omega)$, определяющую сдвиг между этими колебаниями.

На комплексной плоскости $W(j\omega)$ можно представить как вектор длиной $A(\omega)$ с углом наклона к оси абсцисс, равным $\varphi(\omega)$. На рис. 1.1.5 угол $\varphi(\omega)$ является отрицательным, так как вынужденные колебания в реальных системах обычно имеют отставание по фазе.

Поскольку различным частотам $\omega$ соответствуют различные амплитуды $A(\omega)$ и фазы $\varphi(\omega)$, то с изменением частоты вектор $W(j\omega)$ опишет своим концом некоторую кривую, которая называется амплитудно-фазовой характеристикой (см. рис. 1.1.5). Амплитудно-фазовая характеристика системы или отдельного звена может быть получена экспериментально. Подавая на вход гармонические колебания определенной частоты с амплитудой, принимаемой за единицу, осциллографируют установившиеся колебания выходной координаты. Из осциллограмм определяют амплитуду $A(\omega)$ и фазу $\varphi(\omega)$ для данной частоты. Изменяя частоты, получают несколько точек, соединяя которые строят амплитудно-фазовую характеристику.

$A(\omega)$ называется амплитудной частотной характеристикой; $\varphi(\omega)$ — фазовой частотной характеристикой; $U(\omega)$ — вещественной частотной характеристикой; $V(\omega)$ — мнимой частотной характеристикой разомкнутой системы.

Большое распространение при анализе и синтезе систем получили логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ).

Логарифмической амплитудно-частотной характеристикой (ЛАХ) звена или системы называется построенная в логарифмическом масштабе частот зависимость вида

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega),$$

где $A(\omega)$ — модуль амплитудно-фазовой характеристики соответствующего звена или системы.

Величина $L(\omega)$ измеряется в децибелах (дБ), при этом

$$20 \lg A(\omega) = m \text{ дБ}.$$

Библиотека СЕВМАШВТУЗА

Графическая зависимость $\varphi(\omega)$, построенная в логарифмическом масштабе частот, называется логарифмической фазочастотной характеристикой (ЛФХ).

При построении ЛЧХ на оси абсцисс откладываются значения частоты в логарифмическом масштабе, при этом шкала в отношении $\omega$ будет неравномерной. Отрезок этой шкалы, соответствующий изменению $\omega$ в 10 раз, называется декадой, а отрезок, соответствующий изменению $\omega$ в два раза, — октавой.

Построение логарифмической шкалы можно производить с помощью специального шаблона [3, 58].

Использование метода ЛЧХ во многих случаях существенно упрощает анализ динамики систем и синтез корректирующих устройств.

Основные достоинства логарифмических характеристик: а) в одноконтурных системах при последовательном соединении нескольких звеньев операция умножения АФХ заменяется операцией сложения ЛЧХ; б) приближенное построение ЛЧХ типовых звеньев достаточно просто; в) ЛЧХ позволяет сопоставить величины, не соизмеряемые в натуральном масштабе.

**Типовые звенья автоматических систем.** Звенья АС классифицируют по различным признакам. Однако наиболее существенной с точки зрения структуры системы управления и ее работы является классификация звеньев по их динамическим свойствам. По этому признаку различают пять групп типовых звеньев: простое усилительное, апериодическое, колебательное, интегрирующее и дифференцирующее.

В табл. 1.1.1 приведены передаточные функции и частотные характеристики типовых звеньев автоматических систем.

К типовым звеньям иногда относят и форсирующие звенья, например

$$x_{вых} = k\left(x_{вх} + T\frac{dx_{вх}}{dt}\right).$$

Это звено можно получить путем параллельного соединения дифференцирующего и простого усилительного звеньев.

Приведенные в табл. 1.1.1 интегрирующие и дифференцирующие звенья называются идеальными. Однако некоторые элементы АС имеют передаточные функции вида $\frac{kp}{Tp+1}$ или $\frac{k}{p(Tp+1)}$. Такие звенья называются соответственно реальными дифференцирующими и интегрирующими звеньями.

Примерами реальных дифференцирующих звеньев являются дифференцирующая цепь *RC* и гидравлическое изодромное устройство.

Электродвигатель с учетом электромеханической постоянной времени относится к реальному интегрирующему звену.

Следует иметь в виду, что в зависимости от того, какие величины приняты за входную и выходную, один и тот же элемент может относиться к разным группам типовых звеньев.

При частотных методах исследования АС определяются передаточная функция разомкнутой системы или передаточные функции замкнутых систем (по управляющему или возмущающему воздействиям). Отдельные типовые звенья в системах могут быть соединены различным образом: последовательно, параллельно, смешанно. Кроме того, система может иметь ряд местных встречно-параллельных и перекрестных обратных связей.

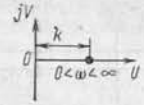
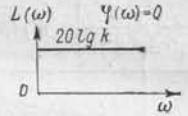
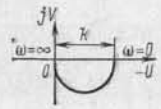
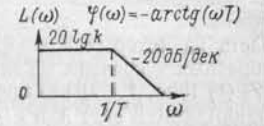
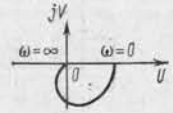
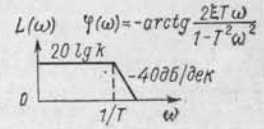
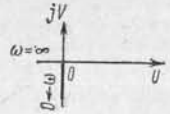
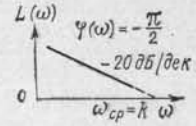
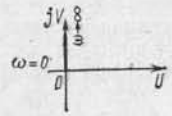
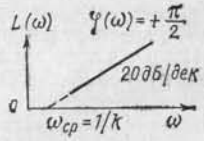
Передаточная функция совокупности $n$ последовательно соединенных звеньев направленного действия равна произведению передаточных функций этих звеньев:

$$W(p) = \prod_{i=1}^{n} W_i(p).$$



*Таблица 1.1.1*

**Передаточные функции и частотные характеристики типовых звеньев**

| Наименование звена | Передаточная функция | Амплитудно-фазовая характеристика | Логарифмические частотные характеристики |
|---|---|---|---|
| Простое усилительное | $W(p) = k$ |   |   |
| Апериодическое | $W(p) = \frac{k}{Tp+1}$ |   |   |
| Колебательное | $W(p) = \frac{k}{T^2p^2+2\xi Tp+1}$ |   |   |
| Интегрирующее | $W(p) = \frac{k}{p}$ |   |   |
| Дифференцирующее | $W(p) = kp$ |   |   |

В общем случае при $n$ параллельно соединенных звеньях направленного действия

$$W(p) = \sum_{i=1}^{n} W_i(p),$$

т. е. передаточная функция совокупности $n$ параллельно соединенных звеньев равна сумме передаточных функций этих звеньев. На рис. 1.1.6 показано звено с передаточной функцией $W_1(p)$, охваченное обратной связью, имеющей передаточную функцию $W_2(p)$. При этом общая передаточная функция выразится следующим отношением:

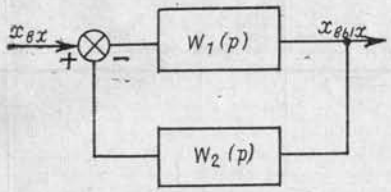



Рис. 1.1.6. Звено, охваченное обратной связью.

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 \pm W_1(p) W_2(p)}.$$

Знак плюс соответствует отрицательной обратной связи, а знак минус — положительной.

К группе перекрестных обратных связей относятся такие соединения звеньев, часть из которых находится в зоне действия двух или более непараллельных обратных связей. Так, например, звено с передаточной функцией $W_2(p)$ (рис. 1.1.7) находится в зоне действия обратных связей с передаточными функциями $W_4(p)$ и $W_5(p)$. В этом случае необходимо прибегнуть к одному из методов преобразования структурных схем [3, 58] и затем для полученной схемы применить известные правила нахождения передаточной функции. Передаточная функция замкнутой системы по внешнему воздействию представляет собой дробь, числитель которой равен произведению передаточных функций звеньев, последовательно включенных между

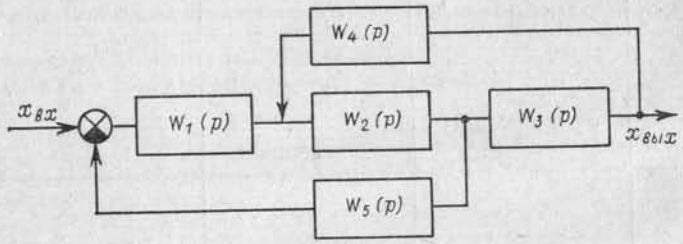



Рис. 1.1.7. Структурная схема системы с перекрестными обратными связями.

точкой приложения воздействия и выходной координатой, а знаменатель равен передаточной функции разомкнутой системы плюс единица. Тогда передаточная функция по управляющему воздействию, которое приложено ко входу системы, будет определяться выражением

$$\Phi_y(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p)},$$

где $W(p)$ — передаточная функция разомкнутой системы.

Передаточная функция по возмущающему воздействию, приложенному к объекту управления, имеет вид

$$\Phi_z(p) = \frac{W_0(p)}{1 + W(p)},$$

где $W_0(p)$ — передаточная функция объекта управления.



Передаточная функция по ошибке определяется соотношением

$$\Phi_\varepsilon(p) = \frac{1}{1 + W(p)}.$$

Приравнивание нулю характеристического полинома знаменателя передаточной функции дает характеристическое уравнение системы

$$1 + W(p) = 0.$$

Таким образом, знание передаточной функции разомкнутой системы позволяет найти выражения для ошибки и управляемой координаты в функции управляющего и возмущающих воздействий, а также характеристическое уравнение АС.

Имея математическое описание поведения системы в переходном режиме, можно определить ее устойчивость.

Под устойчивостью АС подразумевается свойство системы возвращаться к установившемуся состоянию после прекращения внешнего воздействия, которое вывело ее из этого состояния.

Установившееся состояние не следует понимать лишь как состояние покоя. В общем случае можно говорить об устойчивости движения вообще, т. е. движения, связанного с любым перемещением массы или энергии.

Необходимым и достаточным условием устойчивости линейной АС является отрицательность вещественных частей всех корней ее характеристического уравнения. В геометрической интерпретации все корни характеристического уравнения устойчивой системы должны находиться в левой полуплоскости комплексной плоскости корней. Следовательно, определив корни характеристического уравнения, можно ответить на вопрос, является ли исследуемая система устойчивой. Однако для системы с характеристическим уравнением высокой степени нахождение корней — задача трудоемкая. Кроме того, подобный способ определения устойчивости не является наглядным и не дает возможности установить влияние тех или иных параметров на устойчивость АС. В связи с этим устойчивость систем обычно определяют с помощью специальных критериев.

Критериями устойчивости называются определенные правила, позволяющие исследовать устойчивость системы без непосредственного нахождения корней характеристического уравнения. Критерии устойчивости разделяются на алгебраические и частотные [3, 5, 6].

Для исследования влияния различных параметров системы на ее устойчивость разработаны специальные методы, к числу которых относятся метод $D$-разбиения и метод корневого годографа [3, 58].

**Исследование переходного процесса в автоматических системах.** Для того чтобы АС отвечала поставленным требованиям технического задания, она должна не только быть устойчивой, но и иметь определенную форму кривой переходного процесса при заданном характере внешнего воздействия. Однако определение кривой переходного процесса в АС связано с двумя трудностями.

Первая трудность состоит в том, что в реальных АС управляющее и возмущающее воздействия не являются известными функциями времени. Поэтому приходится рассматривать поведение системы при типовых входных воздействиях. В качестве типовых обычно используются возмущающие воздействия в виде единичной ступенчатой функции $f(t) = 1(t)$ и в виде единичной импульсной функции $f(t) = \delta(t)$.

Возмущающие воздействия первого типа встречаются в АС довольно часто. К ним относятся, например, увеличение тока нагрузки генератора, увеличение момента нагрузки двигателя и т. п.

Возмущающие воздействия второго типа встречаются в АС в виде кратковременного удара нагрузки, например, при коротком замыкании на зажимах генератора, которое прекращается после срабатывания защиты, при кратковременном возрастании момента нагрузки двигателя и т. д.

В следящих системах могут приниматься типовые задающие воздействия в виде единичной ступенчатой функции или в виде воздействия, изменяющегося по линейному закону. Часто при расчетах прибегают к синусоидальной задающей функции.

В зависимости от принятого типа воздействия изменяется и форма переходного процесса.

Переходной $h(t)$ называется функция, определяющая изменение выходной координаты при единичном ступенчатом воздействии и при нулевых начальных условиях.

Импульсной переходной функцией (функцией веса) $w(t)$ называется функция, определяющая изменение выходной координаты при единичном импульсе на входе и при нулевых начальных условиях.

Вторая трудность определения кривой переходного процесса в АС состоит в том, что многие АС выражаются дифференциальными уравнениями высокого порядка, и задача по нахождению их решения является весьма трудоемкой даже при использовании операторного метода (так как остается задача, связанная с определением корней характеристического уравнения). Поэтому наибольшее распространение для определения переходных процессов в АС получил метод типовых трапецеидальных частотных характеристик, который отличается сравнительной простотой и избавляет проектанта от трудоемких вычислительных работ [3, 5, 6].

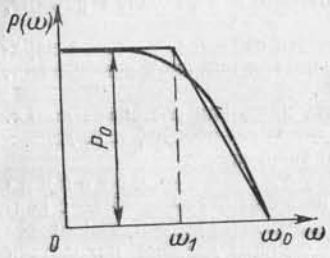


Рис. 1.1.8. Аппроксимация вещественной частотной характеристики трапецией.

Выше были рассмотрены детерминированные воздействия на систему, т. е. такие воздействия, которые описываются определенными функциями времени. Однако часто приходится исследовать поведение системы при случайных воздействиях, выражаемых некоторыми случайными функциями. Для анализа и синтеза автоматических систем, находящихся под воздействием случайных управляющих и возмущающих воздействий, используется особый подход, основанный на методах теории случайных процессов и статистической динамики [53]. В этом случае качество работы системы оценивается числовыми характеристиками соответствующих переменных, т. е. их математическими ожиданиями, дисперсиями или среднеквадратичными отклонениями [3].

*Построение переходного процесса методом трапецеидальных частотных характеристик.* Этот метод основан на определенной математической зависимости между частотными характеристиками системы и переходным процессом. При единичном ступенчатом воздействии на систему эта зависимость имеет вид

$$x(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^\infty \frac{P(\omega)\sin\omega t}{\omega}\,d\omega,$$

или

$$x(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^\infty \frac{Q(\omega)\cos\omega t}{\omega}\,d\omega + P(0),$$

где $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ — соответственно вещественная и мнимая частотные характеристики замкнутой системы.

Из этих зависимостей следует, что близким по своему характеру переходным процессам соответствуют и близкие частотные характеристики. Это позволяет исследовать частотную характеристику не данной системы, а близкую к ней типовую характеристику, для которой известен переходный процесс. На этом свойстве основан рассматриваемый метод. На рис. 1.1.8 показана вещественная частотная характеристика и ее аппроксимация трапецией. Эта трапеция определяется высотой $P_0$ и коэффициентом наклона $\varkappa = \frac{\omega_1}{\omega_0}$. Для перехода к типовой трапеции примем $P_0 = 1$, $\omega_0 = 1$, тогда $\varkappa = \omega_1$.



Для таких трапеций при различных значениях $\varkappa$ составлены таблицы значений $h$-функций, по которым для различных значений относительного времени $\tau$ находятся $h(\tau)$.

Для определения переходного процесса, соответствующего действительной трапеции, нужно полученное значение $h(\tau)$ умножить на $P_0$, а для перехода к действительному времени — относительное время $\tau$ разделить на частоту $\omega_0$, т. е. $h(t) = h(\tau)\,P_0$, где $t = \frac{\tau}{\omega_0}$.

Если вещественная частотная характеристика аппроксимируется несколькими трапециями, то для каждой трапеции определяется $h_i(t)$ и затем они складываются с учетом знака $P_0$:

$$h(t) = \sum_{i=1}^{n} h_i(t).$$

Вещественную частотную характеристику замкнутой системы можно получить различными способами: из неоднородного дифференциального уравнения системы, из передаточной функции замкнутой системы или по специальным номограммам.

За последнее время для исследования автоматических систем и, в частности, для построения переходных процессов стали широко применяться аналоговые и цифровые вычислительные машины.

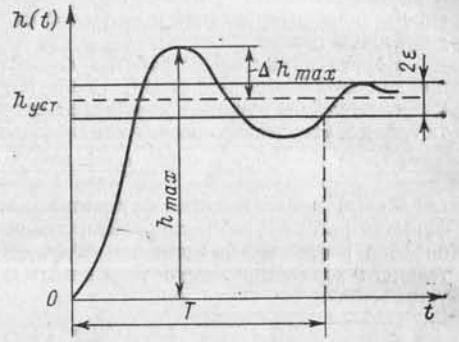


Рис. 1.1.9. График переходной функции $h(t)$.

Для построения кривой переходного процесса часто используются численно-графические методы решения дифференциальных уравнений. Таких методов существует много. Применительно к задачам теории автоматического управления наиболее удобными оказываются методы, разработанные Д. А. Башкировым и А. В. Башариным.

*Показатели качества переходных процессов.* Качество переходных процессов обычно оценивают по переходной функции $h(t)$ (рис. 1.1.9). Время регулирования $T$ определяется длительностью переходного процесса. Теоретически переходный процесс длится бесконечно долго. Однако практически считают, что он заканчивается, как только отклонения регулируемой координаты от нового установившегося значения не будут превышать (3—5)% от $h_{уст}$.

Перерегулирование $\Delta h_{max}$ представляет собой максимальное отклонение регулируемой координаты от нового установившегося значения. Относительное перерегулирование определяется по выражению

$$\sigma_{max} = \frac{\Delta h_{max}}{h_{уст}} \cdot 100\%.$$

При исследовании качества управления не всегда строится кривая переходного процесса; во многих случаях используются косвенные оценки, под которыми подразумеваются некоторые числа, характеризующие отдельные стороны переходного процесса. Эти числа находятся сравнительно просто без построения переходного процесса. Большим достоинством таких оценок является то, что они позволяют в некоторой степени судить о влиянии параметров системы на ее динамические свойства.

Известно несколько косвенных оценок качества переходного процесса: оценка по частотным характеристикам, интегральные оценки, корневые методы и т. д. [3, 58].

**Синтез корректирующих цепей.** Для обеспечения требуемых показателей качества переходных процессов производится расчет корректирующих цепей [3, 5, 6].

Устройства, вводимые в систему с целью обеспечения желаемого качества управления, называют корректирующими, а устройства, вводимые в систему с целью обеспечения устойчивости, — стабилизирующими. В качестве корректирующих устройств обычно используют четырехполюсники типа *RC*, не содержащие индуктивности. Любое корректирующее устройство может быть реализовано с помощью сопротивлений и емкостей с разделительными усилителями.

Наиболее разработанным, удобным и полным для расчета корректирующих цепей является метод логарифмических частотных характеристик, для которого имеется большое количество номограмм, графиков и других вспомогательных материалов, облегчающих труд проектанта. Построение нескорректированной и желаемой частотных характеристик по этому методу достаточно просто.

Корректирующие устройства бывают последовательные, параллельные и в виде местной обратной связи. При последовательной коррекции последовательно с элементами системы соединяется специальное корректирующее устройство, передаточная функция которого выбирается из условия

$$W_{ж}(p) = W_{нск}(p)\, W_{п.к}(p),$$

где $W_{ж}(p)$ — передаточная функция желаемой системы; $W_{нск}(p)$— передаточная функция разомкнутой нескорректированной системы, содержащей лишь функционально необходимые элементы; $W_{п.к}(p)$ — передаточная функция последовательного корректирующего устройства. В этом случае ЛАХ корректирующего устройства будет иметь вид

$$L_{п.к}(\omega) = L_{ж}(\omega) - L_{нск}(\omega).$$

Таким образом, для получения ЛАХ корректирующего устройства из ординат желаемой ЛАХ $L_{ж}(\omega)$ вычитаются ординаты нескорректированной ЛАХ $L_{нск}(\omega)$.

Последовательная коррекция осуществляется с помощью простых корректирующих устройств, выбор схемы и параметров которых не вызывает затруднений. Основными недостатками этих устройств являются: требование высокой стабильности параметров и чувствительность к помехам.

В случае применения параллельной коррекции или с помощью обратных связей необходимо выбрать место включения корректирующего устройства, т. е. установить, какие звенья в прямой цепи целесообразно охватить обратным звеном (обратной связью охватываются часто наиболее инерционные элементы системы). Передаточная функция такого соединения выражается соотношением

$$W(p) = \frac{W_{охв}(p)}{1 + W_{охв}(p)\, W_{о.с}(p)},$$

где $W_{охв}(p)$ — передаточная функция охваченных звеньев; $W_{о.с}(p)$ — передаточная функция звена обратной связи.

Тогда передаточная функция желаемой ЛАХ системы, в которую введена обратная корректирующая связь, примет вид

$$W_{ж}(p) = \frac{W_{нск}(p)}{1 + W_{охв}(p)\, W_{о.с}(p)}.$$

Для нахождения передаточной функции $W_{о.с}(p)$ предварительно определяют передаточную функцию последовательного корректирующего звена, как было указано выше. Очевидно, что какой бы вид коррекции мы ни применили, необходимо получить желаемую ЛАХ. Поэтому можно записать

$$W_{ж}(p) = W_{п.к}(p)\, W_{нск}(p) = \frac{W_{нск}(p)}{1 + W_{охв}(p)\, W_{о.с}(p)},$$



отсюда

$$W_{о.с}(p) = \frac{1}{W_{охв}(p)}\left(\frac{1}{W_{п.к}(p)} - 1\right).$$

Из последнего выражения следует, что передаточная функция $W_{о.с}(p)$ зависит как от $W_{п.к}(p)$, так и от $W_{охв}(p)$. Следовательно, при одной и той же передаточной функции $W_{п.к}(p)$ функция $W_{о.с}(p)$ может быть различной в зависимости от того, какую часть прямой цепи охватывают обратной связью.

Выбор параллельной корректирующей связи можно также провести, используя выражение для передаточной функции скорректированной системы:

$$W_{ж}(p) = \frac{W_{нохв}(p)\, W_{охв}(p)}{1 + W_{охв}(p)\, W_{о.с}(p)},$$

где $W_{нохв}(p)$ — передаточная функция неохваченных обратной связью звеньев. При этом допускается, что в некотором интервале частот

$$|W_{охв}(j\omega)\, W_{о.с}(j\omega)| \gg 1,$$

тогда

$$W_{ж}(j\omega) = \frac{W_{нохв}(j\omega)\, W_{охв}(j\omega)}{W_{охв}(j\omega)\, W_{о.с}(j\omega)} = \frac{W_{нохв}(j\omega)}{W_{о.с}(j\omega)}$$

или

$$L_{о.с}(\omega) = L_{нохв}(\omega) - L_{ж}(\omega).$$

Следовательно, для построения ЛАХ параллельного корректирующего звена $L_{о.с}(\omega)$ нужно из ординат ЛАХ неохваченных звеньев $L_{нохв}(\omega)$ вычесть ординаты желаемой ЛАХ $L_{ж}(\omega)$. По полученной ЛАХ $L_{о.с}(\omega)$ определяется передаточная функция корректирующего звена. Для уточнения расчета пользуются специальными номограммами. Из выражения для $W_{ж}(j\omega)$ следует, что показатели качества переходного процесса скорректированной системы мало зависят от $W_{охв}(p)$ и почти полностью определяются $W_{нохв}(p)$ и $W_{о.с}(p)$. В процессе эксплуатации это заставляет тщательно следить за параметрами указанных звеньев.

## РАСЧЕТ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Полный расчет автоматических систем представляет собой сложную инженерную задачу, в основе решения которой лежат:

— исходные инженерные соображения по выбору типа системы, отдельных ее звеньев и источников питания;

— статический расчет, связанный с определением статических характеристик отдельных звеньев и точности работы системы;

— динамический расчет, назначением которого является получение устойчивой системы с заданными качественными показателями работы в переходных режимах.

Вопросы динамики автоматических систем не решаются однозначно. Качественные показатели могут быть обеспечены различными корректирующими средствами при различном соотношении их параметров.

Самыми распространенными методами расчета являются частотные методы, которые широко используются в инженерной практике. Ниже приведен порядок расчета автоматической системы.

**Задание на расчет.** В зависимости от технических условий задания могут быть разнообразными. Чаще всего они содержат лишь требования общего характера в отношении величины мощности, точности, режима работы, эксплуатационных условий (температурный режим, влажность, длительность работы и т. п.). В некоторых случаях выдвигаются требования минимума габаритов и массы, бесконтактности, а также требования по роду тока, типу двигателя, типу усилителя и др.

**Выбор исходных данных.** К исходным данным расчета относятся: 1) вид воздействия (единичное ступенчатое воздействие, гармоническое задание и т. д.);

2) перерегулирование σ при единичном воздействии, составляющее обычно 10—40%; 3) время переходного процесса $T$; 4) число переходов через положение равновесия (обычно один-три); 5) максимальные допустимые ошибки (статическая и динамическая). Затем проектант должен выбрать род тока, напряжение и частоту, типы усилителей, исполнительных двигателей и т. д.

**Выбор основных элементов системы.** После уточнения исходных данных необходимо выбрать основные элементы системы, к которым относятся усилители (электромашинный, магнитный, электронный, полупроводниковый и др.), исполнительный двигатель, чувствительный или измерительный элемент, редуктор, преобразовательные элементы (дискриминаторы, выпрямители и т. п.), источники питания. Следует установить данные этих элементов по входной и выходной мощности, марку или тип выбираемых элементов и сформулировать требования к некоторым нестандартным элементам, входящим в систему.

**Определение параметров основных элементов и составление структурной схемы.** После выбора отдельных элементов следует определить их параметры, необходимые для расчета установившегося и динамического режимов. К параметрам основных элементов относятся коэффициенты усиления, постоянные времени, передаточные функции элементов. Часть параметров можно определить расчетным путем, часть — получить экспериментально, а некоторые — взять из справочных материалов. После этого составляют структурную схему системы и находят уравнение или передаточную функцию системы.

**Расчет режимов.** При статическом расчете определяют все статические характеристики отдельных звеньев, выполняют их линеаризацию и рассчитывают ошибку системы в соответствии с техническими условиями. Проверяют ошибку при заданных изменениях температурного режима. При динамическом расчете системы определяют ее поведение в переходном режиме при том или ином внешнем воздействии на систему.

Динамический расчет системы, выполняемый методом логарифмических частотных характеристик, включает в себя следующие этапы [5]:

1) построение логарифмической частотной характеристики нескорректированной системы и ее оценка;

2) построение желаемой логарифмической амплитудно-частотной характеристики;

3) предварительный выбор или определение корректирующей характеристики;

4) определение корректирующих звеньев, их параметров и места включения;

5) построение скорректированной характеристики и сопоставление ее с нескорректированной и желаемой характеристиками;

6) внесение изменений в средства коррекции и уточнение скорректированной характеристики;

7) построение кривой переходного процесса при единичном ступенчатом воздействии;

8) внесение дополнительных коррективов и окончательная оценка системы.

## § 1.1.3. ДИСКРЕТНЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

В связи с развитием вычислительной техники, радиолокации и автоматики в последние годы наряду с системами непрерывного действия все более широкое применение находят дискретные автоматические системы. Сигналы в дискретных системах описываются дискретными функциями времени. В этом их основное отличие от непрерывных систем.

Дискретные автоматические системы обычно делят на три основных типа: импульсные, релейные и цифровые.

Наиболее простые из этих систем — релейные — уже давно получили применение в тех случаях, когда требуются минимальные габариты и масса, а также высокое быстродействие.

Импульсные и цифровые системы обеспечивают высокую точность и помехозащищенность. Кроме того, цифровые системы дают возможность



вводить вычислительные и логические операции, позволяющие осуществлять наиболее сложные и ответственные задачи автоматического управления.

Дискретные системы могут быть как линейными, так и нелинейными (например, релейные и цифровые системы являются нелинейными). В дискретной системе любого типа происходит квантование сигнала, т. е. преобразование непрерывного сигнала в дискретный.

Общность непрерывных и дискретных автоматических систем состоит в том, что в основе их построения и работы лежат одинаковые принципы (разомкнутые, замкнутые и комбинированные системы). В связи с этим основные понятия и методы исследования непрерывных систем можно распространить на дискретные системы.

При расчете непрерывных систем, как уже отмечалось, целесообразно переходить от принципиальной схемы к структурной схеме, которая в некоторой степени представляет собой идеализированную расчетную схему, содержащую звенья направленного действия с передаточными функциями, типовыми нелинейностями и т. п. Расчет системы производится с учетом типовых воздействий (ступенчатого, гармонического и др.).

При расчете дискретных систем надлежит поступать таким же образом, переходя от исходной системы к расчетной со звеньями направленного действия. Однако расчет дискретных систем имеет некоторое отличие, связанное с заменой реальных дискретных сигналов идеализированными математическими сигналами с импульсной модуляцией какого-либо определенного типа. Часто реальные сигналы заменяются последовательностью дельта-функций, а в передаточных функциях непрерывных звеньев появляются дополнительные изменения, вызванные этой заменой в виде постоянных множителей, учитывающих конечную ширину и форму импульсов и представленных как передаточные функции запоминающих звеньев. Если в исходной схеме имеются фазовая, частотная или другие виды модуляции, то в расчетной схеме они заменяются амплитудной модуляцией.

В настоящее время наиболее эффективными методами исследования дискретных систем являются частотные методы [3, 5, 6, 69]. Применение специального аппарата дискретного преобразования Лапласа и его разновидности — $Z$-преобразования позволило с некоторыми изменениями перенести на дискретные системы частотные методы, разработанные для непрерывных систем, в том числе понятия передаточных функций, логарифмических частотных характеристик, частотные критерии устойчивости и т. п.

## § 1.1.4. НЕЛИНЕЙНЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

К нелинейным системам автоматического управления относятся такие системы, в которых связь между входными и выходными величинами одного или нескольких основных элементов определяется нелинейными уравнениями.

В общем случае, как уже отмечалось выше, любая автоматическая система имеет те или иные нелинейности, однако часто эти нелинейности влияют на поведение системы столь незначительно, что оно с достаточной точностью может быть описано одними линейными дифференциальными уравнениями. Вместе с тем при решении практических задач приходится исследовать системы, имеющие нелинейные характеристики, которые в значительной мере влияют на поведение системы. Анализ подобных систем нелинейными методами позволяет обнаружить новые явления, которые не наблюдаются в линейных или близких к ним системах. Так, например, если линейная система устойчива, то она устойчива при любых начальных отклонениях от исходного состояния; нелинейная же система при малых отклонениях может быть устойчива, а при больших — неустойчива. В нелинейных системах могут возникать автоколебательные режимы. В линейных системах с постоянными параметрами в квазистационарном режиме выходной сигнал имеет составляющие с частотой, равной частоте входного сигнала. В нелинейных же системах могут появиться высшие гармоники.

Необходимо также подчеркнуть, что в ряде случаев достижение высокого качества работы в системах оказывается возможным лишь при использовании

нелинейных средств коррекции. При этом приходится прибегать к нелинейному анализу. Поэтому линейная теория оказывается полезной только на стадии начального изучения системы. На следующем этапе проводится уточненный расчет, в котором рассматривается влияние отдельных нелинейностей (насыщение, люфт, сухое трение и т. д.).

Учет влияния нелинейностей в АС встречает большие трудности, поскольку приходится сталкиваться с решением нелинейных дифференциальных уравнений высоких порядков. В большинстве случаев это решение не может быть получено в общем виде, в связи с чем используются лишь частные решения, имеющие ту или иную степень приближения. Поэтому вначале рассматривается устойчивость системы и определяется наличие автоколебаний. В дальнейшем проводится более полный анализ с рассмотрением всего диапазона входных сигналов и начальных условий. Предложено много методов проведения такого анализа, но не существует единого метода, годного для всех нелинейных систем, ввиду разнообразия нелинейностей, различных целей анализа и условий работы системы. Иногда целесообразно использовать несколько методов, дополняющих друг друга.

Ниже дается краткая характеристика основных методов анализа нелинейных систем [3, 6]. К ним относятся:

1) метод интегрируемой аппроксимации;
2) метод фазовых траекторий;
3) метод малого параметра (в частности, метод гармонической линеаризации);
4) численно-графические методы;
5) методы моделирования.

**Метод интегрируемой аппроксимации.** Этот метод заключается в аппроксимации нелинейной характеристики некоторой близкой к ней кривой, которая может быть записана аналитически. К видам интегрируемой аппроксимации относятся линейная, кусочно-линейная и нелинейная интегрируемые аппроксимации.

Принцип аппроксимации первого вида основывается на допущении, что основные параметры системы имеют постоянное значение, соответствующее выбранной рабочей точке. Это позволяет применить методы линейной теории.

Аппроксимация второго вида предназначена для сравнительно больших сигналов и заключается в составлении линейных дифференциальных уравнений для каждого из прямолинейных участков, на которые разбита нелинейная характеристика. Общее решение сводится в этом случае к решению ряда неоднородных линейных уравнений.

Применение аппроксимации третьего вида приводит к решению уравнений путем замены характеристики нелинейного элемента некоторой близкой к ней кривой, которая может быть выражена аналитически. В ряде случаев значительной точности аппроксимации не требуется, причем часто соображения физического характера указывают на требуемую степень точности аппроксимации.

**Метод фазовых траекторий.** Данный метод основан на введении наглядных понятий и представлений геометрического характера. Основными из них являются понятия фазового пространства и фазовой траектории, которые дают полное представление о характере возможных движений в системе. Состояние системы может быть охарактеризовано $n$ координатами, которые можно рассматривать как задание некоторой точки в $n$-мерном пространстве, причем каждой точке этого пространства будет соответствовать одно определенное состояние (фаза системы).

В основном область применения этого метода ограничена системами не выше третьего порядка. Для систем, описываемых дифференциальными уравнениями второго порядка, фазовое пространство превращается в фазовую плоскость. Практически наибольшее распространение для исследования нелинейных систем получил метод, основанный на рассмотрении фазовой плоскости. Результаты исследования методом фазовых траекторий дают полную картину поведения системы для широкого диапазона начальных условий и возмущающих функций в виде скачка или линейно-возрастающего сигнала. Этот метод применим для любого типа нелинейности или сочетания нелинейностей. Путем графического интегрирования на его основе можно получить кривую переходного процесса.

Ниже показано построение фазовых траекторий для линейной и нелинейной систем [6].



*Построение фазовой траектории для линейной системы.* Пусть поведение системы в динамике выражается дифференциальным уравнением второго порядка

$$\frac{d^2x}{dt^2} + a_1\frac{dx}{dt} + a_2x = 0. \qquad (1.1.4)$$

Для определения состояния такой системы в данный момент времени необходимо знать две величины: значение $x$ и значение производной $\frac{dx}{dt}$ в момент времени $t_0$, т. е. $(x)_{t=t_0} = x_0$ и $\left(\frac{dx}{dt}\right)_{t=t_0} = \left(\frac{dx}{dt}\right)_0$.

Для получения фазовой траектории примем $x$ и $y = \frac{dx}{dt}$ (рис. 1.1.10) в качестве прямоугольных координат на плоскости $x$, $y$. В этом случае точка $M_0$ с координатами $x_0$ и $y_0$ будет соответствовать некоторому состоянию рассматриваемой системы. Точка $M$, характеризующая состояние системы, называется изображающей точкой, а плоскость $(x, y)$ является фазовой плоскостью. При движении системы изображающая точка $M$ описывает некоторую кривую — траекторию изображающей точки на фазовой плоскости.

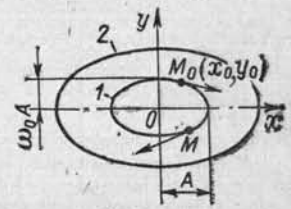


Рис. 1.1.10. Фазовые траектории консервативного звена.

Семейство фазовых траекторий для всех возможных начальных условий или некоторой совокупности их, представляющей интерес для анализа, называется фазовым портретом. Каждой точке фазовой траектории соответствует некоторое определенное значение времени.

Для получения фазового портрета необходимо провести ряд преобразований исходного дифференциального уравнения. К этим преобразованиям относятся:

1. Исключение времени $t$, которое отсутствует в явной форме в фазовой траектории.

Для этого в исходном уравнении делается замена $y = \frac{dx}{dt}$. Тогда будем иметь

$$\frac{dy}{dt} + a_1y + a_2x = 0, \text{ или } \frac{dy}{dt} = -a_1y - a_2x; \frac{dx}{dt} = y.$$

Разделив первое уравнение на второе, получим

$$\frac{dy}{dx} = -a_1 - a_2\frac{x}{y}.$$

Полученное уравнение определяет наклон фазовой траектории $\frac{dy}{dx}$, в координатах $x$, $y$.

2. Разделение переменных для интегрирования уравнения.

Для некоторых уравнений переменные разделяются просто и интегрирование может быть произведено достаточно легко.

3. Интегрирование уравнения для получения фазовой траектории.

Интегрирование может быть осуществлено аналитически, графически, численно или при помощи вычислительной машины.

В ряде случаев для нелинейных уравнений переменные не разделяются.

Если удается получить решение для $x$ и $y = \frac{dx}{dt}$, но процесс исключения времени $t$ весьма сложен, то отдельные точки фазовой траектории могут быть получены вычислением $x$ и $y$ из каждого уравнения для выбранного значения времени $t$. Тогда траектория строится по точкам, причем каждой точке будет соот-

ветствовать определенный индекс времени, что является полезным для построения переходного процесса.

Как правило, для нелинейных уравнений интегрирование проще всего выполнять графически. В настоящее время известен ряд практических методов построения фазовых траекторий (метод изоклин, дельта-метод и др.), использующих те или иные приемы графического интегрирования.

Рассмотрим несколько частных случаев траекторий для системы, описываемой уравнением (1.1.4).

Если в системе коэффициент демпфирования $a_1$ равен нулю, то траектория изображающей точки $M$ представляет собой эллипс (кривая 1 на рис. 1.1.10), что соответствует незатухающим колебаниям системы с амплитудой $A$ и частотой $\omega_0$, определяемых начальными условиями. При других начальных условиях имеет место эллипс с иными полуосями (кривая 2 на рис. 1.1.10) и т. д.

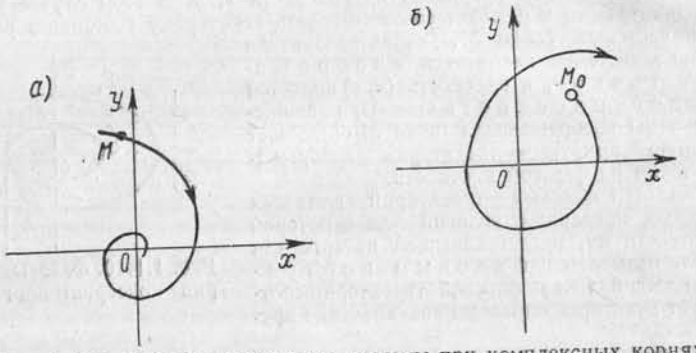



Рис. 1.1.11. Фазовые траектории системы при комплексных корнях уравнения с отрицательной (*а*) и положительной (*б*) вещественными частями.

Если коэффициент демпфирования $a_1$ положителен, то комплексные корни уравнения имеют отрицательную вещественную часть. В этом случае фазовая траектория имеет вид спирали, по которой изображающая точка $M$ приближается к началу координат (рис. 1.1.11, *а*). Наоборот, при корнях с положительной вещественной частью (расходящийся процесс) изображающая точка движется от начала координат (рис. 1.1.11, *б*).

Фазовые траектории для случая вещественных отрицательных корней показаны на рис. 1.1.12, *а*, а случай, соответствующий положительным вещественным корням, приведен на рис. 1.1.12, *б*.

*Построение фазовой траектории для нелинейной системы.* При построении фазовой траектории для нелинейной системы должны быть написаны частные линейные дифференциальные уравнения для отдельных участков характеристики нелинейного звена и на координатной плоскости проведены «линии переключения», т. е. линии перехода с одного участка характеристики на другой, которому соответствует свое линейное уравнение. В качестве примера на рис. 1.1.13 показаны фазовые траектории для релейной системы.

При построении фазовых траекторий необходимо учитывать следующее:

1. В верхней половине фазовой плоскости, где $y > 0$, изображающая точка всегда движется слева направо, т. е. в сторону увеличения $x$, а в нижней половине плоскости, где $y < 0$, — справа налево. Соответственно ставятся и стрелки на фазовых траекториях.

2. При пересечении траекторией оси $x$ величина $y$ равна нулю т. е. $\frac{dx}{dt} = 0$.

Таким образом, фазовые траектории пересекают ось $x$ под прямым углом.

В нелинейной системе, как уже отмечалось, возможно значительно большее многообразие видов движения по сравнению с линейными системами. В частности,



в реальной неустойчивой нелинейной системе колебания увеличиваются до определенной амплитуды, которая затем остается постоянной из-за неизбежной нелинейности характеристик элементов системы при больших сигналах (например,

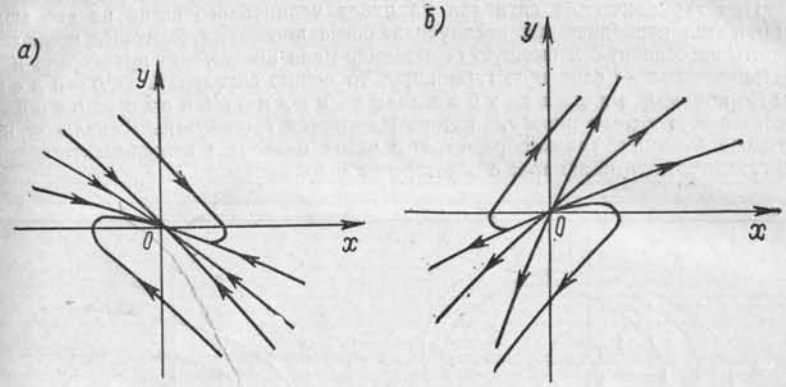



Рис. 1.1.12. Фазовые траектории системы при отрицательных (*а*) и положительных (*б*) вещественных корнях уравнения.

насыщение усилителей). В этом случае неустойчивая линейная система (линейная практически в определенной зоне) как бы превращается в устойчивую нелинейную автоколебательную систему, частота устойчивых автоколебаний которой зависит от ее параметров и от ее динамических свойств. Картина фазовых траекторий системы с устойчивыми автоколебаниями изображена на рис. 1.1.14. При небольших отклонениях имеет место расходящаяся спираль *1*, как в линейной неустойчивой системе. Однако в отличие от чисто линейной системы эта спираль не расходится до бесконечности, а асимптотически приближается к замкнутому контуру *2*, который соответствует автоколебаниям с амплитудой $A$. Спираль *3*, находящаяся вне контура, является сходящейся. Она приближается к контуру *2*. Поэтому последний называется устойчивым предельным циклом. На рис. 1.1.15 представлен случай нелинейной системы, устойчивой при малых отклонениях. Границей между двумя режимами является замкнутая кривая *2*, представляющая собой неустойчивый предельный цикл. От него отходят сходящаяся спираль *1* и расходящаяся спираль *3*.

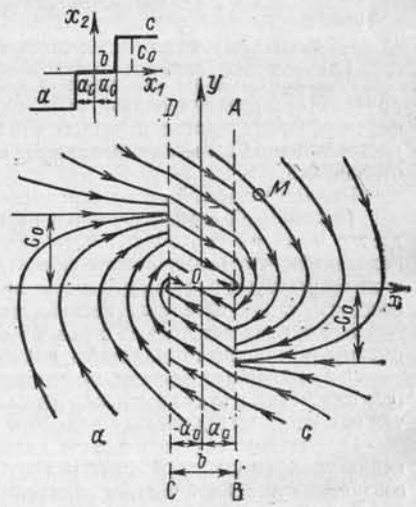



Рис. 1.1.13. Фазовые траектории для релейной системы.
*A—B, C—D* — линии переключения.

**Метод малого параметра.** Основная идея метода параметра состоит в том, что часто ряд членов, входящих в дифференциальные уравнения нелинейных систем, можно считать малыми по сравнению с остальными членами, в основном определяющими характер движения системы. Поэтому упрощенные уравнения

без малых членов можно рассматривать как уравнения, близкие к линейным. В связи с этим метод малого параметра относится к приближенным методам исследования, одной из разновидностей которых является *метод гармонической линеаризации*.

При гармонических сигналах на входе нелинейного звена на его выходе установятся периодические несинусоидальные колебания, которые можно разложить на основную и высшую гармоники. Если последними пренебречь и рассматривать только основную гармонику, то можно определить *комплексный коэффициент усиления нелинейного звена по первой гармонике*, который является своеобразным аналогом передаточной функции. Таким образом, этот метод позволяет использовать обычный линейный частотный аппарат с некоторыми видоизменениями.

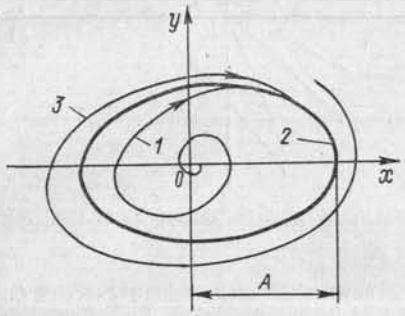



Рис. 1.1.14. Фазовые траектории, соответствующие устойчивому предельному циклу.

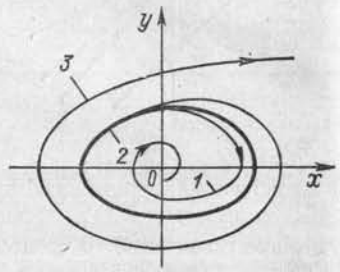



Рис. 1.1.15. Фазовые траектории, соответствующие неустойчивому предельному циклу.

Линеаризации во временно́й и частотной областях взаимно дополняют друг друга. Линеаризация вблизи рабочей точки требует непрерывных и легко дифференцируемых кривых и малых отклонений. Гармоническая же линеаризация может успешно применяться также и в случае разрывных кривых и значительных отклонений.

Рассматриваемый метод основывается на следующих допущениях:

1. Выходной сигнал является периодическим, и его основная частота совпадает с частотой синусоидального входного сигнала. Кроме того, обычно предполагается, что нелинейность симметрична, и, следовательно, в выходном сигнале отсутствуют постоянные составляющие нулевой частоты (однако метод можно обобщить также на случай несимметричных нелинейностей).

2. Учитывается только основная составляющая выходного сигнала, так как высшие гармоники подавляются линейными элементами системы.

3. Нелинейный элемент не меняется во времени. Для нестационарных элементов не существует комплексного коэффициента усиления по первой гармонике, так как на их выходе нельзя получить квазистационарный периодический сигнал.

Представим автоматическую систему, имеющую одну нелинейность (нелинейности объединены в один нелинейный элемент), в виде последовательного соединения линейной части и нелинейного звена, как это показано на рис. 1.1.16. Выявим условия, при которых в такой системе возникают автоколебания и определим их амплитуду и частоту. Пусть амплитудно-фазовая характеристика линейной части имеет вид

$$W_л(j\omega) = \frac{Q_л(j\omega)}{D_л(j\omega)},$$

а нелинейное звено описывается уравнением

$$x_{вых} = F(x).$$



Если линейная часть представляет собой низкочастотный фильтр и автоколебания в системе существуют, то они близки к синусоидальным. Поэтому можно считать, что

$$x = A \sin \omega t \text{ и } x_{вых} = F(A \sin \omega t).$$

Если при этом нелинейность $F(x)$ симметрична относительно начала координат и на систему не действуют возмущения, то, учитывая лишь первую гармонику ряда Фурье, будем иметь

$$x_{вых} = F(A \sin \omega t) = A[g(A) \sin \omega t + b(A) \cos \omega t],$$

где

$$g(A) = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} F(A \sin \omega t) \sin \omega t \, d\omega t;$$

$$b(A) = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} F(A \sin \omega t) \cos \omega t \, d\omega t.$$

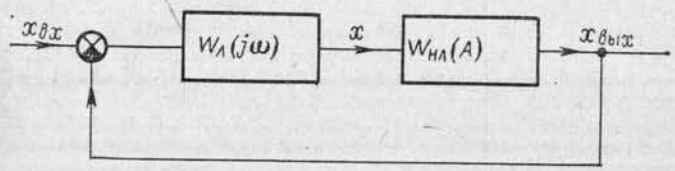



Рис. 1.1.16. Структурная схема нелинейной системы.

Тогда комплексный коэффициент усиления по первой гармонике (передаточная функция нелинейного звена или гармонический коэффициент преобразования) может быть записан в виде

$$W_{нл}(A) = g(A) + jb(A),$$

или

$$W_{нл}(A) = S(A) e^{-\beta(A)},$$

где $S(A) = \sqrt{g^2(A) + b^2(A)}$ — модуль передаточной функции; $\beta(A) = \operatorname{arctg} \frac{b(A)}{g(A)}$ — угол фазного сдвига, вносимый нелинейным элементом.

*Комплексный коэффициент усиления по первой гармонике* представляет собой отношение комплексной амплитуды первой гармоники выхода к комплексной амплитуде синусоидального сигнала на его входе.

Для нелинейных элементов с однозначной характеристикой $W_{нл}(A)$ — вещественная функция амплитуды входного синусоидального сигнала. Для нелинейных элементов с неоднозначной характеристикой (люфт, гистерезис) $W_{нл}(A)$ является комплексной функцией.

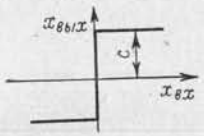
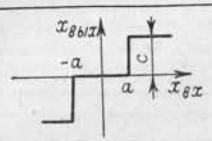
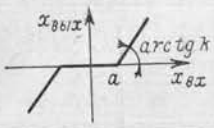
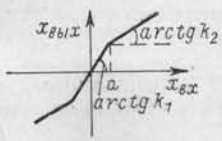
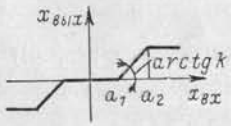
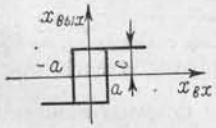
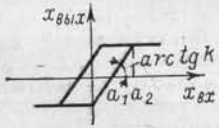
Формулы, позволяющие вычислить $W_{нл}(A)$ для ряда типовых нелинейных элементов, представлены в табл. 1.1.2.

Обычно автоколебания в нелинейных системах исследуются способами Л. С. Гольдфарба, Е. П. Попова или по нормированным логарифмическим частотным характеристикам [3, 6, 46].

Метод гармонической линеаризации позволяет оценить, устойчива или неустойчива система и имеет ли она предельные циклы, а также найти их частоту и амплитуду. Однако анализ, выполненный в частотной области, не дает даже приблизительной оценки динамического поведения системы во временно́й области, т. е. оценки переходных процессов. Это один из недостатков метода. Вторым недостатком является то, что он не позволяет проверить точность результата.

*Таблица 1.1.2*

**Коэффициенты гармонической линеаризации для типовых нелинейностей**

| Тип нелинейности | Значения коэффициентов $g(A)$ и $b(A)$ |
|---|---|
|  | $g(A)=\frac{4c}{\pi A};\quad b(A)=0$ |
|  | $g(A)=\frac{4c}{\pi A}\sqrt{1-\left(\frac{a}{A}\right)^2};\quad b(A)=0$ |
|  | $g(A)=k-\frac{2k}{\pi}\left[\arcsin\frac{a}{A}+\frac{a}{A}\sqrt{1-\left(\frac{a}{A}\right)^2}\right];$ $b(A)=0$ |
|  | $g(A)=k_2-\frac{2}{\pi}(k_2-k_1)\left[\arcsin\frac{a}{A}+\frac{a}{A}\times\right.$ $\left.\times\sqrt{1-\left(\frac{a}{A}\right)^2}\right];\quad b(A)=0$ |
|  | $g(A)=\frac{2k}{\pi}\left(\psi_2-\psi_1+\frac{1}{2}\sin\psi_2-\frac{1}{2}\sin 2\psi_1\right)$ $(A>a_2);\ \psi_1=\arcsin\frac{a_1}{A};\ \psi_2=\arcsin\frac{a_2}{A};$ $b(A)=0$ |
|  | $g(A)=\frac{4c}{\pi A}\sqrt{1-\left(\frac{a}{A}\right)^2};\quad b(A)=-\frac{4ca}{\pi A^2}$ |
|  | $g(A)=\frac{k}{\pi}\left(\frac{\pi}{2}+\psi_1+\frac{1}{2}\sin 2\psi_1\right);$ $\psi_1=\arcsin\left(1-\frac{2a_1}{A}\right)\quad b(A)=-\frac{k}{\pi}\cos^2\psi_1$ |



Вместе с тем необходимо заметить, что этот метод является единственной простой практической процедурой для изучения нелинейных систем выше второго порядка.

**Метод статистической линеаризации.** Теория линейных преобразований случайных функций приближенно применима к таким нелинейным системам, в которых нелинейные зависимости могут быть линеаризованы.

Наиболее часто используются следующие два метода статистической линеаризации, базирующиеся на двух различных критериях статистической равноценности нелинейной и линеаризованной характеристик:

1) метод статистической линеаризации, основанный на использовании критерия равенства математических ожиданий и дисперсий случайных процессов на выходе нелинейного статистического элемента и эквивалентного ему линеаризованного элемента;

2) метод статистической линеаризации, основанный на использовании критерия минимума среднеквадратичного отклонения процессов на выходе нелинейного статистического элемента и эквивалентного ему линеаризованного элемента.

Оба указанных метода являются приближенными и предполагают, что случайный процесс на входе нелинейностей подчиняется нормальному закону распределения.

Исследование и расчет нелинейных систем могут быть выполнены численными и графическими методами интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений. Целесообразно производить расчет нелинейной системы комбинированным путем, предварительно использовав какой-либо приближенный метод, а затем для уточнения и проверки правильности выбранных параметров провести расчет численным или графическим способом. Поскольку сложная нелинейная задача не может быть решена в общем виде, для нахождения лучшего или просто приемлемого варианта нужно решить значительное число частных задач.

Для этой цели используется вычислительная машина, с помощью которой можно промоделировать весьма сложные системы со многими нелинейностями и обследовать широкую область начальных условий и внешних воздействий, причем коррекцию можно выполнить путем последовательных приближений. Однако и в этом случае аналитические и графические методы анализа могут оказаться весьма полезными, так как они позволяют предварительно найти структуру системы и зону варьирования параметров. Кроме того, в некоторых случаях существенные черты отдельных нелинейностей легче раскрываются при помощи фазовых характеристик (фазового портрета) системы, а не посредством переходной характеристики. Поэтому предварительное изучение задачи тем или иным методом может дать значительную экономию машинного времени, уменьшить объем полученного материала и сократить время для его анализа.

## § 1.1.5. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Создание оптимальных АС является одним из важнейших направлений современной теории и практики автоматического управления. Под оптимальной системой понимают такую систему, которая обеспечивает наивыгоднейшее, в определенном смысле, изменение управляемой координаты. Как известно, к поведению объекта управления предъявляются определенные требования. В состав этих требований входит задание цели управления. Цель управления можно рассматривать как достижение экстремума некоторой величины — критерия оптимальности. Таким образом, задача оптимизации сводится к отысканию таких законов изменения управляющих воздействий, которые обеспечивали бы экстремумы некоторым функционалам — критериям оптимальности, выражающим определенные технико-экономические показатели: КПД, быстродействие, производительность, экономичность и т. д.

Синтез оптимальных систем можно разбить на следующие этапы:

1) определение математической модели объекта управления, т. е. определение функциональной зависимости выходной координаты $x$ от входного воздействия

на объект $u$, которое может быть задано различными способами и, в частности, системой дифференциальных уравнений;

2) оценка ограничений как внутренних, присущих физическим процессам в объекте управления, так и внешних;

3) определение критерия оптимальности, по которому следует оценить качество рассматриваемого варианта;

4) выбор метода решения, с помощью которого можно прийти к выводу о том, что в смысле выбранного критерия система функционирует наилучшим образом;

5) оценка возможности практической реализации рассчитанной системы.

Выбор критерия оптимальности представляет собой сложную задачу, так как многообразие задач, решаемых на практике, а также различие технических требований, предъявляемых к проектируемым системам, не позволяют сформулировать единый критерий, пригодный для всех случаев. Поэтому в каждой конкретной задаче требуется определить свой критерий, минимум или максимум которого обеспечит надлежащее качество управления системой. В большинстве случаев критерий оптимальности представляет собой интеграл от координат системы.

Другой сложностью синтеза оптимальных систем является выбор математического аппарата, пригодного для решения той или иной конкретной задачи. Следует также иметь в виду, что реализовать на практике математическое решение задачи оптимизации в ряде случаев не представляется возможным из-за несовершенства существующих элементов автоматики. В других случаях реализация критерия оптимальности может потребовать такого усложнения системы, что ее создание становится нецелесообразным, и приходится ограничиваться лишь определенным приближением к оптимальному режиму, т. е. использовать квазиоптимальные системы управления.

К в а з и о п т и м а л ь н ы м и называют системы, алгоритм управляющих устройств которых получен путем сравнительно небольших отступлений от оптимального алгоритма. При этом управляющее устройство таких систем может реализоваться по достаточно простой схеме.

Что касается выбора метода решения, то в настоящее время математической основой синтеза оптимальных АС является в а р и а ц и о н н о е и с ч и с л е н и е.

Для решения таких вариационных задач наиболее широко используются три метода [43, 64]:

1) классический вариационный метод;

2) принцип максимума, обоснованный Понтрягиным;

3) метод динамического программирования (метод Беллмана).

Классический вариационный метод развивался и совершенствовался, однако применение его для решения задач оптимального управления связано с определенными трудностями, которые заключаются в следующем: а) при дополнительных условиях в виде неравенств функция управления может находиться не только внутри, но и на границе допустимой для нее области; б) решением оптимальной задачи часто может быть функция управления, которая является кусочно-непрерывной функцией с конечным числом точек разрыва первого рода (например, релейное управление). Оба эти условия принципиально могут быть учтены, но делают задачу достаточно сложной.

Указанные трудности преодолеваются при использовании принципа максимума.

В отличие от классического вариационного исчисления и принципа максимума метод динамического программирования позволяет найти оптимальное управление как функцию фазовых координат системы,что упрощает синтез оптимальных систем.

Существует связь метода динамического программирования с методом функций Ляпунова. Эта связь заключается в том, что действительное решение задачи дают только такие оптимизирующие функции, которые являются функциями Ляпунова для замкнутой системы. Таким образом, этот метод позволяет оптимизировать систему и обеспечить ее устойчивость. Недостаток метода состоит в том, что с ростом размерности задачи возрастают требования к быстродействию и объему памяти ЦВМ.



# Глава 1.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

## § 1.2.1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

М о д е л и р о в а н и е — это метод познания окружающей действительности посредством моделей. М о д е л и — объекты, находящиеся в некотором соответствии с реальными объектами (оригиналами), способные в той или иной степени заменить оригиналы при их исследовании.

Различают мысленное и материальное моделирование.

М ы с л е н н о е м о д е л и р о в а н и е — это процесс появления в нашем сознании образов (гипотез, схем замещений, математических записей и др.), имеющих определенное сходство с соответствующими реальными объектами.

М а т е р и а л ь н о е м о д е л и р о в а н и е — это метод исследования физических процессов на материальных моделях (физических, аналоговых и др.).

Ниже рассматривается именно этот вид моделирования судовых электроэнергетических систем.

Материальное моделирование, с одной стороны, предусматривает способы воспроизведения объектов и процессов в них с соблюдением определенных требований теории подобия, с другой — указывает пути и принципы использования моделей для изучения интересующих нас физических процессов.

С р е д с т в а м о д е л и р о в а н и я (СМ) — физические, математические и комбинированные (гибриды) модели — создаются на базе метода моделирования и при рациональном их использовании существенно повышают эффективность решения задач, стоящих перед судовой электроэнергетикой. В период же научно-технической революции оперативность и качество решения научно-технических проблем в значительной степени определяются умением использовать СМ.

Приведем классификацию средств моделирования, используемых в судовой электроэнергетике. Средства моделирования включают в себя: электродинамические (физические) модели СЭЭС (ЭДМ), статические модели постоянного и переменного тока (Ст. М), аналоговые модели (АМ) и цифровые модели (ЦМ).

Если модель и оригинал (реальная установка) имеют одинаковую физическую природу рассматриваемых явлений, то осуществляется физическое моделирование, например, с помощью электродинамической модели СЭЭС. В основе его лежит ф и з и ч е с к о е п о д о б и е.

Если модель воспроизводит физически иное явление, но описываемое тем же видом уравнений, что и явление в оригинале, то при идентичности уравнений имеет место математическое моделирование. В основе его лежит м а т е м а т и ч е с к о е п о д о б и е.

Средства математического моделирования подразделяются на аналоговые и цифровые модели. Аналоговые модели включают в себя статические модели (Ст. М) и электронные аналоговые модели (ЭАМ).

*Статические модели* — это аналоговые модели на статических (пассивных) элементах, воспроизводящие схему замещения оригинала. Здесь каждому элементу физической системы соответствует независимо управляемый элемент. Иногда такие модели называют моделями-аналогами или расчетными столами.

*Электронные аналоговые модели* — это аналоговые модели на электронных решающих элементах непрерывного действия, воспроизводящие структуру уравнений по математическим операциям. Здесь каждой математической операции соответствует независимо управляемый элемент.

Базой для электронных аналоговых моделей служат обычно аналоговые вычислительные машины (АВМ). ЭАМ могут быть выполнены и как специализированные — для решения конкретных задач. Иногда эти модели называют структурными моделями или просто АВМ (по базе, на которой они набираются).

*Цифровые модели* (обычно электронные — ЭЦМ) — это математические модели на элементах, производящих математические операции дискретно. Такие модели имеют цифровой счет, а решение задачи, моделирование процесса, производится по алгоритму, т. е. по правилу, на основании которого строится система вычислений. Базой электронных цифровых моделей служат обычные электронные цифровые вычислительные машины (ЦВМ). ЭЦМ могут быть созданы и как специализированные.

*Комбинированные модели*, или модели-гибриды, соединяют в себе лучшие стороны различных моделей. Наиболее универсальной такой моделью является физико-аналого-цифровой комплекс (ФАЦК).

Рассматривая материальные модели — физическую, аналоговую и цифровую, необходимо подчеркнуть их общность, состоящую в том, что каждой из них предшествует абстрактно-математическая, а иногда логическая, модель явления.

Моделирование на аналоговой модели начинается с дифференциальных уравнений (или других типов уравнений), которые далее приводятся к машинному виду, т. е. к специальной форме абстрактно-математической модели, учитывающей особенности АМ и удобство расчета процесса на вычислительном устройстве данного типа. Далее машинные уравнения с добавлением граничных и начальных условий воспроизводятся на АМ, т. е. осуществляется материальное аналоговое моделирование.

Моделирование на физической модели (ЭДМ) начинается с определения критериев подобия, для чего используется либо метод тождественности уравнений, либо метод анализа размерностей. В обоих случаях в основе лежит абстрактно-математическая модель изучаемого явления. Далее по правилам теории подобия производится выбор значений параметров модели, чем обеспечивается тождественность уравнений натуры и модели; к ним добавляются подобные для натуры и модели граничные и начальные условия; критерии и условия однозначности воспроизводятся на физической модели, и таким образом осуществляется материальное физическое моделирование.

Рассмотренные три ступени моделирования имеются и при цифровом моделировании: абстрактно-математическая модель в виде алгоритма расчета; специфическая форма абстрактно-математической модели — программа, учитывающая особенности ЭЦМ при реализации алгоритма на ЦВМ; материальная модель — воспроизведение процесса на ЦВМ.

Как показывает опыт, основными направлениями использования средств моделирования СЭЭС являются: проверка и уточнение теории; проведение исследований и расчетов; автоматизация проектирования; регулировка и настройка элементов системы и отдельных устройств; создание устройств систем управления и осуществление автоматического управления; обучение технического персонала.

## § 1.2.2. ПРИНЦИП КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ — ОСНОВА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В СЭЭС

Принцип комплексного моделирования предполагает целесообразное применение СМ и отвергает механическое использование всех средств для решения одной и той же задачи. Принципу органически чужды противопоставления одних средств другим. Различные СМ используются в их преимущественных областях, в разумном сочетании и целесообразным способом. Это позволяет резко повысить производительность, расширить объем и улучшить качество расчетных и исследовательских работ.

Электродинамическая (физическая) модель СЭЭС представляет собой совокупность физических элементов СЭЭС, соединяемых в соответствии со схемами исследуемых систем-оригиналов. Физические модели



элементов СЭЭС выполняются в соответствии с положениями теории подобия (см. § 1.2.3).

Основным назначением электродинамической модели СЭЭС является проверка теории в области режимов СЭЭС и получение количественных характеристик процессов в сложных автоматизированных системах.

При создании новых систем и отсутствии изготовленных оригиналов только физические модели, отражающие наиболее полно существенные стороны процессов оригиналов, могут убедительно показать правильность или ошибочность осуществляемых идей. В процессе опыта работы с ЭДМ СЭЭС определились две формы их использования в области уточнения и проверки теории: обоснование технических заданий на новые СЭЭС и контроль правильности разрабатываемых алгоритмов и программ.

Использование ЭДМ для получения количественных характеристик сложных процессов резко сокращает затраты времени (даже в сравнении с ЭАМ и ЭЦМ), и, таким образом, заменяет расчетные средства. Одной из новых форм использования ЭДМ с указанной целью является подготовка натурных испытаний. На ЭДМ проводятся десятки и сотни экспериментов, чтобы выбрать нужные режимы и на оригинале провести минимум опытов.

ЭДМ может широко использоваться для проверки различных регулирующих устройств, а также систем управления.

Статическая модель СЭЭС представляет собой аналоговую модель, в которой с помощью совокупности элементов электрической цепи воспроизводится схема замещения СЭЭС. Каждый элемент такой модели соответствует элементу реальной СЭЭС: источнику ЭДС, активным и индуктивным сопротивлениям, емкостям, трансформаторам и т. д. Элементы модели могут соединяться по схемам того или иного вида, а их параметры — регулироваться в значительных пределах. Измерительные приборы позволяют измерять токи, напряжения, потоки мощности в различных точках замещения. В математическом отношении статическая модель является устройством, позволяющим решать систему алгебраических уравнений с действительными (модель постоянного тока) или комплексными (модель переменного тока) коэффициентами. Поэтому на модели можно устанавливать стационарные режимы моделируемых систем. С помощью же дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в системе, последние могут быть рассчитаны методом последовательных интервалов.

При наличии ЭАМ или ЭЦМ статические модели используют для расчетов установившихся режимов, а также переходных процессов по упрощенным алгоритмам для систем с несколькими ступенями распределения и значительным числом потребителей.

Электронная аналоговая модель, используемая для исследования режимов в СЭЭС, выполняется в виде структурной * модели (специализированная модель), включающей в себя ряд секций: две генераторные, две двигательные, одну для уравнения связи, с достаточным числом блоков нелинейностей, функциональных блоков и т. д. Назначением модели является всестороннее исследование переходных процессов в системах, имеющих ограниченное число основных элементов (четыре-пять машин) по полным уравнениям Горева — Парка. На ЭАМ широко исследуются токи короткого замыкания (т. к. з.), изменения напряжения, устойчивость нагрузки и параллельной работы генераторов, вопросы синхронизации и эквивалентирования элементов СЭЭС. Использование ЭАМ сочетается с экспериментом на ЭДМ, что особенно необходимо при отработке блок-схем расчета на ЭАМ.

Цифровое моделирование предназначено для определения оптимальных параметров системы, создания альбомов переходных процессов для СЭЭС (например, расчетных кривых т. к. з. и др.), расчетов повышенной точности. К настоящему времени созданы типовые программы для расчета устано-

---

* Здесь и далее под структурной моделью понимается такая модель, в которой достигается однозначное соответствие между структурой системы-оригинала и структурой системы-модели. На принципах структурного моделирования в настоящее время строятся и физические, и аналоговые, и цифровые модели.

вившегося режима, изменения напряжения, т. к. з., включения нагрузки, устойчивости нагрузки и параллельной работы генераторов, несимметричных режимов генераторов. Разработаны и реализованы на ЦВМ и общие алгоритмы, охватывающие все перечисленные процессы.

При разработке алгоритмов расчета процессов особенно ощутимым является разумное комплексное использование ЭДМ, ЭАМ и ЭЦМ. Решение всех новых задач на ЭЦМ, отработка программ сопровождается экспериментом на ЭДМ, а при необходимости — вычислениями на АВМ. Проверка математического описания специфических элементов проводится на ЭДМ, получение некоторых значений коэффициентов (параметры успокоительных контуров и др.) — на ЭАМ. Наконец, по результатам расчетов на ЭЦМ проверяется согласование сложных алгоритмов и соответствующих программ с более простыми алгоритмами и программами, а также возможность свертывания типовой схемы и доказательство справедливости упрощенных алгоритмов. В результате появляется полная уверенность в работоспособности и достоверности полученных алгоритмов и программ.

Модели-гибриды (аналого-цифровые, физико-цифровые и физико-аналого-цифровые комплексы) создаются на базе накопленного опыта использования ЭДМ, ЭАМ и ЭЦМ. В них предусматривается принцип структурного моделирования. Модели-гибриды применяются для решения задач синтеза СЭЭС, точности расчетов и моделирования, исследования процессов в статистическом плане, диагностики процессов. В этих моделях существенно облегчается проведение и обработка результатов моделирования для получения статистических характеристик процессов в СЭЭС.

Принцип комплексного моделирования при исследованиях и расчетах режимов СЭЭС определяет:

— целесообразное сочетание средств;

— способы использования средств.

Преимущественные области использования СМ, их целесообразные сочетания связаны как с характером задачи, так и с особенностями тех или иных средств. Характер задачи определяет ее математическую формулировку, объем и точность вычислений. Особенности тех или иных средств моделирования характеризуются возможностями воспроизведения физического процесса, протекающего в системе-оригинале, точностью и быстротой производства расчета, а также удобством использования (быстротой подготовки задачи к решению и наглядностью процесса вычисления).

Учитывая особенности СМ и характер задач расчета и исследований режимов в СЭЭС, а также накопленный опыт, можно назвать следующие преимущественные области применения средств моделирования:

для *электродинамических моделей* СЭЭС — уточнение и проверка математической формулировки задач, связанных с режимами систем; получение количественных данных наиболее сложных процессов автоматизированных систем;

для *статической модели* СЭЭС — приближенный расчет, установившийся режим;

для *специализированной аналоговой модели* СЭЭС — широкое использование в исследованиях переходных режимов при ограниченном числе машин в системе;

для *цифровой модели* — расчеты повышенной точности, расчеты наиболее сложных процессов, создание альбомов переходных процессов СЭЭС, синтез систем;

для *моделей-гибридов* — синтез систем, оценка точности расчетов и моделирования, расчеты вероятностных процессов.

При комплексном использовании СМ эксперимент в натуре, обычно дорогостоящий и трудноорганизуемый, выступает как проверка принципов построения физической модели, на которой в основном и проверяются положения теории.

При решении тех или иных задач полезно применить также сочетание двух, а иногда и большего числа средств, не связанных в единый моделирующий комплекс.



Наконец, заметим, что при комплексном использовании СМ устраняется неоправданное увлечение быстродействующими моделями в тех случаях, когда с успехом можно обойтись и более простыми вычислительными средствами, вплоть до микрокалькулятора и логарифмической линейки.

## § 1.2.3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ

Физические и математические модели электроэнергетических систем создаются и применяются на основе теории подобия, изучающей условия подобия и свойства подобных явлений.

Физические процессы подобны, если в сравниваемых объектах и системах отношение между одноименными величинами в сходственных точках пространства и в сходственные моменты времени равно постоянному числу. Так, для электрической цепи, состоящей из сопротивления $R$ и индуктивности $L$, при наличии подобия имеются следующие соотношения:

$$\frac{U}{U^{\text{м}}} = m_U;\quad \frac{L}{L^{\text{м}}} = m_L;\quad \frac{R}{R^{\text{м}}} = m_R;\quad \frac{I}{I^{\text{м}}} = m_I;\quad \frac{t}{t^{\text{м}}} = m_t. \quad (1.2.1)$$

Здесь $U$, $L$, $R$, $I$, $t$ — физические величины (параметры процесса и элементов) оригинала; $U^{\text{м}}$, $L^{\text{м}}$, $R^{\text{м}}$, $I^{\text{м}}$, $t^{\text{м}}$ — соответственные величины модели; $m_U$, $m_L$, $m_R$, $m_I$, $m_t$ — постоянные числа, называемые коэффициентами, константами или масштабами подобия.

При физическом подобии, когда имеется подобие между моделируемым объектом и моделью, имеющими одинаковую физическую природу, масштабы подобия — отвлеченные числа.

При математическом подобии, когда имеется подобие между соответственными величинами, входящими в математические выражения, масштабы подобия имеют размерность, так как представляют собой отношения между различными физическими величинами.

При моделировании некоторые коэффициенты подобия (аналогии) могут быть равны единице. Это означает, что численные значения сравниваемых величин в натуре и в модели одинаковы. Так, напряжение в физической модели и в оригинале СЭЭС часто бывает одинаковым, т. е. $m_U = 1$.

В подобных системах существует пропорциональность не только между одноименными физическими величинами, но и между их приращениями и дифференциалами. Например,

$$\frac{R}{R^{\text{м}}} = \frac{\Delta R}{\Delta R^{\text{м}}} = \frac{dR}{dR^{\text{м}}} = m_R.$$

При использовании относительных единиц измерения подобные явления удобно выражать с помощью инвариантов подобия. Так, если за базисные величины (единицы измерения) принять значения переменных и констант для определенного момента и сходственных точек оригинала и модели, то численные значения одноименных величин подобных систем будут одинаковыми, т. е. будут являться инвариантами подобия.

Безразмерные комбинации физических величин, характеризующих рассматриваемое явление, составленные по определенным правилам и являющиеся одинаковыми для группы подобных явлений, называются критериями подобия.

Критерии подобия обозначаются греческой буквой $\Pi$, и в соответствии с определением $\Pi = \text{idem}$ (от английского слова *idem* — то же).

Комбинации, составленные из коэффициентов подобия и соответствующие комбинациям физических величин критериев подобия, называются индикаторами подобия. В подобных системах индикаторы подобия равны единице: $C = 1$.

Теория подобия основывается на трех теоремах [8, 9, 10]. Первые две теоремы исходят из существования подобия как заведомо известного факта и устана-

вливают: первая — необходимые условия подобия, вторая — число критериев подобия и наличие однозначной зависимости между ними. Третья (или обратная) теорема определяет необходимые и достаточные условия для утверждения факта существования подобия между явлениями.

**Первая теорема подобия** (Ньютона — Бертрана) гласит, что *у подобных явлений индикаторы подобия равны единице или критерии подобия численно одинаковы.*

Так, для подобной электрической цепи, состоящей из $R$ и $L$, к которой подведено напряжение $U$ и по которой протекает ток $I$, справедливы критерии подобия

$$\left.\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{L}{Rt} = \text{idem}; \\ \Pi_2 &= \frac{U}{RI} = \text{idem}. \end{aligned}\right\} \qquad (1.2.2)$$

Соответственно индикаторы подобия равны

$$C_1 = \frac{m_L}{m_R m_t} = 1; \; C_2 = \frac{m_U}{m_R m_I} = 1. \qquad (1.2.3)$$

Из первой теоремы подобия следует, что коэффициенты подобия находятся в определенной связи, характеризующейся индикаторами подобия, и произвольно выбираться не могут. Число критериев подобия меньше числа уравнений на единицу.

**Вторая теорема подобия** (Пи-теорема) устанавливает, что *если имеется полное физическое уравнение* $a_1 = f(a_2, a_3, \ldots, a_n)$, *связывающее n параметров процесса и элементов, то оно может быть представлено в виде критериального уравнения* $\Pi_1 = F(\Pi_2, \Pi_3, \ldots, \Pi_{n-k})$, где $\Pi_n$ — безразмерные величины, называемые критериями подобия, составленные по определенному закону из $n$ параметров процесса и элементов, влияющих на ход процесса; $k$ — число физических величин данного уравнения, имеющих независимые размерности (число основных единиц должно быть больше или равно $k$).

Теорема позволяет произвести своего рода замену переменных сокращением их числа с $n$ размерных величин до $n - k$ безразмерных величин. Это весьма упрощает обработку аналитических и экспериментальных исследований, так как связь между критериями получается более простой, чем между физическими величинами.

Из теоремы следует, что один из $n - k$ критериев подобия является функцией $n - k - 1$ критериев. Если $n - k = 1$, то такой критерий соблюдается автоматически и явление называется автомодельным.

**Третья теорема подобия** (Кирпичева — Гухмана) устанавливает необходимые и достаточные условия подобия: *подобны между собой те явления, которые имеют подобные условия однозначности и одинаковые определяющие критерии подобия.*

Условия однозначности явления и выделяют из класса явлений одно конкретное: в подобных системах величины, характеризующие условия однозначности, находятся в численно постоянном отношении. И эти постоянные отношения не могут быть произвольными, а должны соответствовать одинаковым определяющим критериям, составленным из параметров элементов системы и величин, являющихся независимыми аргументами (время, длина и т. д.). Из теоремы следует, что для того чтобы создать такую модель, в которой процесс протекал бы подобно процессу в оригинале, необходимо:

— по правилам теории подобия выбрать параметры модели и тем обеспечить тождественность уравнений натуры и модели; это достигается при равенстве определяющих критериев;

— добавить к ним подобные для натуры и модели граничные и начальные условия; это обеспечивается при подобии условий однозначности.



Рассмотренные теоремы подобия дополняются следующими вытекающими из них положениями подобия [8, 9]:

1. Сложные системы, составленные из нескольких систем, соответственно подобных в отдельности, подобны и в целом, если подобны граничные условия.

2. Условия подобия, справедливые для линейных систем, могут быть распространены на нелинейные системы или системы с переменными параметрами, если выполняются условия совпадения относительных характеристик сходственных параметров, являющихся нелинейными или переменными.

3. Условия подобия, справедливые для изотропных и однородных систем, могут быть распространены на анизотропные и неоднородные системы, если соответствующие относительные анизотропии и неоднородности сравниваемых систем одинаковы.

4. Процессы, протекающие в геометрически неподобных системах, могут быть физически подобными, если в сходственных точках соответственно отображенного гиперпространства имеют место подобные изменения параметров процесса.

5. Для подобия стохастически определенных систем необходимо соблюсти условия подобия детерминированно определенных систем с использованием средних значений определяющих параметров и параметров однозначности и, кроме того, соблюсти равенство инвариантов подобия — доверительных интервалов тех же параметров модели и оригинала при определенной доверительной вероятности.

В процессе создания и использования СЭЭС особенно часто приходится прибегать к помощи двух первых положений подобия.

Различают полное, неполное и приближенное подобие. Полное подобие достигается при условии соблюдения требований третьей теоремы подобия в отношении временно́го и пространственного протекания процесса. Неполное подобие будет в том случае, когда не соблюдается подобие либо во времени, либо в пространстве, а приближенное подобие — когда коэффициенты подобия справедливы не в течение всего процесса и не для всех переменных.

Критерии подобия определяются двумя способами [8, 10]: с помощью анализа размерностей, когда математическое описание явления неизвестно, или из условия тождественности систем уравнений. Второй способ отличается большой наглядностью. Критерии определяются в соответствии с так называемым правилом интегральных аналогов [8, 9]:

1) уравнение приводится к безразмерному виду делением всех его членов на какой-либо один из них;

2) опускаются знаки дифференцирования и интегрирования;

3) полученные безразмерные комплексы, составленные из переменных величин и параметров, являются критериями подобия;

4) для выявления лучшего физического смысла критериев производят взаимное деление и умножение некоторых из них;

5) записывают один из критериев как функцию $n - k - 1$ критериев.

В качестве примера используем уравнение для цепи $RL$

$$U = RI + L\frac{dI}{dt}.$$

В соответствии с п. 1

$$\frac{U}{RI} = 1 + \frac{L}{RI}\frac{dI}{dt};$$

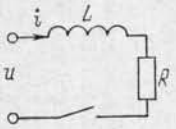
в соответствии с пп. 2—5

$$\frac{U}{RI} = f\left(\frac{L}{Rt}\right).$$

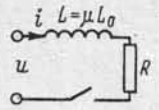
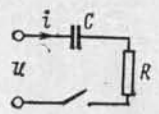
В процессе моделирования судовых электроэнергетических систем приходится иметь дело главным образом с элементами, относящимися к линейным

*Таблица 1.2.1*

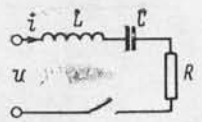
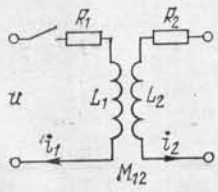
**Некоторые критерии, используемые при моделировании СЭЭС**

| № п/п | Схема электрической цепи | Уравнения | Критериальное уравнение и критерии | Дополнительные замечания |
|---|---|---|---|---|
| 1 |  | $u = Ri + L\frac{di}{dt}$ | $\frac{u}{Ri} = f\left(\frac{L}{Rt}\right)$; $\Pi_1 = \frac{u}{Ri} = \text{idem}$; $\Pi_2 = \frac{L}{Rt} = \text{idem}$ | Для обеспечения подобия процессов в модели необходимо соблюсти равенство определяющего критерия $\Pi_2 = \frac{L}{Rt} = \frac{T_2}{t}$ и подобие начальных условий<br>При $m_t = 1$ $t = m_t t^{\text{м}} = t^{\text{м}}$, где $t$ — время в оригинале, $t^{\text{м}}$ — время в модели. $\Pi_2 = T_L = \text{idem}$, т. е. в подобных системах при одинаковой длительности протекания процесса должны быть одинаковыми постоянные времени. Изменением масштаба времени $m_t$ можно обеспечить равенство критерия $\Pi_2$<br>Если принять $m_t = \frac{t}{t^{\text{м}}} = \frac{T}{T^{\text{м}}}$, то в любом случае явление будет подобным, т. е. автомодельным<br>Подобие начальных условий обеспечивается в общем случае при $i_{\text{н}}/i_{\text{н}}^{\text{м}} = m_i$; нулевые начальные условия: $i_{\text{н}} = i_{\text{н}}^{\text{м}} = 0$<br>Критерий $\Pi_1$ позволяет установить масштаб тока $\Pi_1 = \frac{u}{Ri} = \frac{i_\infty}{i}$, откуда $\frac{i_\infty}{i_\infty^{\text{м}}} = \frac{i}{i^{\text{м}}} = m_i$ |

*Продолжение табл. 1.2.1*

| № п/п | Схема электрической цепи | Уравнения | Критериальное уравнение и критерии | Дополнительные замечания |
|---|---|---|---|---|
| 2 |  | $u = Ri + L_0\frac{d\mu i}{dt}$ | $\frac{u}{Ri} = f\left(\frac{L}{Rt},\ \mu_*\right)$; $\Pi_1 = \frac{u}{Ri} = \text{idem}$; $\Pi_2 = \frac{L}{Rt} = \text{idem}$; $\Pi_3 = \mu_* = \text{idem}$ | Для данной цепи с нелинейным параметром дополнительно к п. 1 необходимо выполнить условие равенства относительных характеристик нелинейного параметра в модели и оригинале<br>$\mu_* = \frac{\mu}{\mu_{\max}} = \varphi\left(\frac{H}{H_{\max}}\right) = \text{idem}$ |
| 3 |  | $u = Ri + \frac{1}{C}\int idt$ | $\frac{u}{Ri} = f\left(\frac{RC}{t}\right)$; $\Pi_1 = \frac{u}{Ri} = \text{idem}$; $\Pi_2 = \frac{RC}{t} = \text{idem}$ | Определяющий критерий $\Pi_2 = \frac{RC}{t} = \frac{T_C}{t} = \text{idem}$. При выборе масштаба времени согласно соотношению $m_t = \frac{t}{t^{\text{м}}} = \frac{T_C}{T_C^{\text{м}}}$ процесс оказывается автомодельным<br>Критерий $\Pi_1$ позволяет установить масштаб тока аналогично п. 1<br>Подобие начальных условий обеспечивается аналогично тому, как указано в п. 1 |

*Продолжение табл. 1.2.1*

| № п/п | Схема электрической цепи | Уравнения | Критериальное уравнение и критерии | Дополнительные замечания |
|---|---|---|---|---|
| 4 |  | $u = Ri + L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int idt$ | $\frac{u}{Ri} = f\left(\frac{L}{Rt}, \frac{RC}{t}\right)$; $\Pi_1 = \frac{u}{Ri} = \text{idem}$; $\Pi_2 = \frac{L}{Rt} = \text{idem}$; $\Pi_3 = \frac{RC}{t} = \text{idem}$ | Определяющие критерии $\Pi_2 = \frac{L}{Rt} = \frac{T_L}{t} = \text{idem}$ и $\Pi_3 = \frac{RC}{t} = \frac{T_C}{t} = \text{idem}$. Критерий $\Pi_1$ служит для определения масштаба тока<br>Начальные условия обеспечиваются согласно пп. 1 и 2. В отличие от пп. 1 и 2 при изменении масштаба времени критерии $\Pi_2$ и $\Pi_3$ могут оказаться одинаковыми в модели и оригинале лишь при соблюдении $\frac{L}{C} = \frac{L^{\text{м}}}{C^{\text{м}}}$, т. е. процесс не является автомодельным |
| 5 |  | $u = R_1 i_1 + L_1 \times \frac{di_1}{dt} + M_{12}\frac{di_2}{dt}$; $0 = R_2 i_2 + L_2 \times \frac{di_2}{dt} - M_{12}\frac{di_1}{dt}$ | $\frac{u}{R_1 i_1} = f\left(\frac{L_1}{R_1 t}, \frac{L_2}{R_2 t}, \frac{M_{12}}{R_1 t}, \frac{M_{12}}{R_2 t}\right)$; $\Pi_1 = \frac{u}{R_1 i_1} = \text{idem}$; $\Pi_2 = \frac{L_1}{R_1 t} = \text{idem}$; $\Pi_3 = \frac{L_2}{R_2 t} = \text{idem}$; $\Pi_4 = \frac{M_{12}}{R_1 t} = \text{idem}$; $\Pi_5 = \frac{M_{12}}{R_2 t} = \text{idem}$ | Определяющими критериями являются $\Pi_2$—$\Pi_5$. Масштабы тока определяются из условий $\frac{u}{R_1 i_1} = \frac{i_{1\infty}}{i_1} = \text{idem}$ и $\frac{i_1}{i_2} = \text{idem}$<br>При различных масштабах тока в первой и второй ветвях, определяемых соотношением $\left(\frac{m_{i1}}{m_{i2}}\right)^{\text{м}} = \left(\frac{M_{12}}{L_1}\right)^{\text{м}}\left(\frac{L_1}{M_{12}}\right)$, критерии $\Pi_4$ и $\Pi_5$ объединяются в один $\Pi_4' = \frac{M_{12}^2}{L_1 L_2} = \text{idem}$<br>Начальные условия обеспечиваются аналогично тому, как указано в пп. 1—4 |

*Продолжение табл. 1.2.1*

| № п/п | Схема электрической цепи | Уравнения | Критериальное уравнение и критерии | Дополнительные замечания |
|---|---|---|---|---|
| 6 | Разветвленные электрические цепи, состоящие из ряда контуров с сосредоточенными параметрами $R_n$, $L_n$, $C_n$, $M_{nm}$ | См. пп. 1—5 | $\Pi_1 = \frac{L_n}{R_n t} = \text{idem}$; $\Pi_2 = \frac{C_n R_n}{t} = \text{idem}$; $\Pi_3 = \frac{M_{nm}^2}{L_n L_m} = \text{idem}$<br>(индексы $n$ и $m$ относятся к наименованию контуров) | Подобные цепи должны обязательно иметь одинаковое соединение сходственных элементов<br>Начальные условия обеспечиваются в соответствии с тем, как указано в пп. 1—5. Кроме того, должно быть одинаковым соотношение между приложенными напряжениями в модели и оригинале<br>Если часть разветвленной цепи заменяется эквивалентной, то должны быть соблюдены условия на границах этой части цепи |
| 7 | Разветвленные электрические цепи, состоящие из ряда контуров с сосредоточенными параметрами $R_n$, $L_n$, $C_n$ и $M_{nm}$, питаемые синусоидальными ЭДС | Дополнительно к уравнениям, приведенным в пп. 1—6, $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$ | $\Pi_1 = \frac{\omega L_n}{R_n} = \frac{X_{L_n}}{R_n} = \text{idem}$; $\Pi_2 = \omega C_n R_n = \frac{R_n}{X_{C_n}} = \text{idem}$; $\Pi_3 = \frac{\omega^2 M_{nm}^2}{\omega^2 L_n L_m} = \frac{X_{nm}^2}{X_{L_n} X_{L_m}} = \text{idem}$ | К выведенным выше критериям добавляется критерий гомохронности $\omega t = \text{idem}$<br>При изменении масштаба времени для осуществления равенства ранее выведенных критериев подобия необходимо соответственно изменять и частоту приложенного напряжения, иначе свободные составляющие процесса будут протекать со скоростью, не согласованной с вынужденными процессами |

*Продолжение табл. 1.2.1*

| № п/п | Схема электрической цепи | Уравнения | Критериальное уравнение и критерии | Дополнительные замечания |
|---|---|---|---|---|
| 8 |  | $u_n = i_n R_n + \frac{d}{dt}\sum_{m=1}^{m} M_{nm} i_m;$<br>$J\frac{d^2\gamma}{dt^2} = M_э + M_м$ | $\Pi_1 = \frac{u_n}{R_n i_n} = \text{idem};$<br>$\Pi_2 = \frac{L_n}{R_n t} = \text{idem};$<br>$n = 1, 2, 3;$<br>$\Pi_3 = \frac{M_{nm}}{R_n t} = \text{idem};$<br>$m = 1, 2, 3;$<br>$\Pi_4 = \frac{T_J}{t} = \text{idem}$ | Определяющими критериями являются $\Pi_2$ и $\Pi_3$, обусловливающие относительную скорость протекания электромагнитных процессов, и критерий $\Pi_4$, обусловливающий относительную механическую скорость<br>Дополнительными условиями являются одинаковое соотношение приложенных напряжений, подобие начальных и граничных условий, равенство относительных характеристик $M_{nm*} = f(i)$, $L_{n*} = f(i)$ и условия гомохронности $\omega t = \text{idem}$ в случае приложения напряжений, изменяющихся по периодическому закону |



и нелинейным электрическим цепям, а также к цепям с сосредоточенными динамическими параметрами (электрические машины).

В табл. 1.2.1 приведены критерии основных разновидностей электрических цепей и необходимые пояснения к ним [10].

## § 1.2.4. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ СЭЭС И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ

Современные электродинамические модели СЭЭС базируются на требованиях неполного подобия, поскольку основным назначением ЭДМ СЭЭС является изучение режимов систем, т. е. процессов во времени. Для моделирования СЭЭС необходимо иметь в виду типовую схему СЭЭС и дифференциальные уравнения элементов и системы в целом [9].

Критерии подобия электрических машин СЭЭС являются частными случаями критериев электродинамической системы (см. табл. 1.2.1).

*Для синхронной машины* определяющими критериями являются

$$\left.\begin{aligned} &\frac{X_s}{X_{ad}};\ \frac{X_{aq}}{X_{ad}};\ \frac{R}{X_{ad}};\ \frac{X_{fs}}{X_{ad}};\ \frac{R_f}{X_{ad}};\\ &\frac{X_{rds}}{X_{ad}};\ \frac{R_{rd}}{X_{ad}};\ \frac{X_{rqs}}{X_{ad}};\ \frac{R_{rq}}{X_{ad}};\ \frac{\omega^2 J}{M}. \end{aligned}\right\} \qquad (1.2.4)$$

Если параметры машины измерять в относительных единицах, то вместо критериев (1.2.4) можно соблюдать равенство параметров машины $r$, $r_s$, $x_{ad}$, $x'_d$ и т. д., т. е. равенство инвариантов подобия для модели и оригинала. Это положение широко используется при практическом моделировании СЭЭС.

Дополнительными критериями являются идентичность характеристик холостого хода, частотных характеристик контуров машины в интересующем нас диапазоне частот и тождественность относительных потерь модели и оригинала.

При соблюдении указанных критериев подобие переходного процесса будет обеспечено, если выполнить подобие начальных и граничных условий. При этом граничные условия включают в себя: подобие механического момента, приложенного к валу машины; подобие приложенного напряжения к цепи возбуждения (с учетом автоматического регулирования возбуждения); подобие внешних цепей; подобие возмущения, вызывающего переходный процесс.

*Для асинхронной машины* критерии подобия можно рассматривать как частный случай синхронной машины. Определяющими критериями являются

$$\frac{X_{s1}}{X_a};\ \frac{R_1}{X_a};\ \frac{X_{s2}}{X_a};\ \frac{R_2}{X_a};\ \frac{\omega^2 J}{M}. \qquad (1.2.5)$$

Критерии (1.2.5) справедливы и для трансформатора (отсутствует критерий $\frac{\omega^2 J}{M}$).

При моделировании асинхронной машины и трансформатора особого внимания требует соблюдение равенства относительных характеристик холостого хода (х. х. х.) и частотных характеристик модели и оригинала.

Для обеспечения подобия *систем прямого компаундирования* синхронного генератора необходимо соблюсти критерии (1.2.5) для трансформаторов тока и напряжения, критерий подобия $\frac{X_н}{R_н}$ для балластного сопротивления, а также критерии подобия для цепи выпрямленного тока $\frac{R_f}{X_f}$ и $\frac{R_в}{X_f}$.

Во всех случаях должны выполняться начальные и граничные условия.

Электродинамическая модель СЭЭС создается на базе универсальных модельных машин и других элементов с так называемыми переменными параметрами [9, 10].

Изменение параметров модельного синхронного генератора осуществляется с помощью конструктивных особенностей моделей (сменные роторы, переключение секций статорной обмотки, добавочные индуктивные сопротивления $\Delta x_s$ и активные сопротивления $\Delta r$ в цепи статора, сменные успокоительные контуры, добавочное активное сопротивление в цепи возбуждения и компенсация его с помощью коллекторной машины, добавочные инерционные диски и специальная компенсация инерционной постоянной). Для примера на рис. 1.2.1 показаны зависимости индуктивных сопротивлений от изменения воздушного зазора для одного из модельных генераторов.

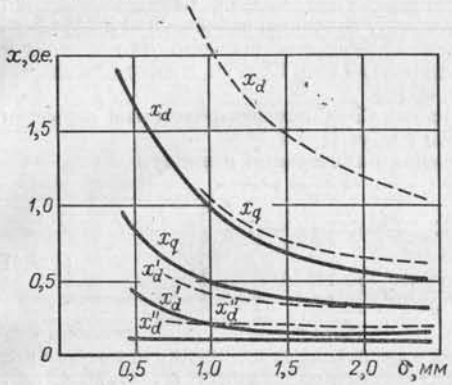



Рис. 1.2.1. Индуктивные сопротивления модельного генератора типа МГ15-1000 при различных зазорах δ.

——— без переключения числа витков статора; — — — с переключением числа витков статора и сохранением неизменными $U_{ном}$ и $S_{ном}$.

Моделирование системы прямого компаундирования осуществляется с помощью универсальной модели, включающей три однофазных трансформатора напряжения, три однофазных трансформатора тока и три однофазных дросселя насыщения. Все эти элементы секционированы, что дает возможность получить необходимые зависимости $i_f = f(u_f)$ на входе и выходе системы возбуждения. Коррекция напряжения обеспечивается с помощью управляемого подмагничивания универсальных дросселей насыщения модели.

Моделирование соединительных линий СЭЭС сводится к соблюдению критерия $\frac{X_л}{R_л}$ и граничных условий для отдельных участков сети, а также к введению в сеть соответствующих аппаратов: автоматов и контакторов. Эти требования выполняются с помощью набора концов кабелей различных сечений и длин и серийных коммутационных аппаратов при соответствующей настройке расцепителей (реле) и устройств выдержки времени.

Моделирование нагрузки — наиболее сложная задача. Оно выполняется дифференцированно: эквивалентные электроприводы моделируются с учетом выполнения критериев (1.2.5) машинами серийного производства, в которые введено устройство для изменения инерционной постоянной. Моменты сопротивления создаются в соответствии со статическими характеристиками оригинала. Исследуемый электропривод (особо нас интересующий) моделируется с учетом неполного подобия, для чего разрабатывается специальный электродвигатель — модель согласно критериям (1.2.5) и дополнительным условиям, учитывающим влияние насыщения и частоты на параметры машины, а в качестве исполнительного механизма используется натурный образец. В этом случае воспроизводятся динамические характеристики в целом по агрегату.

Статическая нагрузка (осветительная) моделируется ламповыми реостатами. Наконец, моделирование специальной нагрузки осуществляется путем создания соответствующей модели.

Моделирование первичных двигателей в СЭЭС сводится к соблюдению граничных условий на валах генераторов, т. е. к воспроизведению динамических и статических характеристик момента в функции угловой скорости $M_{мех} = f(\omega)$. Это означает, что на модели внутренние процессы, происходящие в двигателе-оригинале, не воспроизводятся. Динамика процесса считается воспроизведенной, если подобны статические характеристики $M_{мех} = f(\omega)$, системы регулирования скорости и одинаковы инерционные постоянные агрегатов. Это позволяет в качестве первичного двигателя использовать электродвигатель постоянного тока, у которого для воспроизведения естественной характеристики оригинала вводится в цепь якоря соответствующее омическое сопротивление и дополнительный источник напряжения. Регулятор скорости моделируется на АВМ. В ряде случаев используется натурный регулятор скорости.

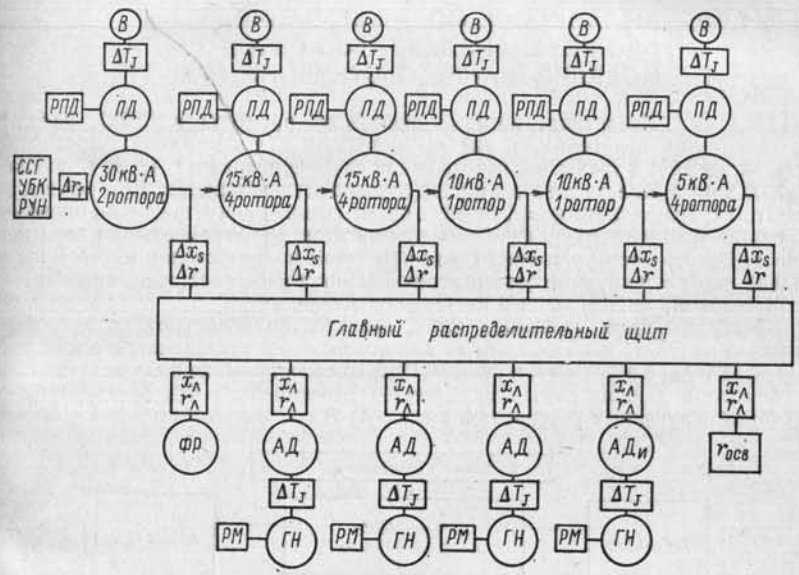



Рис. 1.2.2. Блок-схема электродинамической модели СЭЭС.

*В, ПД, РПД, ССГ, УБК, РУН, ФР, АД, АД$_и$, РМ, ГН* — соответственно возбудитель, первичный двигатель, регулятор первичного двигателя, система прямого компаундирования генератора, система управляемого быстродействующего компаундирования, угольный регулятор напряжения, фазорегулятор, эквивалентный асинхронный двигатель, исследуемый асинхронный двигатель, регулятор момента, генератор нагрузки; $\Delta T_J$, $\Delta r_f$, $\Delta x_s$, $\Delta r$, $x_л$, $r_л$, $r_{осв}$ — соответственно средства изменения инерционной постоянной агрегата, омического сопротивления цепи возбуждения, индуктивного сопротивления рассеяния генератора, активного сопротивления генератора, индуктивное и активное сопротивления линии, сопротивление осветительной нагрузки.

Моделирование судовых электроэнергетических систем требует «набора» на электродинамической модели в определенном масштабе параметров всех элементов, которые входят в систему-оригинал при соблюдении граничных условий. Практически такая задача сводится к моделированию одной электростанции с ее потребителями. Последние в определенной степени эквивалентируются.

Расчет параметров модели системы начинается с использования возможностей средств независимого моделирования группы параметров (элементы-модели различной мощности, сменные роторы машин-моделей и т. д.) и средств зависимого моделирования (изменение базисной мощности, изменение масштаба времени и т. д.) с последующим применением средств независимого моделирования отдельных параметров (компенсатор инерционной постоянной, дополнительные

сопротивления $\Delta r$, $\Delta r_f$ и т. д.). При расчете используется метод последовательных приближений.

В результате расчета может быть получено несколько вариантов моделей системы. Из них выбирается тот, который обеспечивает наименьшие ошибки моделирования по группе параметров, играющих наиболее важную роль в исследуемых процессах, при допущении неточности моделирования остальных характеристик не выше $\pm(10—15)\%$.

Блок-схема ЭДМ СЭЭС с указанием основных элементов системы и их некоторых данных представлена на рис. 1.2.2.

## § 1.2.5. АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. БЛОК-СХЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ СЭЭС. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ НА ЭАМ

Уравнения, которые описывают процессы в СЭЭС, являются обыкновенными нелинейными дифференциальными уравнениями. Воспроизведение их на ЭАМ в трехосной неподвижной системе координат $A$, $B$, $C$ довольно сложно, хотя в последнее время в ряде случаев осуществляется. При реализации каждого периодического коэффициента кроме специального тригонометрического устройства требуется еще и функциональный блок для перемножения двух переменных. Вместе с тем уравнения связи при таком моделировании имеют простейший вид, и регистрируемые фазные величины могут непосредственно сравниваться с переменными, записанными в системе-оригинале.

Преобразованные уравнения СЭЭС значительно облегчают моделирование процессов на ЭАМ, так как требуют воспроизведения тригонометрических коэффициентов только в уравнениях связи. Однако сопоставление ряда величин с экспериментом в данном случае оказывается невозможным без предварительной обработки полученных результатов в осях $A$, $B$, $C$.

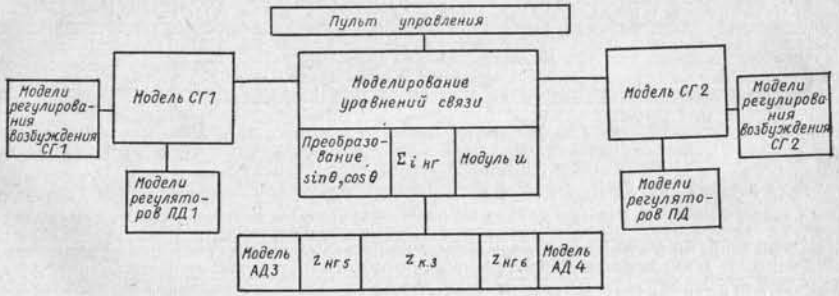



Рис. 1.2.3. Блок-схема ЭАМ.

Аналоговое моделирование процессов СЭЭС может осуществляться двумя методами. При первом методе указанные выше уравнения приводятся с помощью уравнений связи к нормальному виду. В противном случае блок-схема модели СЭЭС будет иметь даже для простейших процессов безынерционные контуры (без блоков интегрирования) и результаты моделирования окажутся искаженными. Вместе с тем указанное преобразование приводит к слишком сложным коэффициентам перед переменными, неудобным при варьировании параметров. Кроме того, уравнения и блок-схемы теряют принадлежность к той или иной машине или элементу СЭЭС и выступают как уравнения системы в целом. Поэтому этот метод моделирования называется бесструктурным.

При втором методе, называемом структурным моделированием, элементы СЭЭС (генераторы, асинхронные двигатели и т. д.) представляются отдельными совокупностями решающих блоков, а блоки, воспроизводящие уравнения связи, выделяются в обособленные секции преобразующих устройств. При этом используются отработанные однотипные блок-схемы основных элементов СЭЭС — синхронных и асинхронных машин, благодаря чему упрощается разработка общей блок-схемы исследуемой системы для каждой конкретной задачи, обеспечивается удобство набора и проверки в работе как каждого решающего устройства, так и совокупностей, представляющих отдельные элементы СЭЭС.



На данном принципе в последнее время создаются специализированные аналоговые модели (Сп.АМ) СЭЭС. Общая схема такой ЭАМ представлена на рис. 1.2.3.

Удачное построение работоспособных блок-схем математических моделей машин переменного тока может быть выполнено на основе использования уравнений машин с переменными $\psi$, где, в свою очередь, потокосцепления записываются в виде алгебраических уравнений, разрешенных относительно токов и ЭДС. В таких схемах каждый из взаимосвязанных замкнутых контуров содержит инерционные блоки, что обеспечивает устойчивую работу модели. Недостатком данного способа составления схемы математической модели является трудоемкость расчета коэффициентов при наличии на оси более двух контуров. Указанный недостаток устраняется при определении потокосцеплений с помощью внутренних ЭДС машины, вычисляемых по формулам

$$\left.\begin{aligned} e_{id} &= \psi_d + x_s i_d = e_{af} - x_{ad} i_d + e_{rd}; \\ e_{iq} &= \psi_q - x_s i_q = x_{aq} i_q + e_{rq}. \end{aligned}\right\} \qquad (1.2.6)$$

Тогда уравнения синхронной машины, приведенные к нормальному виду, записываются так:

$$\left.\begin{aligned} p\psi_d &= -\frac{r}{x_s}\psi_d - (1+s)\psi_q + \frac{r}{x_s} e_{id} + u_d; \\ p\psi_q &= -\frac{r}{x_s}\psi_q + (1+s)\psi_d + \frac{r}{x_s} e_{iq} - u_q; \\ p\psi_f &= \frac{1}{T_{d0}} u_f - \frac{x_f}{T_{d0} x_{fs}}\psi_f + \frac{x_{ad}}{T_{d0} x_{fs}} e_{id}; \\ p\psi_{rd} &= -\frac{x_{rd}}{T_{rd} x_{rs}}\psi_{rd} + \frac{x_{ad}}{T_{rd} x_{rds}} e_{id}; \\ p\psi_{rq} &= -\frac{x_{rq}}{T_{rq} x_{rqs}}\psi_{rq} + \frac{x_{aq}}{T_{rq} x_{rqs}} e_{iq}; \\ ps &= \frac{1}{T_J} M_{\text{мех}} - \frac{1}{T_J x_s}(\psi_d e_{id} - \psi_d e_{iq}), \end{aligned}\right\} \qquad (1.2.7)$$

где для устранения образования в схеме модели безынерционных замкнутых контуров с положительной обратной связью, ведущих к неустойчивой работе модели, внутренние ЭДС также выражаются через потокосцепления

$$\left.\begin{aligned} e_{id} &= \frac{1}{\alpha}\left(\frac{x_{ad}}{x_s}\psi_d + \frac{x_f}{x_{fs}}\psi_f + \frac{x_{rd}}{x_{rds}}\psi_{rd}\right); \\ e_{iq} &= \frac{1}{\beta}\left(\frac{x_{aq}}{x_s}\psi_q + \frac{x_{rq}}{x_{rqs}}\psi_{rq}\right); \\ \alpha &= 1 + x_{ad}\left(\frac{1}{x_s} + \frac{1}{x_{fs}} + \frac{1}{x_{rds}}\right); \\ \beta &= 1 + x_{aq}\left(\frac{1}{x_s} + \frac{1}{x_{rqs}}\right). \end{aligned}\right\} \qquad (1.2.8)$$

Уравнения (1.2.7) и (1.2.8) позволяют построить работоспособную рациональную математическую модель синхронной машины, блок-схема которой представлена на рис. 1.2.4, *а*, где коэффициенты имеют следующие выражения:

$$
\left.
\begin{gathered}
a_1 = a_3 = b_1 = b_3 = \frac{r}{x_s}; \quad a_2 = b_2 = 1 + s; \\
a_4 = b_4 = 1{,}0; \; a_5 = \frac{x_f}{T_{d0} x_{fs}}; \quad a_6 = \frac{x_{ad}}{T_{d0} x_{fs}}; \\
a_7 = \frac{1}{T_{d0}}; \quad a_8 = \frac{x_{ad}}{T_{rd} x_{rds}}; \\
a_9 = \frac{x_{rd}}{T_{rd} x_{rds}}; \quad a_{10} = \frac{x_{ad}}{\alpha x_s}; \quad a_{11} = \frac{x_f}{\alpha x_{fs}}; \\
a_{12} = \frac{x_{rd}}{\alpha x_{rds}}; \quad a_{13} = \frac{1}{\alpha}; \quad a_{14} = a_{15} = b_9 = b_{10} = \frac{1}{x_s}; \\
a_{16} = \frac{x_{ad}}{x_{fs}}; \quad a_{17} = \frac{x_f}{x_{fs}}; \quad b_5 = \frac{x_{aq}}{T_{rq} x_{rqs}}; \\
b_6 = \frac{x_{rq}}{T_{rq} x_{rqs}}; \quad b_7 = \frac{x_{aq}}{\beta x_s}; \quad b_8 = \frac{x_{rq}}{\beta x_{rqs}}; \\
c_1 = c_2 = \frac{1}{T_J x_s}; \quad c_3 = \frac{1}{T_J}.
\end{gathered}
\right\} \qquad (1.2.9)
$$

Данная схема удобна и при учете насыщения магнитопроводов по Гореву [9].

Используя аналогичный принцип и уравнения для асинхронной машины, блок-схему модели можно получить в представленном на рис. 1.2.4, *б* виде, где коэффициенты имеют следующие выражения:

$$
\left.
\begin{gathered}
a_1 = a_2 = b_1 = b_2 = \frac{10 x_r r}{x'}; \quad b_4 = a_4 = 10; \\
a_3 = a_5 = b_3 = b_5 = 10; \; a_6 = b_6 = \frac{10 x x_r}{T_r x'}; \\
a_7 = b_7 = \frac{10 x_a^2}{T_r x'}; \quad a_8 = b_8 = 10; \\
a_9 = b_9 = \frac{10}{T_r}; \quad a_{10} = a_{11} = b_{10} = b_{11} = \frac{x_r}{x'}; \\
c_1 = c_2 = \frac{10 x_r}{x' T_J}; \quad c_3 = \frac{10}{T_J}; \quad c_4 = 1{,}0.
\end{gathered}
\right\} \qquad (1.2.10)
$$

Структурное моделирование судовой электроэнергетической системы на ЭАМ осуществляется путем соединения математических моделей элементов системы в единое целое. При этом должны быть обеспечены два условия: согласование координат и согласование входов элементов.

Согласование координат при использовании преобразованных уравнений обеспечивается в уравнениях связи [9].

Согласование входов — задача, вызванная использованием структурного моделирования. Она наиболее удачно могла быть решена при наличии блоков интегрирования и дифференцирования. Однако блоки дифференцирования, как известно, в АВМ не используются, и поэтому для согласования входов приходится прибегать к одному из четырех специальных методов определения составляющих $u_d$ и $u_q$ статорной цепи.



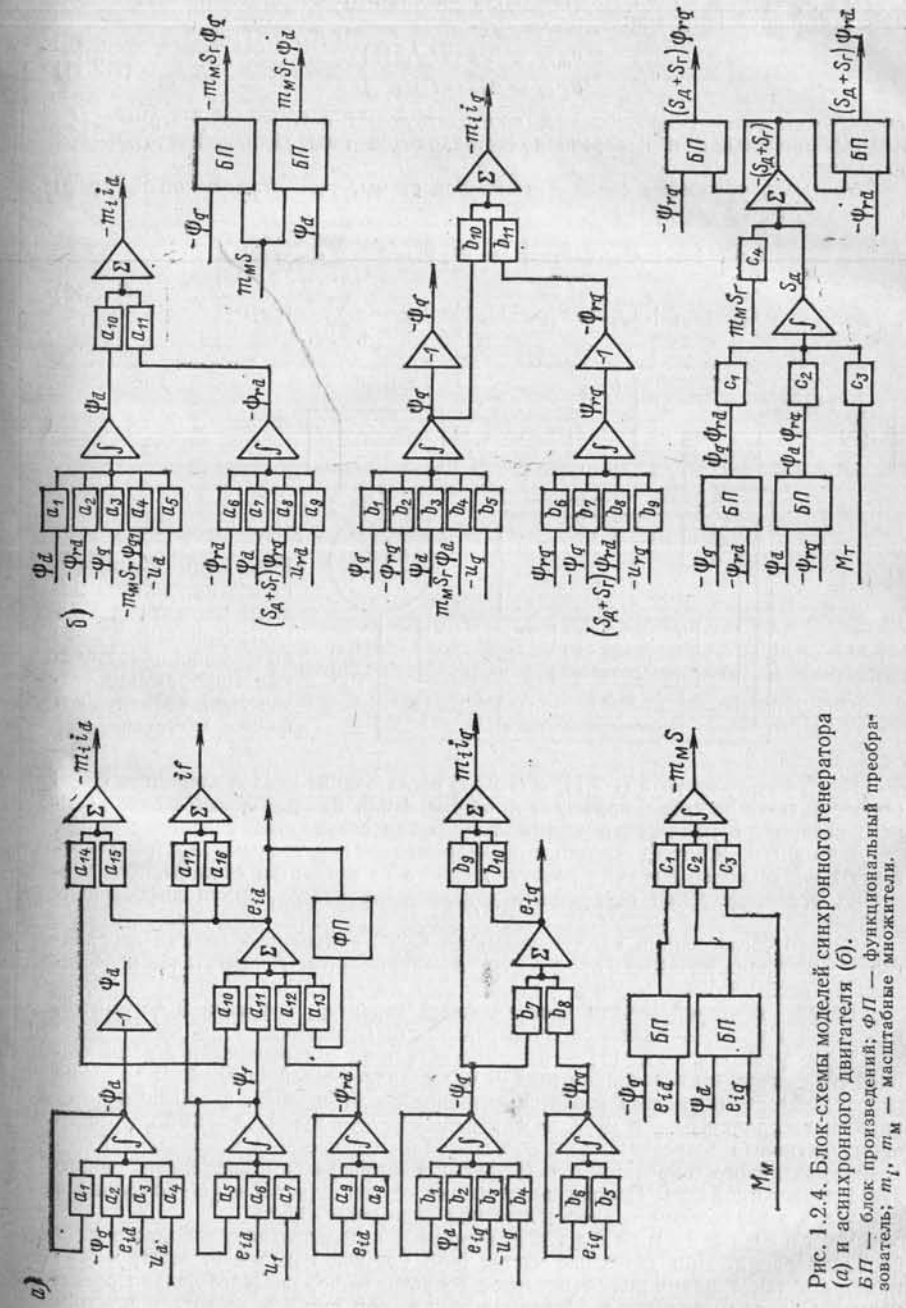



Рис. 1.2.4. Блок-схемы моделей синхронного генератора (*а*) и асинхронного двигателя (*б*).
*БП* — блок произведений; *ФП* — функциональный преобразователь; $m_i$, $m_м$ — масштабные множители.

Первый метод основывается на определении составляющих напряжения активной нагрузки:

$$\left.\begin{aligned} u_{d\,\text{нг}} &= u_{d3} = r_3 i_{d3}; \\ u_{q\,\text{нг}} &= u_{q3} = r_3 i_{q3}, \end{aligned}\right\} \qquad (1.2.11)$$

где $r_3$ — активное сопротивление, соответствующее статической нагрузке; $i_{d3}$ и $i_{q3}$ — продольная и поперечная составляющие тока активной статической нагрузки.

Учитывая уравнения связи для типовой схемы, токи статической нагрузки определяются по формулам

$$\left.\begin{aligned} i_{d3} &= i_{d1} + i_{d2}\cos\theta_{12} + i_{q2}\sin\theta_{12} - \sum_{4,\,5,\,\ldots} i_{d\,\text{нг}}; \\ i_{q3} &= i_{q1} + i_{q2}\cos\theta_{12} - i_{d2}\sin\theta_{12} - \sum_{4,\,5,\,\ldots} i_{q\,\text{нг}}. \end{aligned}\right\} \qquad (1.2.12)$$

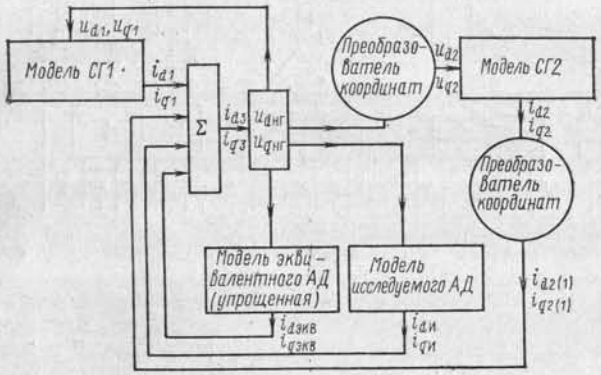



Рис. 1.2.5. Схема согласования входов моделей элементов СЭЭС, построенная на основе вычисления составляющих напряжения статической активной нагрузки системы.

При учете уравнений (1.2.11) и (1.2.12) согласование входов элементов СЭЭС осуществляется по схеме, приведенной на рис. 1.2.5. Данный способ можно рекомендовать, если статическая активная нагрузка соизмерима с эквивалентной.

Второй метод связан с пренебрежением переходными электромагнитными процессами во внешних контурах одного из элементов системы. Это позволяет непосредственно осуществить согласование входов, минуя дифференцирование.

Случай согласования входов элементов СЭЭС при пренебрежении переходными электромагнитными процессами в эквивалентном двигателе представлен на рис. 1.2.6.

Первый и второй методы носят частный характер, а третий и четвертый, изложенные ниже, — являются универсальными методами.

Третий метод [9] — введение активного сопротивления с компенсацией его фиктивным источником тока — представляет собой дальнейшее развитие первого метода. В систему вводятся активное сопротивление, с помощью которого определяются $u_{d\,\text{нг}}$ и $u_{q\,\text{нг}}$, и фиктивный источник тока, равный потребляемому активным сопротивлением. Это позволяет осуществить компенсацию введенного активного сопротивления. Источник тока вводится в виде инерционного звена первого порядка. Полная компенсация осуществляется в установившемся режиме, а в переходном — вносится та или иная погрешность.

Четвертый метод [9] сводится к использованию неполного дифференцирования. При диапазоне частот 0—3 Гц, как показывает опыт, можно подобрать такое минимальное активное сопротивление, последовательно соединенное с блоком «чистого» дифференцирования, при котором достигается устойчивая работа решающего элемента.



Сочетание интегрирующих и дифференцирующих элементов обеспечивает наибольшую универсальность в согласовании входов элементов ЭАМ СЭЭС. Здесь отсутствуют искусственные приемы составления схемы, однако при исследовании к. з., близкого к глухому, имеют место значительные погрешности в вычислениях.

В основе специализированных ЭАМ СЭЭС, т. е. специально созданных электронных аналоговых моделей для обеспечения быстрой подготовки и решения

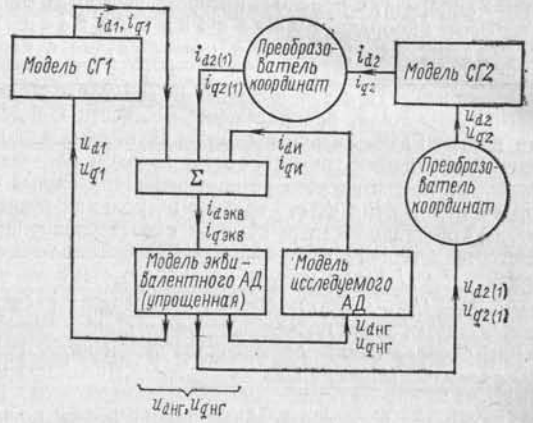



Рис. 1.2.6. Схема согласования входов моделей элементов СЭЭС, построенная на основе пренебрежения переходными электромагнитными процессами в статоре эквивалентного асинхронного двигателя.

задач исследования процессов в СЭЭС, лежат следующие положения [9]: структурное моделирование; полные преобразованные уравнения в осях $d$, $q$ с приведением системы координат всей нагрузки к осям $d$, $q$ одного из генераторов; блок-схемы синхронных генераторов и асинхронных двигателей в соответствии с рис. 1.2.4; согласование входов моделей с помощью метода неполного дифференцирования.

## § 1.2.6. ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ В СЭЭС

Целесообразность применения цифрового моделирования существенно зависит от рациональности и экономичности алгоритма. Это учитывается не только при реализации алгоритма, т. е. при разработке программы, но и в самом процессе создания алгоритма.

Используемые уравнения должны быть так преобразованы, чтобы было меньше периодических коэффициентов и нелинейностей; коэффициенты преобразованных к нормальному виду дифференциальных уравнений должны, по возможности, иметь простой и однотипный вид; метод численного интегрирования должен быть рациональным и т. д. Изучение особенностей математического описания и конкретных задач расчета процессов в СЭЭС, а также уровень развития вычислительной техники позволяют сформулировать общие и частные принципы алгоритмизации процессов в СЭЭС и характеризовать основные черты алгоритмов и программ расчета процессов.

*Общие принципы* сводятся к следующему:

а) целесообразно иметь как полные алгоритмы и программы, так и приближенные. Последние могут строиться на значительных допущениях, но должны быть достоверными в определенной ограниченной области применения;

б) применение частных алгоритмов (установившийся режим, т. к. з., изменение напряжения и т. д.) необходимо для расчета простых пере-

ходов, а общих алгоритмов — для сложных переходов, когда происходит изменение состава и структуры системы;

в) желательно иметь как исследовательские, так и рабочие алгоритмы и программы.

*Частные принципы алгоритмизации* связаны с наличием трех групп процессов: установившегося режима, переходных процессов при малом возмущении (устойчивость в малом) и переходных процессов при большом возмущении. Особенности алгоритмизации этих процессов существенно зависят от математического аппарата, с помощью которого решаются соответствующие задачи.

Расчет координат установившегося режима связан с решением алгебраических уравнений в общем случае с комплексными коэффициентами. При учете насыщения машин некоторые коэффициенты уравнений оказываются нелинейными. Полагая заданными параметры системы, активную мощность каждого потребителя, распределение мощности между генераторами и напряжение на шинах ГРЩ, задачу определения полных мощностей потребителей и напряжений в узловых точках решают методом последовательных приближений. Частный алгоритм расчета установившегося режима СЭЭС, построенный на основе уравнений в осях $d$, $q$, требует нескольких десятков итераций. Алгоритм расчета установившегося режима на основе уравнений в комплексном виде требует всего трех-четырех итераций [9]. Вещественная ось предполагается совпадающей с вектором $U$ ГРЩ, модуль которого в стационарном режиме принимается равным $\dot{U} = U = 1$. Это позволяет производить расчет как бы в три этапа: на первом этапе методом последовательных приближений рассчитываются координаты цепи распределения от фидера ГРЩ и ниже [9], на втором — вычисляются координаты асинхронных двигателей, подключенных к ГРЩ, и, наконец, на третьем — определяются нагрузки генераторов. При этом на двух последних этапах метод последовательных приближений не требуется.

Принципиально можно обойтись без частного алгоритма и программы расчета установившегося режима, использовав, например, алгоритм расчета устойчивости нагрузки. Однако в этом случае машинное время резко возрастает. Так, расчет по частной программе на БЭСМ-2 требует всего 20—30 с, а с помощью расчета пуска всех двигателей — 15—20 мин. Алгоритм реализуется и на статической модели. Установка режима требует 25—30 мин.

Расчет процесса в СЭЭС при малом возмущении сводится к оценке устойчивости в малом (статической устойчивости) по одному из проверенных критериев. В качестве исходных уравнений удобно использовать линеаризованные уравнения [9], которые благодаря принятой системе координат учитывают лишь относительное движение элементов системы и исключают все переносные движения. Расчет ведется без приведения уравнений к нормальному виду, так как матрица в этом случае оказывается более простой.

В качестве критерия используется критерий Рауса, поскольку он обеспечивает получение последовательности простых арифметических операций, одинаковых для характеристических уравнений любого порядка.

Переходные процессы при большом возмущении в системе включают следующие переходы: токи короткого замыкания (т. к. з.); устойчивость нагрузки и изменение напряжения в сети; устойчивость параллельной работы и синхронизацию генераторов; устойчивость системы; сложные переходы — различное сочетание простых переходов.

Возможные пути осуществления цифрового моделирования процессов при резких возмущениях указаны на рис. 1.2.7.

Основные положения линейного преобразования координат элементов СЭЭС, теория уравнений связи, а также накопленный опыт алгоритмизации процессов в СЭЭС позволяют сформулировать принципы алгоритмизации процессов при больших возмущениях [9].

1. Алгоритмы переходных процессов целесообразно строить на основе преобразованных дифференциальных уравнений в осях $d_i$, $q_i$, 0. Уравнения синхронных машин записываются в осях $d$, $q$, 0, жестко связанных с роторами соответствующих генераторов. Уравнения асинхронных двигателей и статической нагрузки представляются либо в осях одного из генера-






Рис. 1.2.7. Классификация цифрового моделирования процессов.

торов, либо в синхронно вращающихся осях $d_s$, $q_s$, 0, либо в неподвижных осях $d_0$, $q_0$, 0. Целесообразность их выбора зависит от схемы системы и задач расчета. Элемент, который является причиной несимметрии или несинусоидальности, записывается в неподвижных осях $d_0$, $q_0$, 0 ($\alpha$, $\beta$, 0). Уравнения в осях $A$, $B$, $C$ используются в исключительных случаях: для отдельных электромашинных элементов с несимметрией на роторе и статоре или для всей системы, когда в ходе расчета сложного процесса причиной несимметрии или несинусоидальности может оказаться любой (любые) элемент системы.

Алгоритмы, построенные на базе преобразованных уравнений, более экономичны. Для обеспечения необходимой точности следует использовать, как правило, полные преобразованные уравнения с учетом (при необходимости) влияния насыщения и изменения частоты.

2. Важнейшим принципом алгоритмизации процессов в СЭЭС является структурное цифровое моделирование. Различают полное и неполное структурное и бесструктурное моделирование. Основным принципом полного структурного моделирования является независимость уравнений элементов, когда в уравнениях каждого элемента отсутствуют переменные других элементов системы, а все преобразования координат сосредоточены в уравнениях связи. Необходимым условием такого моделирования является поэлементное приведение уравнений к нормальному виду и запись уравнений соединительных линий первичной цепи в осях $d_s$, $q_s$, 0 или $d_0$, $q_0$, 0. При неполном структурном моделировании возможна определенная зависимость уравнений элементов системы, например, когда первичная цепь и нагрузка записываются в осях одного из генераторов. Наконец, при бесструктурном моделировании все дифференциальные уравнения системы с использованием уравнения связи приводятся к нормальному виду, теряя при этом принадлежность к тому или иному элементу и выступая как уравнения системы в целом.

Полное структурное моделирование используется для создания частных и общих алгоритмов расчета процессов с двумя и более узловыми точками в первичной цепи. Совершенно необходимым является применение полного структурного моделирования при разработке алгоритмов расчета процессов в системах произвольной структуры с изменением ее в ходе расчета. Неполное структурное моделирование целесообразно использовать для частных и общих алгоритмов расчета процессов в системе с одной узловой точкой в первичной цепи. Такие алгоритмы оказываются наиболее экономичными. Бесструктурное моделирование для расчета процессов в СЭЭС применять нецелесообразно.

3. Уравнения связи целесообразно представлять в разрешенном относительно угловых напряжений виде для структур систем с одной узловой точкой (параллельная работа двух и более генераторов при одной ступени распределения) или с одним генератором и несколькими ступенями распределения электроэнергии. Алгоритмы, построенные на этом принципе, оказываются наиболее рациональными в отношении использования как оперативной памяти, так и машинного времени. *Для более сложных структур получить разрешенные уравнения связи относительно узловых напряжений в общем виде практически невозможно.* Выражения для узловых напряжений формируются на основе общего матричного уравнения связи $[Y][U] = [I]$ машинным способом. Уравнения связи решаются как система линейных алгебраических уравнений. Наиболее рациональным является предложенный канд. техн. наук В. И. Финагиным метод формирования и решения уравнений связи, базирующийся на разделении такта численного интегрирования. В соответствии с этим методом для определения узловых напряжений используется алгоритм расчета производных от токов или потокосцеплений в предположении $[U] = 0$. Это существенно сокращает и упрощает работу по алгоритмизации и значительно уменьшает объем вычислений при определении значений узловых напряжений. Метод открывает большие возможности для создания алгоритмов расчета процессов в сложных системах переменной и произвольной структуры.

4. Изменение структуры СЭЭС (к. з., отключение и включение отдельных элементов) в общем случае производится с помощью использования



матриц пересоединения [9]. В частном случае, в общих алгоритмах с разрешенными аналитическими уравнениями связи относительно узловых напряжений, задание к. з., разрывов, включение тех или иных элементов осуществляется путем введения значений соответствующих коэффициентов, входящих в формулы для $u_d$ и $u_q$.

5. Как правило, рациональным является представление уравнений элементов в смешанной форме (разрешены относительно производных потокосцеплений и содержат в правых частях токи), а уравнения связи — в токах. Исключение составляет запись уравнений полупроводниковых преобразователей в переменных $i$, а также всех элементов в переменных $i$ в частных алгоритмах расчета т. к. з.

6. Достаточная точность расчета обеспечивается при использовании метода численного интегрирования Рунге — Кутта или его модификаций. Как правило, *не используется* автоматический выбор шага численного интегрирования, чем разгружается оперативная память машины. При использовании ЦВМ типа БЭСМ-6 и ей подобных не исключено введение автоматического выбора шага $h$.

Перечисленные принципы алгоритмизации справедливы для частных и общих алгоритмов расчета процессов СЭЭС.

## § 1.2.7. ОБЗОР НЕКОТОРЫХ РАЗРАБОТАННЫХ И РЕАЛИЗОВАННЫХ НА ЦВМ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ В СЭЭС

Предлагаемый ниже обзор ограничивается рассмотрением лишь некоторых разработанных и реализованных на ЦВМ алгоритмов. Однако он дает информацию обо всех разновидностях алгоритмов: от простейших частных до автоматически сформированных алгоритмов расчета процессов, от упрощенных алгоритмов до алгоритмов оценки точности математических моделей и синтеза ЭСК по условию требований к качеству процесса.

Частный алгоритм расчета т. к. з., являющийся исходным для создания кривых по расчету т. к. з., разработан применительно к схеме системы с одним генератором и тремя ступенями распределения электроэнергии [9].

При расчете т. к. з. принимаются следующие допущения: скорость генераторов считается неизменной и равной синхронной; скольжение двигателей предполагается неизменным и равным $s_k = s_{k0}$; регулирование напряжения при наличии ССГ осуществляется по закону единичной функции $u_f = ku_{f0}$; насыщение магнитопроводов не учитывается.

Используются: неполное структурное моделирование с уравнениями связи, разрешенными относительно напряжений; уравнения — в переменных $\psi$; метод Рунге — Кутта.

В каждом интервале кроме расчета потокосцеплений вычисляются токи генератора, синхронных двигателей и фидеров в осях $d$, $q$, 0, $i = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$ и фазные токи.

При необходимости определяются действующие значения тока $I_t$ и для первого полупериода производная $\frac{di}{dt}$. Расчет может вестись для шести точек короткого замыкания типовой схемы.

Алгоритм т. к. з. реализован на ряде ЦВМ без автоматического выбора шага численного интегрирования. Опыт расчетов показывает, что необходимость в смене длительности шага $h$ в ходе расчета возникает не более двух раз. Рекомендуется $h = 0{,}25$ синх. с * при $t = 0{,}15 \div 0{,}20$ с, $h = 0{,}5$ синх. с при $t > 0{,}20$ с. Для расчета т. к. з. на БЭСМ-4 составлена АЛГОЛ-программа. Затраты машинного времени на БЭСМ-4: 5—7 мин на один вариант ($t_m = 0{,}7$ с).

Частные алгоритмы включения и отключения нагрузки и общий алгоритм расчета переходных про-

* Синхронная секунда (синх. с) равняется радиану времени.

цессов в системе с одним генератором и тремя ступенями распределения являются дальнейшим развитием алгоритма т. к. з. [9]. Используются полные уравнения Горева — Парка, учитывается насыщение магнитопроводов электрических машин и изменение частоты тока в роторах асинхронных двигателей. Алгоритмы построены на основе неполного структурного моделирования с разрешенными уравнениями связи относительно узловых напряжений. При этом уравнения связи частных алгоритмов получены в таком виде, что они являются частными случаями уравнений связи общего алгоритма. Это позволяет последовательно (в любом порядке) рассчитывать переходные процессы, вызванные короткими замыканиями, отключением к. з., включением, отключением нагрузки как в сохранившейся под питанием, так и в отключенной части системы.

Алгоритм реализован на ЦВМ БЭСМ-4. Составлена АЛГОЛ-программа. Рекомендуемое время для интервала численного интегрирования: $h = 0{,}5$ синх. с в области до $t = 0{,}15 \div 0{,}20$ с, $h = 0{,}5$ синх. с при $t > 0{,}20$ с.

Машинное время расчета включения или отключения нагрузки составляет 15—20 мин. Продолжительность расчета отдельного процесса по общей программе примерно в два раза больше, чем по частной, при одинаковом объеме печати. Это означает, что простые переходы следует рассчитывать с помощью соответствующих частных программ.

Частный алгоритм параллельной работы генераторов разработан применительно к схеме с двумя генераторами и общей нагрузкой, состоящей из двух асинхронных двигателей и статической нагрузки. Предусматриваются расчеты переходов: т. к. з. при качаниях роторов, синхронизации, динамической устойчивости параллельной работы генераторов, динамической устойчивости нагрузки и изменения напряжения при больших возмущениях в системе.

Уравнения элементов приняты в соответствии с [9]. Алгоритм составлен также на основе принципа неполного структурного моделирования с уравнениями связи, разрешенными относительно напряжения в узловой точке. Последние являются достаточно сложными функциями, в которых ряд коэффициентов зависит от значений угла $\theta_{12}$ и скольжения $s_k$.

Алгоритм реализован на ЦВМ БЭСМ-4. Составлена АЛГОЛ-программа. Неполное структурное моделирование с разрешенными уравнениями связи относительно узловых напряжений дало существенную экономию объема программы. Особенность программы состоит в том, что она составлена на базе композиции двух алгоритмов: установившегося режима и переходного процесса при параллельной работе генераторов.

Расчет переходного процесса длительностью 0,63 с требует 15 мин машинного времени при неучете насыщения и 45 мин — при учете насыщения машин.

Частный алгоритм параллельной работы генераторов при двух узловых точках в первичной цепи (с индуктивно-активным сопротивлением между генераторами) использует те же расчеты процессов, что и предыдущий алгоритм. Уравнения элементов — полные преобразования. Уравнения генераторов записаны в осях $d$, $q$, 0, уравнения первичной цепи и нагрузки — в осях $d_s$, $q_s$, 0. В отличие от предыдущего алгоритма здесь использован принцип полного структурного моделирования. Определение узловых напряжений осуществляется с помощью алгоритма расчета производных от потокосцеплений в предположении $[U] = 0$. Уравнения связи записаны в переменных $i$, уравнения элементов — в смешанной форме. Численное интегрирование осуществляется методом Рунге — Кутта. Алгоритм реализован на БЭСМ-4 с помощью АЛГОЛ-программы. Процессы длительностью в реальном времени до 1 с рассчитываются в течение 20—25 мин.

Частный алгоритм параллельной работы генераторов при замкнутой (кольцевой) первичной цепи является дальнейшим развитием предыдущего алгоритма. Схема системы включает четыре генератора, соединенных в кольцо через индуктивно-активные сопротивления с нагрузкой в виде двух АД и четырех статических нагрузок.

Алгоритм реализован на БЭСМ-4 с помощью АЛГОЛ-программы.



Алгоритм решения уравнений связи и вычисления коэффициентов уравнений напряжений узловых точек автономных ЭЭС произвольного состава и структуры* оформлен в виде процедуры. Удачно обеспечивает на основе уравнений связи в токах их автоматическое формирование, преобразование и решение в отношении напряжений для структур ЭС с любым числом узловых точек. Реализован на ЦВМ БЭСМ-4 и БЭСМ-6.

Частный алгоритм расчета процесса к. з. в судовой электроэнергетической системе произвольной структуры* является конкретной реализацией предыдущего алгоритма. Впервые осуществлено на ЦВМ автоматическое формирование алгоритма расчета электромагнитных переходных процессов в автономной ЭС для любых заданных ее составов и структур из типовых элементов. Используются полные уравнения Горева — Парка в токах и принцип полного структурного моделирования. Требуется задание вектора начального состояния системы путем комплексирования или в исходных данных. В качестве примеров по этому алгоритму и одной и той же программе проводились расчеты для ЭС с двумя узловыми точками и для ЭС кольцевой структуры с четырьмя узловыми точками и семью электромашинными элементами.

Алгоритм реализован на ЦВМ БЭСМ-4 и БЭСМ-6. Для последней процесс к. з. длительностью 0,1 с рассчитывается на ЦВМ БЭСМ-6 за 15 мин.

Частный алгоритм расчета процесса к. з. в судовой электроэнергетической системе с двумя узловыми точками* (два синхронных генератора, два асинхронных двигателя, две статические нагрузки) разработан в качестве примера полуавтоматического формирования алгоритма расчета для ЭС конкретной структуры и состава на базе алгоритма для ЭС произвольной структуры путем задания конкретных значений соответствующих переменных. Такой подход обеспечивает крайне малое оформление алгоритма для любой частной структуры, уменьшение необходимого объема памяти и решение на меньших ЦВМ (типа БЭСМ-4).

Частный алгоритм расчета процесса в системе с полупроводниковым преобразованием** разработан применительно к системе, включающей два генератора, два асинхронных двигателя, статическую и выпрямительную нагрузки при двух узловых точках в первичной цепи.

Особенностью разработанного алгоритма является представление уравнений выпрямителя в осях $d_0$, $q_0$, 0 и приведение к этим осям в уравнениях связи всех остальных элементов.

Алгоритм реализован на ЦВМ типа М222 на алгоритмическом языке АЛГОЛ.

Общий алгоритм расчета процессов в СЭЭС [9] позволяет рассчитать процессы в системе, состоящей из двух генераторов и трех ступеней распределения электроэнергии, происходящие при к. з., включении и отключении нагрузки, т. е. при изменении структуры системы.

Алгоритм построен на основе полного структурного моделирования с неразрешенными относительно напряжений уравнениями связи [9]. Расчет узловых напряжений осуществляется с помощью уравнений связи, представленных в матричном виде.

Системы уравнений связи для частных случаев состояний СЭЭС (к. з. в каком-нибудь узле, отключение части системы и т. д.) представляются как частные случаи исходной системы уравнений. Это обусловлено наличием соответствия структуры исходных уравнений связи структуре СЭЭС. Это соответствие легче всего выявляется при топологическом анализе цепи, что и используется в общем алгоритме расчета переходного процесса в СЭЭС. Попытка реализации алгоритма на БЭСМ-2 вызвала четырехкратное обращение к внешней памяти. БЭСМ-4 обеспечивает вполне приемлемую реализацию.

Упрощенный алгоритм т. к. з. использовался для создания расчетных кривых т. к. з., которые будут рассмотрены в гл. 2.7. Здесь

---

* Разработаны канд. техн. наук В. И. Финагиным.
** Разработан канд. техн. наук Н. А. Колесниченко

лишь отметим, что создание расчетных кривых оказалось возможным благодаря:

— замене типовой схемы упрощенной схемой с одним генератором и одной ступенью распределения с одним асинхронным двигателем и фидером, на котором происходит к. з.;

— делению генераторов на группы с близкими по своим значениям параметрами;

— замене всех асинхронных двигателей одним суммарной мощности и параметрами, определенными на основании статистических данных.

Расчетные кривые, используемые для определения т. к. з., вычисляются на ЦВМ. Это дает возможность рассчитать и построить как кривые полного тока к. з. (с учетом апериодической составляющей и тока от асинхронных двигателей), так и кривые составляющих полного тока к. з. Для построения таких кривых необходимо было показать правомерность указанных выше допущений.

Допустимость применения упрощенной схемы замещения обосновывается тем, что питание точки к. з. от асинхронных двигателей отсечного и группового щитов не превышает 4,5% суммарного тока к. з. Это было показано в расчетах на ЦВМ по частной программе т. к. з., рассмотренной в § 1.2.6.

Деление генераторов на группы со сходственными параметрами было произведено на основе статистических данных; при этом усреднение основных параметров выполнено с погрешностью, не превышающей 12,5%.

Эквивалентный асинхронный двигатель принят мощностью $0{,}75P_{ном}$ генератора. Погрешность в вычислении ударного тока к. з., как показали расчеты на ЦВМ, не превышает 7% по сравнению с расчетами тока при асинхронном двигателе мощностью $0{,}5P_{ном}$.

Все это позволило с достаточной для практики точностью построить расчетные кривые т. к. з., с помощью которых в конструкторских бюро могут рассчитываться т. к. з. без непосредственного применения ЦВМ.

Аналогичные кривые, более простые в использовании, могут быть созданы на ЦВМ для расчета изменения напряжения, оценки самозапуска асинхронной нагрузки, устойчивости работы генераторов и др.

Упрощенный алгоритм расчета переходных процессов в системе с двумя синхронными генераторами (алгоритм Лонглея — Лебедева — Жданова) базируется на пренебрежении переходными процессами в цепи статора, влиянием успокоительных обмоток и насыщением машины. В этом случае учитываются лишь дифференциальные уравнения обмоток возбуждения и моментов. Медленное изменение координат $e'_{d1}$, $e'_{d2}$, $s_1$, $s_2$ и $\theta_{12}$ допускает применение метода последовательного вычисления значений $u$, $i_d$, $i_q$, $e_{af}$, $e_q$ через интервалы времени, в течение которых приращения $\Delta e'_{d1}$, $\Delta e'_{d2}$, $\Delta s_1$, $\Delta s_2$ и $\Delta\theta_{12}$ остаются малыми. Это упрощает их приближенное вычисление и позволяет использовать элементарные средства для расчета ($h = 0{,}02 \div 0{,}05$ с).

Сначала рассчитывается установившийся режим. Затем в соответствии с порядком, определенным алгоритмом, вычисляются последовательно для каждого интервала значения переменных задачи. При необходимости в каждом интервале вводятся изменения скольжения нагрузки, изменение напряжения $u_f$ и момента первичного двигателя.

Алгоритм создан для расчета с помощью элементарных средств механизации вычислительных работ. Реализован он и на ЦВМ БЭСМ-4.

Алгоритм дает возможность оценить динамическую устойчивость нагрузки и параллельной работы, оценить симметричную составляющую тока и изменение напряжения в разветвленной сети.

Группа алгоритмов для оценки точности математической модели [9] основана на базе статистического подхода к исследованию переходного процесса. С помощью этих алгоритмов получают экспериментальные среднестатистические параметры режима и элементов и их вероятностные характеристики, осуществляют статистическое математическое моделирование (СММ) и производят сопоставления результатов статистического натурного эксперимента и СММ.



Алгоритмы реализованы на ЦВМ БЭСМ-6 с широким использованием автоматизированного измерительного комплекса (АИК).

Алгоритм синтеза автономных электроэнергетических систем по условию качества переходного процесса [12] базируется на использовании теории планирования эксперимента и метода случайного поиска. Алгоритм реализован на ЦВМ БЭСМ-4. Время решения задачи по одному комплексу режимов или по отсеиванию несущественных параметров не превышает 1,5 ч. Поиск оптимального решения составляет 15 мин.

# Глава 1.3. НАДЕЖНОСТЬ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ

## § 1.3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Современное судно представляет собой сложный комплекс самых разнообразных технических средств, от надежной работы которых зависит его технико-экономическая эффективность. Это в полной мере относится к одной из главных судовых систем — электроэнергетической (СЭЭС).

Согласно ГОСТ 13377—75 под надежностью понимается способность системы сохранять свойства, необходимые для выполнения заданного назначения, при нормальных условиях ее эксплуатации в течение требуемого промежутка времени. Необходимо отметить, что под живучестью понимается способность системы сохранять свойства, необходимые для выполнения заданного назначения, при наличии воздействий, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации. Таким образом, надежность проявляется при нормальном уровне воздействий на систему, а живучесть — при воздействиях, значительно превышающих нормальные. Строго говоря, абсолютно четкой грани между нормальными и экстраординарными воздействиями не существует, и о ней в процессе анализа систем можно лишь договориться.

Аппарат теории надежности дает возможность производить анализ надежности существующих систем и решать задачи оптимального синтеза СЭЭС. Это обеспечивает связь исследования вопросов надежности СЭЭС с ее проектированием, что позволяет избежать ошибок в вопросах выбора рационального варианта схемы распределения электроэнергии, выбора количества и мощности источников электроэнергии, числа и пропускной способности перемычек, определения эффективности восстановления и резервирования тех или иных элементов СЭЭС.

Определение надежности СЭЭС сопряжено, как правило, с проведением сложных и зачастую громоздких расчетов, базирующихся на математическом аппарате теории множеств и алгебры логики [52], на теории вероятностей и математической статистике, на глубоком понимании процессов функционирования СЭЭС.

Настоящая глава справочника посвящена описанию методов количественных характеристик надежности СЭЭС при отказах ее элементов без учета и с учетом возможности их восстановления. При изложении рекомендуемых методов преследовалась цель дать специалистам проверенный, хорошо отработанный и сравнительно простой расчетный аппарат, позволяющий без применения сложной вычислительной техники получать количественную оценку основных показателей надежности проектируемой системы.

В процессе изложения материала используются обозначения и терминология, соответствующие ГОСТ 13377—75 и методике выбора показателей для оценки надежности сложных технических систем.

При грамотном использовании рекомендуемых ниже апробированных методов, основанных на корректных и подходящих допущениях, расчеты надежности весьма полезны даже при отсутствии исчерпывающей статистической информации о надежности элементов, особенно на первом, идеологическом, этапе проектирования СЭЭС, когда определяется оптимальный вариант основной структуры, производится выбор элементов СЭЭС.

Расчеты надежности СЭЭС должны содержать:

— четкую формулировку задач, возложенных на исследуемую систему;

— условия работоспособности (или неработоспособности) системы в формализованном виде;

— промежуточные преобразования, позволяющие перейти к таким формам логических функций, к которым можно применить основные теоремы теории вероятностей;

— всестороннее исследование этих функций и анализ результатов исследования.

Одним из самых сложных вопросов надежности СЭЭС является задание целесообразных или хотя бы оправданных количественных требований по безотказности систем и их элементов. Эти требования могут быть обоснованы на базе анализа достигнутого уровня надежности существующих систем, учета и оценки специалистов развития судостроения и флота. Требования должны гарантировать прогресс в развитии СЭЭС, а с другой стороны — обеспечивать практическую достижимость этих требований на современном уровне развития науки и техники.

## § 1.3.2. ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СЭЭС

*Рассчитать систему на надежность — это значит определить какую-либо одну или несколько количественных характеристик надежности.* Разнообразие практических задач приводит к необходимости использовать такие характеристики надежности, как, например, в процессе проектирования СЭЭС — вероятность безотказной работы в течение определенного интервала времени $R(t)$; в процессе эксплуатации — наибольшая готовность к немедленному использованию $k_г = \pi(\infty)$. На первом этапе проектирования СЭЭС и ее подсистем, в частности, при выборе количества, мощности генераторных агрегатов, построения рациональных структур ГРЩ и сетей распределения и др., важной задачей является создание простой, но в то же время достаточно точной математической модели реальной системы. Точность математической модели определяется точностью и достоверностью исходных данных. Однако следует иметь в виду, что недостоверность исходных данных не может служить основанием для отказа от оценок, в частности, таких технических характеристик, как показатели надежности и эффективности функционирования проектируемых систем. Действительно, большинство расчетов и оценок на ранних этапах проектирования носит относительный и сравнительный характер, и, следовательно, неточность исходных данных приводит к отклонению результатов во всех сравниваемых вариантах, как правило, в одну и ту же сторону.

СЭЭС является многоцелевой системой. Поэтому для одной и той же структуры СЭЭС и при одних исходных данных о надежности ее элементов вероятность безотказной работы СЭЭС целиком определяется характером поставленной задачи. При непосредственном исследовании надежности системы прежде всего из множества принципиально возможных режимов ее работы необходимо выделить расчетные режимы, т. е. определить круг задач, решение которых наиболее полно характеризует качество функционирования СЭЭС.

Для СЭЭС транспортного сухогрузного судна в качестве такого расчетного режима могут (и должны) быть приняты ходовой режим и режим стоянки с грузовыми операциями, осуществляемыми судовыми средствами. Выбор расчетного режима позволяет конкретизировать задачу, сделать ее определенной. В некоторых случаях представляется целесообразным углубить эту задачу, расчленив ее на ряд частных и более узких задач. Количественные оценки показателей надежности, полученные при решении этих частных задач, несут дополнительную информацию о свойствах исследуемой СЭЭС (например, характеризуют вероятность бесперебойного обеспечения электроэнергией заданного качества определенной группы потребителей) и способствуют принятию более обоснованного решения.

После выбора расчетных режимов следующим шагом является построение упрощенной схемы, или модели, функционирования системы. Без этого этапа никакое количественное исследование надежности невозможно.

Очевидно также, что полный учет всех факторов, влияющих на надежность СЭЭС, невозможен, да это практически и не требуется. Задача состоит лишь в том, чтобы выявить зависимость надежности системы от важнейших, решающих факторов, для того чтобы в дальнейшем, целенаправленно влияя на эти факторы, добиться максимальной надежности СЭЭС. Поэтому модель явления должна выбираться с учетом конкретной задачи, должна быть, по возможности, простой и вместе с тем достаточно гибкой, чтобы отразить влияние на надежность системы основных факторов.

Эту модель необходимо строить на базе логических связей. Широкие возможности для построения таких моделей дает аппарат алгебры логики, с помощью которого удается достаточно просто описать множество $X$ возможных состояний системы и разбить это множество на два непересекающихся подмножества: работоспособных $R$ и неработоспособных $Q$ состояний

$$R \cap Q = \varnothing; \; R \cup Q = X.$$

Если учесть, что каждый элемент $x_k$ системы может находиться только в двух несовместных состояниях: работоспособном ($x_k = 1$) и неработоспособном ($x_k = 0$), то состояние самой системы может быть охарактеризовано $m$-мерным вектором

$$\overline{H}_m = \{x_1^{\alpha_1}, \; x_2^{\alpha_2}, \; \ldots, \; x_k^{\alpha_k}, \; \ldots, \; x_m^{\alpha_m}\}, \qquad (1.3.1)$$

который принято называть вектором состояний системы. С другой стороны, если в системе имеется $n$ элементов, то общее число возможных состояний системы равно $2^n$.

Из (1.3.1) видно, что каждая координата вектора состояний системы $\overline{H}_m$ характеризует состояние ее конкретных элементов в данный момент времени. Отсюда следует, что и вектор состояний системы является случайной функцией времени $\overline{H}_m(t)$, принимающей значения из счетного множества $X = \left\{x_k^{\alpha_k}\right\}$. Тогда факт безотказной работы системы за интервал времени $[0, \; t]$ записывается следующим образом:

$$H_m(t) \in R \text{ при } t \in [0, \; t_1];$$

$$H_m(t) \in Q \text{ при } t = t_1.$$

Функцию алгебры логики (ФАЛ), связывающую состояние элементов $x_k$ с состоянием бинарной системы $y(x_1, \; x_2, \; \ldots, \; x_m)$, будем называть функцией работоспособности системы или условиями ее работоспособности. Построенную таким способом модель СЭЭС, структура и особенности которой описываются средствами математической логики, а количественная оценка надежности производится с помощью теории вероятностей, называют логико-вероятностной моделью.

## § 1.3.3. ВЫБОР МЕТОДА РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СЭЭС

### СОСТАВЛЕНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Для аналитических расчетов структурной надежности СЭЭС можно рекомендовать следующие тщательно проверенные методы: 1) точные логико-вероятностные методы без учета восстановления; 2) приближенный логико-вероятностный метод расчета с учетом восстановления.

При расчетах с помощью методов первой группы нет необходимости задаваться какими-либо произвольными или же заранее принятыми законами распределения, а следует оперировать вероятностями $R_k(t)$ и $Q_k(t)$ элементов систем. Эти расчеты часто бывают необходимы для проверки различных приближенных методик или допущений, проверки правильности решений задачи на ЦВМ.

Второй метод построен на следующих трех допущениях, обычно принимаемых в теории массового обслуживания: 1) процесс восстановления элементов является стационарным; 2) процессы отказа и восстановления элементов независимы; 3) все исправные элементы находятся в режиме горячего резервирования, т. е. в постоянной готовности быть использованными в работе, а все неисправные — восстанавливаются.

При наличии ЦВМ с достаточно большим быстродействием и объемом оперативной памяти могут быть успешно использованы *логико-статистические методы расчета надежности*. Условная классификация существующих методов исследования и расчета структурной надежности СЭЭС представлена на рис. 1.3.1, куда включены лишь известные, убедительно обоснованные и проверенные практикой методы расчета.

При выполнении аналитических расчетов надежности условие работоспособности системы может быть записано с помощью *кратчайших путей успешного функционирования* (КПУФ) или с помощью *минимальных сечений отказов* (МСО) *. Выбор формы записи определяется структурой системы.

Практика составления условий работоспособности выявила затруднения, заключающиеся, во-первых, в недостаточной разработанности формализованных (машинных) методов составления соответствующих КПУФ или МСО, в результате чего пока используются в основном ручные, весьма трудоемкие способы, во-вторых, в низкой культуре «озадачивания» системы. Дело в том, что при расчетах надежности достаточно сложных систем некоторые специалисты вместо того, чтобы дробить и упрощать задачу, стремятся все дело свести к одной «сверхзадаче», для которой трудно даже сформулировать понятие отказа. Зачастую оказывается, что модель такой «сверхзадачи» нельзя проверить, в ней нет достаточной определенности и четкости.

Очевидно, что при решении несложных задач, когда общее число КПУФ или МСО, составляемых без особого труда, находится в пределах нескольких десятков, целесообразно использовать ручной метод их составления. В противном случае специалисты должны освоить машинный метод составления КПУФ, один из возможных алгоритмов которого дан ниже (см. стр. 72) для схемы СЭЭС, изображенной на рис. 1.3.2.

В процессе расчета полученные ФАЛ должны быть преобразованы к бесповторным, ортогональным или смешанным формам. К настоящему времени разработан ряд инженерных методов (алгоритмов) преобразования ФАЛ, из которых наиболее эффективным и простым является схемно-логический.

При выборе метода расчета надежности следует иметь в виду, что точные логико-вероятностные методы расчета без учета восстановления являются «базой» приближенных логико-вероятностных и логико-статистических методов. Последние могут рассматриваться как дальнейшее развитие точных логико-вероятностных методов, как их приложение к определенным классам задач. Вследствие этого в настоящем разделе основное внимание уделяется вопросу практического применения точных логико-вероятностных методов расчета структурной надежности СЭЭС.

Для непосредственного использования аппарата алгебры логики при расчетах надежности необходимо знать ряд понятий.

*Структурная схема* СЭЭС — графическое изображение совокупности ее структурных элементов и функционально-логических связей между ними, предназначенное для формализации условий работоспособности системы. На структурной схеме все элементы системы равноценны, и это подчеркивается их одинаковым графическим изображением (в виде кружка или квадрата) и одинако-

* Определения см. на стр. 70.



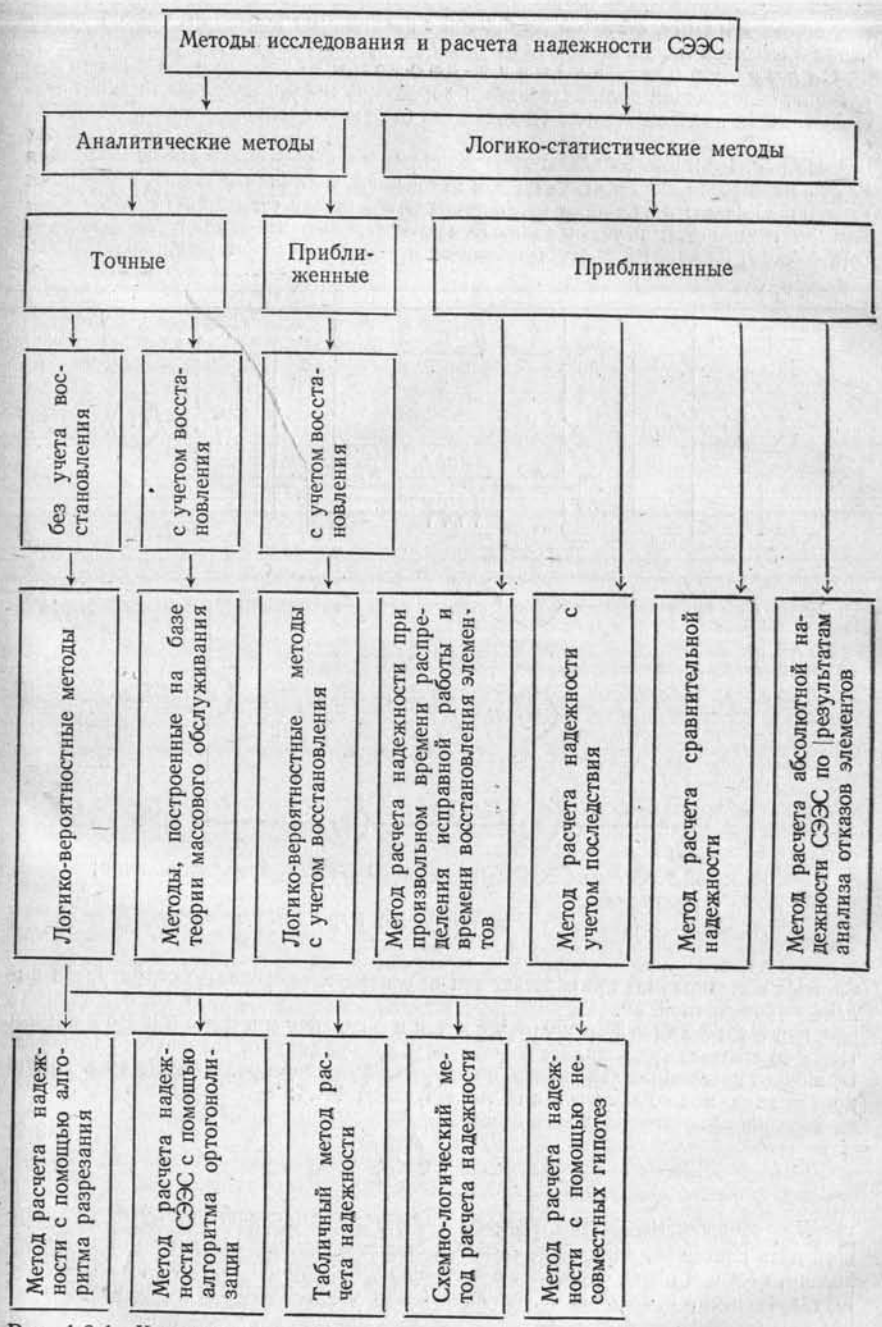



Рис. 1.3.1. Классификация методов исследования и расчета структурной надежности СЭЭС.

вым обозначением одной и той же буквой с различными номерами. Способ соединения элементов в функциональной схеме раскрывает структуру системы.

Структурный элемент системы — условный эквивалентный элемент, обладающий количественными характеристиками надежности некоторой совокупности последовательно соединенных (в функциональном смысле) реальных СЭЭС.

На рис. 1.3.2 представлены принципиальная и структурная схемы некоторой СЭЭС. Реальные СЭЭС в структурном отношении являются более сложными системами. С целью повышения надежности СЭЭС между секциями *ГРЩ1*, *ГРЩ2* или другими щитами устанавливаются специальные перемычки, аналогичные перемычке *П* на рис. 1.3.2, ответственные потребители резервируются по питанию.

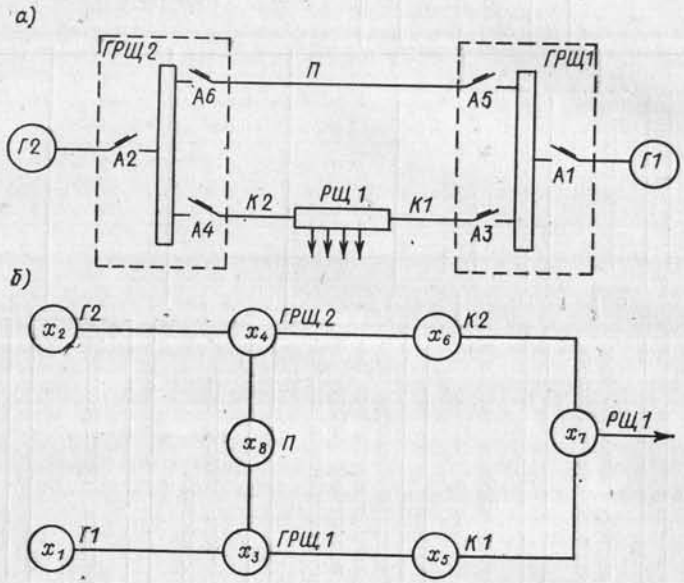



Рис. 1.3.2. Схемы СЭЭС с перемычкой *П*: *а* — принципиальная; *б* — структурная.
*А1—А6* — автоматические выключатели; *К1*, *К2* — кабель.

Система в этом случае приобретает так называемую мостиковую структуру и является избыточной.

Кратчайший путь успешного функционирования (КПУФ) системы представляет собой такую конъюнкцию ее элементов, ни одну из компонент которой нельзя изъять, не нарушив функционирования системы. Такую конъюнкцию можно записать в виде следующей ФАЛ:

$$P_l = \bigwedge_{k \in K_{P_l}} x_k, \qquad (1.3.2)$$

где $K_{P_l}$ означает множество номеров, соответствующих данному пути. Кратчайший путь описывает один из возможных самостоятельных вариантов выполнения задачи, стоящей перед системой, с помощью минимального набора работоспособных элементов, абсолютно необходимых для осуществления данного варианта работы системы.

Минимальное сечение отказов (МСО) системы представляет собой такую конъюнкцию из отрицаний ее элементов, ни одну из компонент которой нельзя изъять, не нарушив условия неработоспособности системы. Такую конъюнкцию можно записать в виде следующей ФАЛ:

$$S_j = \bigwedge_{k \in K_{S_j}} x'_k, \qquad (1.3.3)$$

где $K_{S_j}$ означает множество номеров, соответствующих данному сечению.

Другими словами, МСО системы описывает один из возможных способов нарушения работоспособности системы с помощью минимального набора отказавших элементов.

Каждая избыточная система имеет конечное число КПУФ ($l = 1, 2, \ldots, d$) и МСО ($j = 1, 2, \ldots, n$).

Для схемы, изображенной на рис. 1.3.2, условия работоспособности системы, заключающиеся в обеспечении безотказного питания потребителей, подключенных к *РЩ1*, можно записать:

— либо в виде дизъюнкции всех КПУФ

$$y(x_1, x_2, \ldots, x_8) = \bigvee_{l=1}^{4} P_l = x_1x_3x_5x_7 \vee x_1x_3x_4x_6x_7x_8 \vee x_2x_4x_6x_7 \vee$$
$$\vee x_2x_3x_4x_5x_7x_8 \qquad (1.3.4)$$

или то же самое, но в матричной форме

$$y(x_1, x_2, \ldots, x_8) = \left| \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{matrix} \right| = \left| \begin{matrix} x_1x_3x_5x_7 \\ x_1x_3x_4x_6x_7x_8 \\ x_2x_4x_6x_7 \\ x_2x_3x_4x_5x_7x_8 \end{matrix} \right|; \qquad (1.3.5)$$

— либо через конъюнкцию отрицаний всех минимальных сечений отказов

$$y(x_1, x_2, \ldots, x_8) = \bigwedge_{j=1}^{10} S'_j = x_7(x_1 \vee x_2)(x_1 \vee x_4)(x_2 \vee x_3)(x_3 \vee x_4) \times$$
$$\times (x_3 \vee x_6)(x_4 \vee x_5)(x_5 \vee x_6)(x_1 \vee x_6 \vee x_8)(x_2 \vee x_5 \vee x_8) \qquad (1.3.6)$$

или то же самое, но записанное в матричной форме

$$y(x_1, x_2, \ldots, x_8) = |S'_1\ S'_2 \cdots S'_{10}| =$$
$$= \left| \begin{matrix} x_7 & x_1 & x_1 & x_2 & x_3 & x_3 & x_4 & x_5 & x_1 & x_2 \\ & x_2 & x_4 & x_3 & x_4 & x_6 & x_5 & x_6 & x_6 & x_5 \\ & & & & & & & & x_8 & x_8 \end{matrix} \right|. \qquad (1.3.7)$$

Из (1.3.5) и (1.3.7) видно, что поставленная перед системой задача (питание потребителей от *РЩ1* — $x_7$) будет выполнена, если сохранится хотя бы один из четырех КПУФ $\overset{4}{P}_{l=1}$ или будут исправны все десять $\overset{10}{S}_{j=1}$ МСО данной системы.

Составление ФАЛ в виде КПУФ или МСО может быть осуществлено с помощью ЦВМ.

Предлагаемый для реализации способ позволяет получить ФАЛ в виде КПУФ. Процесс формирования такой ФАЛ поясним на примере СЭЭС, изображенной на рис. 1.3.2.

**Подготовка исходных данных (ИД).** Работоспособность рассматриваемой СЭЭС будет обеспечена, если потребителям будет подаваться электроэнергия от генераторов *Г1* или *Г2*. Построим орграф, отображающий функционирование рассматриваемой системы. Вершинами этого орграфа являются элементы системы, а дуги соответствуют допустимым направлениям потоков энергии между вершинами. Пронумеровав вершины и указав направления дуг, получим помеченный орграф, который для рассматриваемой СЭЭС изображен на рис. 1.3.3.

Для составления с помощью ЭВМ КПУФ воспользуемся матричным способом представления орграфа. Для этого помеченный орграф опишем матрицей $SM$ смежности вершин графа размерностью $E \times E$, где $E$ — количество вершин графа

$$SM(J, I) = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Эта матрица вводится в блок *1* структурной схемы, изображенной на рис. 1.3.4.

**Построение КПУФ.** Построение КПУФ выполняется в такой последовательности:

1. В процессе отыскания КПУФ прежде всего необходимо установить истоки и стоки, имея в виду, что в исток не входит ни одна дуга и, следовательно, столбец в $SM$, соответствующий истоку, состоит из нулевых элементов. По аналогии строка из нулевых элементов соответствует стоку. Отыскание истоков и стоков осуществляется в блоке *2*. В рассматриваемой $SM$ истоками являются вершины *1* и *2*, стоком — элемент *7* (см. рис. 1.3.3). Поиск и запись в рабочий массив $S$ кратчайших путей от истоков до стока осуществляется в блоках *3—7*.

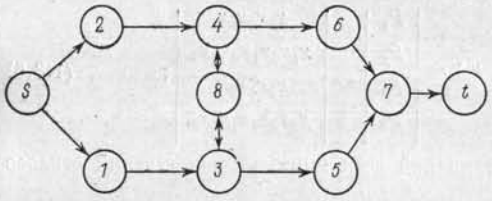


Рис. 1.3.3. Помеченный орграф.

В дальнейшем процедуру определения КПУФ рекомендуется выполнять сначала от одного, затем от другого и от всех остальных существующих истоков.

2. Установив в блоке *2* номер элемента, соответствующего истоку, рассматриваем строку матрицы $SM$ с этим же номером. Наличие единиц в этой строке говорит о том, что из вершины выходит столько дуг, сколько единиц в этой строке. Номер столбца, в котором стоит единица, указывает на номер $k$-го элемента, в который дуга входит. Таким образом, по этим признакам отыскиваются и запоминаются номера элементов, из которых формируется массив $S$ кратчайших путей успешного функционирования. Строки массива должны состоять из номеров тех элементов, которые последовательно соединены между собой дугами от истока до стока.

3. В массиве путей $S$ строка с номером истока или другого рассматриваемого вслед за истоком элемента повторяется столько раз, сколько дуг из них выходит.

4. В следующую позицию в каждой из этих строк записывается номер элемента, связанного с предыдущим. Связь между элементами устанавливается по матрице смежности $SM$, в которой всякий раз рассматривается строка с номером, соответствующим номеру элемента, испускающего дуги, а места расположения единиц в строке указывают номера элементов, куда эти дуги приходят.

5. Если при рассмотрении очередной строки в матрице $SM$ сумма элементов этой строки окажется равной нулю, то это значит, что данный элемент с номером строки — сток. Путь от истока к стоку переписывается в матрицу КПУФ в блоке *12* и выводится на печать.

Если в массиве $S$ остались не доведенные до стока пути, то операция рассмотрения строк в матрице $SM$ повторяется. Построение путей оканчивается, когда рассмотрены все истоки и все пути в массиве $S$ доведены до стоков.



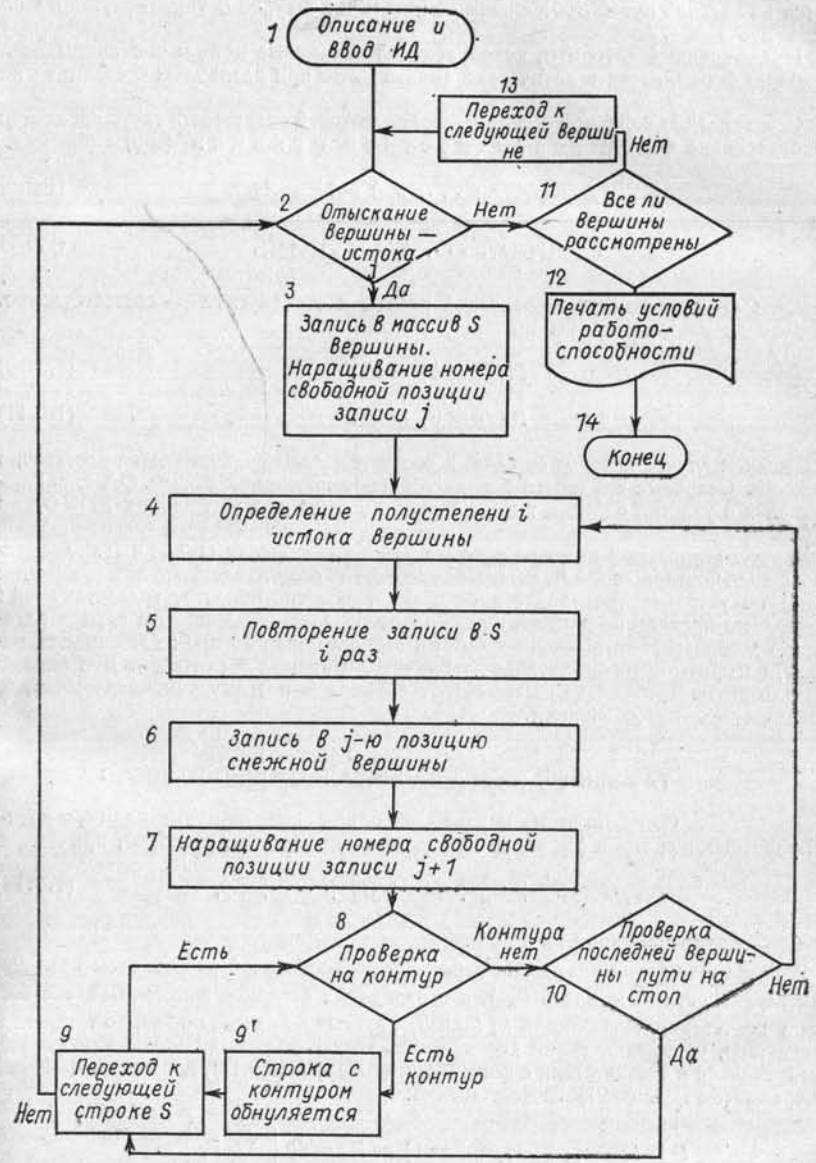


Рис. 1.3.4. Структурная схема построения кратчайших путей успешного функционирования.

6. Если в орграфе (см. рис. 1.3.3) возможны петли и контуры, их следует исключить. Для этого перед записью в строке очередного элемента проводится проверка: был ли он ранее записан в этом пути, и если был, то данный путь исключается из массива путей $S$. Исключение петель и контуров осуществляется в блоках *8* и *9*.

Предложенный алгоритм, использующий матричные методы описания СЭЭС, позволяет формализовать логический анализ СЭЭС при различных состояниях их элементов.

Следующей задачей при определении показателей надежности систем является преобразование ФАЛ к вероятностной функции (ВФ) типа

$$P\{y(x_1, x_2, \ldots, x_m)=1\}=R_c \tag{1.3.8}$$

или

$$P\{y(x_1, x_2, \ldots, x_m)=0\}=Q_c, \tag{1.3.9}$$

где $R_c$, $Q_c$ — вероятность безотказной работы и отказа системы соответственно.

Для элементов системы имеем

$$P\{x_k=1\}=R_k; \tag{1.3.10}$$

$$P\{x_k=0\}=Q_k. \tag{1.3.11}$$

В общем случае переход от ФАЛ к соответствующей ВФ является достаточно сложным. Основные трудности возникают из-за повторной формы ФАЛ, заключающейся в участии одних и тех же элементов системы в нескольких КПУФ или МСО.

В рассматриваемом примере условия работоспособности (1.3.5) и (1.3.7) записаны в виде повторных ФАЛ. Вынесение за скобки общего элемента $x_7$ в уравнении (1.3.6) не устраняет повторности функции работоспособности, вследствие чего необходимо проведение дополнительных преобразований. Известны четыре алгоритма преобразования повторных ФАЛ к бесповторным формам: алгоритм разрезания, алгоритм ортогонализации, табличный и схемно-логический. Два последних алгоритма требуют меньших затрат времени и поэтому рекомендуются для практического использования.

## ТАБЛИЧНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СЭЭС

Согласно этому методу составляют специальную таблицу, в которой размещают $m$ строк (по числу элементов в системе) и $C$ столбцов, причем

$$C=C_d^1+C_d^2+\cdots+C_d^k+\cdots+C_d^d, \tag{1.3.12}$$

где $C_d^k$ — число сочетаний из $d$ по $k$.

В названиях строк указывают вероятности безотказной работы элементов $R_{x_k}$ (или вероятности их отказов $Q_{x_k}$), а в названиях столбцов записывают все возможные сочетания конъюнкций $P_l$ (или $S_l$), взятых по одной, по две, по три и т. д. Кроме того, указывают знаки вероятностей этих конъюнкций (плюс или минус), чередующиеся в соответствии с формулами (1.3.13) и (1.3.14), данными в [52] под номерами (6.96) и (6.97) соответственно:

$$P\{y(x_1, x_2, \ldots, x_m)=1\}=R_c=P\left\{\bigvee_{l=1}^{d} P_l\right\}=$$

$$=\sum_i P(P_i)-\sum_i\sum_j P(P_i\wedge P_j)+\sum_i\sum_j\sum_k P(P_i\wedge P_j\wedge P_k)+\cdots+$$

$$+(-1)^{d-1}P(P_1\wedge P_2\wedge\cdots\wedge P_d); \tag{1.3.13}$$



$$P\{y(x_1, x_2, \ldots, x_m)=0\}=Q_c=P\left\{\bigvee_{j=1}^{n} S_j\right\}=$$

$$=\sum_i P(S_i)-\sum_i\sum_j P(S_i\wedge S_j)+\sum_i\sum_j\sum_k P(S_i\wedge S_j\wedge S_k)+\cdots+$$

$$+(-1)^{n-1}P(S_1\wedge S_2\wedge\cdots\wedge S_n), \tag{1.3.14}$$

где знаки суммы распространяются на различные значения индексов $i$, $j$, $k$.

Указанную таблицу следует заполнять крестиками (×) и черточками (—), причем крестиками отмечаются вероятности тех событий, которые входят в данную конъюнкцию, а черточками — вероятности событий, отсутствующих в ней.

Табличный способ удобен по двум причинам: 1) автоматически осуществляется умножение логических переменных самих на себя согласно тождеству

$$x_k\wedge x_k\wedge\cdots\wedge x_k\equiv x_k; \tag{1.3.15}$$

2) взаимно уничтожаются многие одинаковые конъюнкции, вероятности которых имеют различные знаки.

## СХЕМНО-ЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СЭЭС

Схемно-логический метод использует специальную релейно-контактную схему (РКС), являющуюся наглядной графической моделью условий работоспособности системы. Этот метод преобразования ФАЛ для расчета надежности СЭЭС позволяет найти вероятность безотказной работы системы значительно быстрее, чем другие рассмотренные выше методы, так как здесь используется разложение повторной ФАЛ сразу по целой комбинации повторяющихся аргументов и, кроме того, все преобразования проводятся по РКС, что дает возможность избежать многих промежуточных преобразований.

На РКС каждый элемент изображается электрическим контактом, и провода, связывающие элементы, заменяют логические операции И ($\wedge$) и ИЛИ ($\vee$). При таком изображении РКС она всегда получается в виде последовательно-параллельных контактных цепей (а не мостиковых структур) с многими повторяющимися контактами.

РКС дает наглядное представление о комбинации «выгодных» переменных, по которым следует разлагать ФАЛ, и о наиболее целесообразной последовательности преобразований, которая приводит схему к простейшему виду.

Для упрощения графической части работы условимся контакты на схемах не изображать и обозначать их не буквами $x_i$ и $x_i'$, а просто номерами: $i$ (замыкающий) и $i'$ (размыкающий), как это показано на рис. 1.3.5, *а*. На рис. 1.3.5, *б—и* дана графическая иллюстрация некоторых соотношений алгебры логики с помощью РКС.

После этих замечаний сформулируем алгоритм схемно-логического метода преобразования ФАЛ для расчета надежности СЭЭС:

1. По условиям работоспособности системы, записанным в виде (1.3.2) или (1.3.3), изображаем РКС. При этом контакты, входящие одновременно в несколько параллельных цепей, выносим в общую для них последовательную цепь.

2. Выбираем для вынесения в последовательную цепь такую комбинацию контактов, которая обеспечивает размыкание всех или большей части параллельных цепей РКС. После вынесения группы из $r$ контактов РКС распадается на $2^r$ параллельных схем.

3. В каждой из $2^r$ полученных параллельных схем производим преобразования, а именно: контакты, одинаковые с вынесенными, замыкаем, а отрицания вынесенных контактов размыкаем.

4. В схемах, полученных в результате преобразований, удаляем все разомкнутые цепи и заменяем все группы контактов, оказавшиеся короткозамкнутыми, проводом (линией). Кроме того, контакты, имеющиеся во всех параллельных

цепях, выносим в общую последовательную цепь, а цепи, поглощаемые другими, параллельными им цепями, удаляем.

5. Изучаем каждую из $2^r$ преобразованных, как указано в п. 4, схем. Если схема оказалась постоянно-разомкнутой, она из дальнейшего рассмотрения исключается, если же схема оказалась постоянно-замкнутой, она дальнейшим преобразованиям не подвергается.

Процесс преобразования схемы, оказавшейся бесповторной, на этом также заканчивается. Бесповторную функцию, соответствующую данной схеме, записываем в конъюнктивной форме.

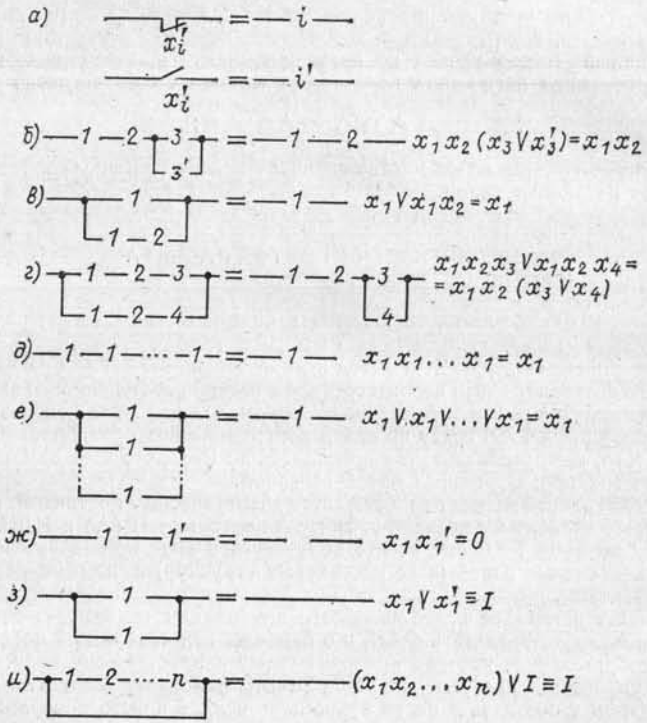



Рис. 1.3.5. Графическая иллюстрация некоторых соотношений алгебры логики с помощью РКС.

Если схема не является бесповторной, переходим к п. 2 и производим дальнейшие преобразования в соответствии с пп. 2, 3, 4 и 5.

6. По полученным в результате преобразований схемам записываем ФАЛ.

7. От ФАЛ переходим к ВФ и по ней вычисляем вероятность безотказной работы системы как вероятность равенства ФАЛ единице.

Переход от ФАЛ к ВФ осуществляется по следующим правилам:

1. Каждая буква в ФАЛ заменяется вероятностью ее равенства единице, причем

$$P\{x_i = 1\} = R_i;\ P\{x_i' = 1\} = P\{x_i = 0\} = 1 - R_i = Q_i. \qquad (1.3.16)$$

2. Отрицание функции заменяется разностью между единицей и вероятностью равенства этой функции единице, например:

$$P\{f(x_1, \ldots, x_7) = \{(x_1x_2)'\,(x_3x_4)'\,[x_5\,(x_6'x_7')']'\}' = 1\} =$$
$$= 1 - (1 - R_1R_2)\,(1 - R_3R_4)\,[1 - R_5\,(1 - Q_6Q_7)]. \qquad (1.3.17)$$



3. Знаки логического умножения и сложения заменяются знаками арифметического умножения и сложения:

$$P\left\{K = \bigwedge_{i=1}^{r} x_i^{\alpha_i}\right\} = \prod_{i=1}^{r} P\left\{x_i^{\alpha_i}\right\}; \qquad (1.3.18)$$

$$P\left\{D = \bigvee_{i=1}^{n} K_i\right\} = \sum_{i=1}^{n} P\{K_i\}, \qquad (1.3.19)$$

где $x_i^{\alpha_i}$ — события, независимые в совокупности; $K_i$ — ортогональные конъюнкции, $n = 2^r$ — число параллельных схем РКС.

## § 1.3.4. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОЧНЫХ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

Для иллюстрации изложенных методов рассчитаем вероятность безотказной работы СЭЭС, изображенной на рис. 1.3.2.

### ТАБЛИЧНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СЭЭС

1. Записываем условие работоспособности этой системы (1.3.4).

2. Составляем расчетную таблицу (табл. 1.3.1) в соответствии с изложенными на стр. 72 правилами.

3. Заполняем таблицу в такой последовательности:

а) проставляем знаки × в столбцах 1—4 табл. 1.3.2 на уровне элементов, соответствующих путям успешного функционирования системы:

б) последовательно заполняем столбцы 5—15 табл. 1.3.3 согласно функциям, например:

$$P_1P_2 = (x_1x_3x_5x_7)\,(x_1x_3x_4x_6x_7x_8) = x_1x_3x_4x_5x_6x_7x_8; \qquad (1.3.20)$$

в) вычеркиваем из табл. 1.3.3 одинаковые конъюнкции, вошедшие в нее с разными знаками.

Полученная таблица (табл. 1.3.4) позволяет произвести непосредственное вычисление вероятности безотказной работы системы путем перемножения в каждом столбце тех вероятностей $R_{x_k}$, которые оказались отмеченными крестиками ×. Аналитическое выражение для вычисления вероятности безотказной работы всей системы $R_c$ имеет вид

$$R_c = R_{x_1}R_{x_3}R_{x_5}R_{x_7} + R_{x_1}R_{x_3}R_{x_4}R_{x_6}R_{x_7}R_{x_8} +$$
$$+ R_{x_2}R_{x_4}R_{x_6}R_{x_7} + R_{x_2}R_{x_3}R_{x_4}R_{x_5}R_{x_7}R_{x_8} - R_{x_1}R_{x_3}R_{x_4}R_{x_5}R_{x_6}R_{x_7}R_{x_8} -$$
$$- R_{x_1}R_{x_2}R_{x_2}R_{x_4}R_{x_5}R_{x_6}R_{x_7} - R_{x_1}R_{x_2}R_{x_3}R_{x_4}R_{x_5}R_{x_7}R_{x_8} -$$
$$- R_{x_1}R_{x_2}R_{x_3}R_{x_4}R_{x_6}R_{x_7}R_{x_8} - R_{x_2}R_{x_3}R_{x_4}R_{x_5}R_{x_6}R_{x_7}R_{x_8} +$$
$$+ 2\,(R_{x_1}R_{x_2}R_{x_3}R_{x_4}R_{x_5}R_{x_6}R_{x_7}R_{x_8}), \qquad (1.3.21)$$

причем если все $R_{xk}$ одинаковы и равны $R$, то

$$R_c = 2R^4 + 2R^6 - 5R^7 + 2R^8. \qquad (1.3.22)$$

*Таблица 1.3.1*

**Таблица для расчета надежности СЭЭС по схеме на рис. 1.3.2**

| $R_{x_k}$ | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | $P_4$ | $P_1P_2$ | $P_1P_3$ | $P_1P_4$ | $P_2P_3$ | $P_2P_4$ | $P_3P_4$ | $P_1P_2P_3$ | $P_1P_2P_4$ | $P_1P_3P_4$ | $P_2P_3P_4$ | $P_1P_2P_3P_4$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | + | | | | − | | | | | | + | | | | − |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| $R_{x_1}$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| $R_{x_2}$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| $R_{x_3}$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| $R_{x_4}$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| $R_{x_5}$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| $R_{x_6}$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| $R_{x_7}$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| $R_{x_8}$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| $R_c$ | | | | | | | | | | | | | | | |

*Таблица 1.3.2*

**Первый пример заполнения расчетной таблицы 1.3.1**

| $R_{x_k}$ | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | $P_4$ | $P_1P_2$ | $P_1P_3$ | $P_1P_4$ | $P_2P_3$ | $P_2P_4$ | $P_3P_4$ | $P_1P_2P_3$ | $P_1P_2P_4$ | $P_1P_3P_4$ | $P_2P_3P_4$ | $P_1P_2P_3P_4$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | + | | | | − | | | | | | + | | | | − |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| $R_{x_1}$ | × | × | — | — | | | | | | | | | | | |
| $R_{x_2}$ | — | — | × | × | | | | | | | | | | | |
| $R_{x_3}$ | × | × | — | × | | | | | | | | | | | |
| $R_{x_4}$ | — | × | × | × | | | | | | | | | | | |
| $R_{x_5}$ | × | — | — | × | | | | | | | | | | | |
| $R_{x_6}$ | — | × | × | — | | | | | | | | | | | |
| $R_{x_7}$ | × | × | × | × | | | | | | | | | | | |
| $R_{x_8}$ | — | × | — | × | | | | | | | | | | | |
| $R_c$ | | | | | | | | | | | | | | | |



*Таблица 1.3.3*

**Второй пример заполнения расчетной таблицы 1.3.1**

| $R_{x_k}$ | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | $P_4$ | $P_1P_2$ | $P_1P_3$ | $P_1P_4$ | $P_2P_3$ | $P_2P_4$ | $P_3P_4$ | $P_1P_2P_3$ | $P_1P_2P_4$ | $P_1P_3P_4$ | $P_2P_3P_4$ | $P_1P_2P_3P_4$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | − | | | | − | | | | | | + | | | | − |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| $R_{x_1}$ | × | × | — | — | × | × | × | × | × | — | × | × | × | × | × |
| $R_{x_2}$ | — | — | × | × | — | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| $R_{x_3}$ | × | × | — | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| $R_{x_4}$ | — | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| $R_{x_5}$ | × | — | — | × | × | × | × | — | × | × | × | × | × | × | × |
| $R_{x_6}$ | — | × | × | — | × | × | — | × | × | × | × | × | × | × | × |
| $R_{x_7}$ | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| $R_{x_8}$ | — | × | — | × | × | — | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| $R_c$ | | | | | | | | | | | | | | | |

*Таблица 1.3.4*

**Таблица для расчета надежности СЭЭС по схеме на рис. 1.3.2 с вычеркнутыми конъюнкциями**

| $R_{x_k}$ | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | $P_4$ | $P_1P_2$ | $P_1P_3$ | $P_1P_4$ | $P_2P_3$ | $P_2P_4$ | $P_3P_4$ | $P_1P_2P_3$ | $P_1P_2P_4$ | $P_1P_3P_4$ | $P_2P_3P_4$ | $P_1P_2P_3P_4$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | + | | | | − | | | | | | + | | | | − |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| $R_{x_1}$ | × | × | — | — | × | × | × | × | | — | | × | × | | |
| $R_{x_2}$ | — | — | × | × | — | × | × | × | | × | | × | × | | |
| $R_{x_3}$ | × | × | — | × | × | × | × | × | | × | | × | × | | |
| $R_{x_4}$ | — | × | × | × | × | × | × | × | | × | | × | × | | |
| $R_{x_5}$ | × | — | — | × | × | × | × | — | | × | | × | × | | |
| $R_{x_6}$ | — | × | × | — | × | × | — | × | | × | | × | × | | |
| $R_{x_7}$ | × | × | × | × | × | × | × | × | | × | | × | × | | |
| $R_{x_8}$ | — | × | — | × | × | — | × | × | | × | | × | × | | |
| $R_c$ | $R^4$ | $R^6$ | $R^4$ | $R^6$ | $R^7$ | $R^7$ | $R^7$ | $R^7$ | | $R^7$ | | $R^8$ | $R^8$ | | |

## СХЕМНО-ЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СЭЭС

Уравнение работоспособности (1.3.5) рассматриваемой системы отображается релейно-контактной схемой, изображенной на рис. 1.3.6.

На схеме контакт *7*, имеющийся во всех параллельных цепях, вынесен в общую для них последовательную цепь. Кроме того, в последовательные цепи вынесены контакты *1*, *3* и *2*, *4*.

В соответствии с алгоритмом преобразования применим разложение схемы по контактам (переменным) *5*, *6*, которые входят во все параллельные цепи. Так как число $r$ выносимых контактов равно двум, то можно составить четыре ортогональные конъюнкции:

$$x_5'x_6';\ x_5'x_6;\ x_5x_6';\ x_5x_6.$$

При вынесении контактов *5′* и *6′* и размыкании в РКС контактов *5* и *6* схема (рис. 1.3.2, *а*) превращается в постоянно-разомкнутую цепь (рис. 1.3.7, *а*). Схемы на рис. 1.3.7, *б* и *в* после вынесения

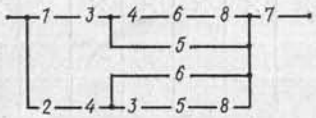



Рис. 1.3.6. Релейно-контактная схема функции (1.3.5).

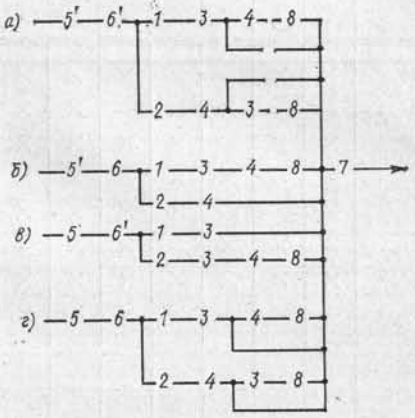



Рис. 1.3.7. Графическая иллюстрация разложения схемы, приведенной на рис. 1.3.2, по аргументам $x_5, x_6$.

контактов *4* и *3* в общую последовательную цепь с контактами *5′ 6* и *5*, *6′* соответственно также станут бесповторными. В схеме на рис. 1.3.7, *г* контакты *4*, *8* и *3*, *8* оказались короткозамкнутыми, и оставшаяся часть схемы после удаления этих контактов будет также бесповторной.

По схемам на рис. 1.3.7, *б—г* запишем ФАЛ в виде суммы трех ортогональных слагаемых, заменив цифры соответствующими переменными:

$$y(x_1, \ldots, x_8) = \left|\begin{array}{l|l} x_4x_5'x_6x_7 & x_2 \\ & x_1x_3x_8 \\ \hline x_3x_5x_6'x_7 & x_1 \\ & x_2x_4x_8 \\ \hline x_5x_6x_7 & x_1x_3 \\ & x_2x_4 \end{array}\right|. \qquad (1.3.23)$$

От полученной ФАЛ перейдем к вероятностной функции

$$P\{y(x_1, \ldots, x_8) = 1\} = R_c = R_{x_4}Q_5R_{x_6}R_{x_7}[1 - Q_2(1 - R_{x_1}R_{x_3}R_{x_8})] + \\ + R_{x_3}R_{x_5}Q_6R_{x_7}[1 - Q_1(1 - R_{x_2}R_{x_4}R_{x_8})] + \\ + R_{x_5}R_{x_6}R_{x_7}[1 - (1 - R_{x_1}R_{x_3})(1 - R_{x_2}R_{x_4})]. \qquad (1.3.24)$$

При $R_{x_1} = R_{x_2} = \cdots = R_{x_8}$ выражение (1.3.24) принимает вид (1.3.22).

Из приведенных примеров видно, что при использовании табличного метода получение полинома (1.3.22) сводится к механическому подсчету степеней при $R$ и приведению подобных членов (см. табл. 1.3.4).



Использованный в обоих методах прием, позволяющий получить полином вида $R_c = \sum_i aR^i$ при условии равной надежности всех элементов, является одним из методов исследования свойств функции безотказности. Полученный полином позволяет также проконтролировать правильность решения задачи.

## НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ МЕТОДОМ НЕСОВМЕСТНЫХ ГИПОТЕЗ

Метод несовместных гипотез, описанный в [52, § 23], является своеобразной модификацией метода разрезания. В то же время данный метод может рассматриваться и как модификация схемно-логического метода расчета надежности СЭЭС, в котором тоже формируются несовместные гипотезы по некоторому набору аргументов функции $y(x_1, \ldots, x_m)$ и так же в несколько этапов производится ее разложение (в сложных задачах).

Различие между указанными методами состоит в том, что при использовании метода разрезания и схемно-логического метода несовместные гипотезы формируются в определенном смысле механически, а при использовании метода несовместных гипотез их нужно каждый раз формулировать по содержанию задачи, т. е. осмысленно. В первом случае формализация задачи легко отделима от ее решения и может выполняться разными людьми, причем для тех, кто занимается ее решением, необязательно даже знание самой системы. Во втором случае всю работу от начала до конца должны выполнять специалисты, хорошо знающие исследуемую систему, ее структуру, особенности функционирования.

## § 1.3.5. ПРИБЛИЖЕННЫЙ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СЭЭС С УЧЕТОМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Реальные СЭЭС являются восстанавливаемыми системами с резервированием и разнотипными элементами. Поэтому расчет их характеристик надежности представляет еще более сложную задачу по сравнению с рассмотренными выше. При построении математической модели сложной системы получаются весьма общие схемы массового обслуживания, трудно поддающиеся аналитическому исследованию. С другой стороны, на практике абсолютная точность решения системы и не нужна, а удовлетворительную точность можно получить, пользуясь приближенными формулами и оценками.

Рассмотрим математические основы методики приближенной оценки надежности СЭЭС, минуя точное решение. Отметим, что основные затруднения при использовании этого метода обусловлены мостиковой структурой СЭЭС, резервированием и разнотипностью элементов.

Прежде всего для исследуемой системы необходимо составить условия ее работоспособности, выраженные через конъюнкцию отрицаний всех минимальных сечений отказов типа (1.3.3)

$$y_c(x_1, \ldots, x_m) = \bigwedge_{j=1}^{n} S_j' = \bigwedge_{j=1}^{n} \Big[ \bigwedge_{k \notin K_{S_j}} x_k \Big]. \qquad (1.3.25)$$

Затем следует упростить ФАЛ (1.3.25) с помощью операции вынесения за скобки одинаковых членов в некоторых конъюнкциях. При вынесении за скобки общих аргументов необходимо сохранить конъюнктивную форму записи функции $y_c$. Иначе говоря, при этом преобразовании ФАЛ следует от (1.3.25) перейти к конъюнкции ДНФ ($З_i$), которые называются з в е н ь я м и с х е м ы ненадежности системы:

$$y_c(x_1, \ldots, x_m) = \bigwedge_{j=1}^{n} S_j' = \bigwedge_{i=1}^{r} З_i, \qquad (1.3.26)$$

где $r$ — число звеньев ($r \leqslant n$).

Последовательно-параллельную структурную схему, соответствующую функции $\bigwedge_{i=1}^{r} Э_i$, назовем **схемой ненадежности** системы. Отличительной особенностью этой схемы является последовательное соединение звеньев, составленных из всевозможных минимальных наборов элементов, одновременный отказ которых приводит к отказу всей системы. При этом структура самого звена представляет собой параллельное соединение цепей, состоящих из строго последовательно соединенных элементов.

Функция $y_c(x_1, \ldots, x_m)$ в форме (1.3.26) является, как правило, повторной ФАЛ. Пренебрегая зависимостью отказов звеньев схемы ненадежности (из-за повторности ФАЛ), можно определить вероятность ее безотказной работы $R_{с.н}$ по формуле

$$R_{с.н} = \prod_{i=1}^{r} R_{Э_i}, \qquad (1.3.27)$$

где $R_{Э_i}$ — вероятность безотказной работы $i$-го звена $Э_i$.

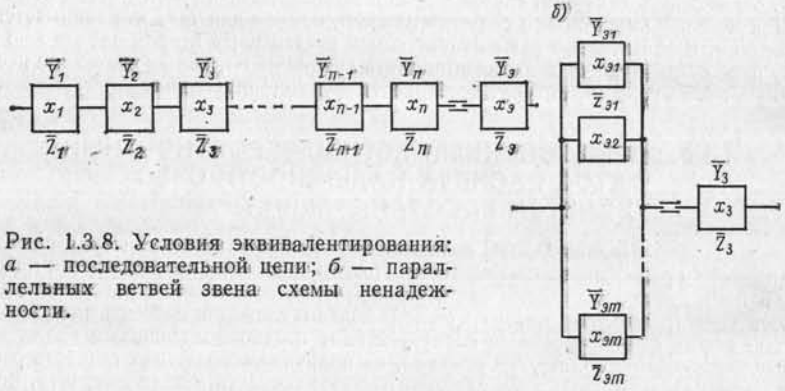



Рис. 1.3.8. Условия эквивалентирования: *а* — последовательной цепи; *б* — параллельных ветвей звена схемы ненадежности.

Расчет надежности СЭЭС по формуле (1.3.27) несколько занижает вероятность исправной работы систем по сравнению с точным значением этой вероятности, и ошибка расчета, таким образом, идет в запас надежности. Задача состоит в том, чтобы получить расчетные формулы, позволяющие определять вероятности $R_{Э_i}$ с учетом восстановления элементов системы.

Функции $Э_i$ представляют собой простые параллельные структуры, соответствующие нагруженному резервированию, а в последовательных цепях находятся, как правило, разнотипные элементы.

Указанная задача, таким образом, делится на две частные:

1) по известным характеристикам безотказности и восстанавливаемости $k = x$ элементов (а именно, по среднему времени наработки на отказ $\overline{Y}_k$ и среднему времени восстановления $\overline{Z}_k$ — см., например, рис. 1.3.8), находящихся в последовательной цепи звена, состоящего из $n$ элементов, оценить соответствующие характеристики этой цепи $\overline{Y}_э$ и $\overline{Z}_э$ — среднее время наработки и восстановления одного условного элемента $x_э$, являющегося эквивалентным последовательной цепочке из $n$ элементов;

2) по найденным характеристикам последовательных цепей $\overline{Y}_э$ и $\overline{Z}_э$ для $m$ параллельных ветвей (рис. 1.3.8) оценить надежность всего звена $\overline{Y}_з$ и $\overline{Z}_з$.



Расчетные формулы имеют вид

$$\overline{Y}_э = \frac{1}{\sum_{k=1}^{n} (\overline{Y}_k)^{-1}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{n} \lambda_k}, \qquad (1.3.28)$$

а соответствующая интенсивность отказов элемента $x_э$ —

$$\lambda_э = \frac{1}{\overline{Y}_э} = \sum_{k=1}^{n} \lambda_k. \qquad (1.3.29)$$

Если предположить, что в период ремонта одного из элементов цепочки отказы других элементов невозможны (случай, весьма распространенный на практике), то интенсивность восстановления эквивалентного элемента $x_э$ будет равна

$$\nu_э = \frac{1}{\overline{Z}_э} = \left[\sum_{k=1}^{n} \lambda_k + \sum_{k=1}^{n} \rho_k \left(\sum_{k=1}^{n} \lambda_i - \lambda_k\right)\right] \left(\sum_{k=1}^{n} \rho_k\right)^{-1}, \qquad (1.3.30)$$

где $\rho_k$ — коэффициент неисправности элемента $x_k$, равный

$$\rho_k = \frac{\overline{Z}_k}{\overline{Y}_k}. \qquad (1.3.31)$$

Расчетная формула для определения $\overline{Z}_з$ имеет вид

$$\overline{Z}_з = \frac{1}{\sum_{j=1}^{m} (\overline{Z}_{эj})^{-1}} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{m} \nu_{эj}}, \qquad (1.3.32)$$

а соответствующая интенсивность восстановления —

$$\nu_з = \sum_{j=1}^{m} \nu_{эj}. \qquad (1.3.33)$$

Среднее время исправной работы звена определяется выражением

$$\overline{Y}_з = \frac{\prod_{j=1}^{m} (1 + \rho_{эj}) \rho_{эj}^{-1}}{\sum_{j=1}^{m} \nu_{эj}}, \qquad (1.3.34)$$

где

$$\rho_{эj} = \frac{\overline{Z}_{эj}}{\overline{Y}_{эj}}; \quad \lambda_з = \frac{1}{\overline{Y}_з} = \frac{\sum_{j=1}^{m} \nu_{эj}}{\prod_{j=1}^{m} (1 + \rho_{эj}) \rho_{эj}^{-1} - 1}, \qquad (1.3.35)$$

а коэффициент неисправности звена —

$$\rho_з = \frac{\overline{Z}_з}{\overline{Y}_з} = \frac{\lambda_з}{\nu_з} = \frac{1}{\prod_{j=1}^{m} (1 + \rho_{эj}) \rho_{эj}^{-1} - 1}. \qquad (1.3.36)$$

Принимая допущения об экспоненциальном законе распределения случайных величин $Y_k$ и $Z_k$, будем иметь простейший суммарный поток восстановления. На

этом основании вероятность безотказной работы $i$-го звена схемы ненадежности равна

$$R_{Зi}(i) = \exp(-\lambda_{Зi} t), \tag{1.3.37}$$

а для всей схемы ненадежности —

$$R_{с.н}(t) = \prod_{i=1}^{r} \exp(-\lambda_{Зi} t), \tag{1.3.38}$$

или

$$\ln R_{с.н}(t) = -t \sum_{i=1}^{r} \lambda_{Зi}. \tag{1.3.39}$$

Функция готовности системы $K_г$, стационарное значение которой принято называть коэффициентом готовности восстанавливаемой системы, может быть получена с помощью формулы

$$K_г = \prod_{i=1}^{r} \frac{\overline{Y}_{Зi}}{\overline{Y}_{Зi} + \overline{Z}_{Зi}} = \prod_{i=1}^{r} \frac{\nu_{Зi}}{\lambda_{Зi} + \nu_{Зi}} \approx \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{r} \rho_{Зi}}. \tag{1.3.40}$$

При малых значениях $\sum_{i=1}^{r} \rho_{Зi}$ может быть использовано еще более простое выражение:

$$K_г \approx 1 - \sum_{i=1}^{r} \rho_{Зi}. \tag{1.3.41}$$

———— * ————

В настоящей главе изложены только ручные методы расчета. Как видно из примеров, расчет надежности даже сравнительно простых СЭЭС требует значительных затрат времени, глубокого понимания режимов функционирования системы, большого внимания при выполнении преобразований ФАЛ и проведении математических выкладок. При увеличении числа элементов и усложнении структуры системы значительно возрастают как временные затраты, так и трудности, связанные с формализацией задачи и математическими выкладками.

В общем случае с целью обеспечения высокой эффективности расчетных работ рекомендуется разделить расчеты на следующие этапы (к выполнению работ на этих этапах следует привлекать специалистов различного уровня квалификации):

1) анализ функциональных связей системы, формулировка задач и условий работоспособности (выполняется специалистом, в совершенстве знающим объект исследования);

2) формализация условий работоспособности и их преобразование для последующего перехода к вероятностным функциям (выполняется специалистом, хорошо знающим основы теории надежности, умеющим формализовать условия работоспособности и производить преобразование ФАЛ);

3) преобразование ФАЛ к ВФ и получение количественных оценок показателей надежности системы (выполняется специалистом, владеющим аппаратом теории вероятностей и математической статистики).

При выполнении расчетов следует иметь в виду, что условной ориентировочной границей практического использования ручных методов являются системы с мостиковой структурой, состоящие из 20—25 структурных элементов. Расчет более сложных в структурном отношении систем целесообразно вести машинными методами, которые в данной главе из-за ограниченности ее объема не представлены.



# Глава 1.4. ЭЛЕКТРОПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТЬ НА СУДАХ

## § 1.4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Безопасная эксплуатация СЭЭС обеспечивается комплексом организационных и технических мероприятий. Организационные мероприятия (подготовка обслуживающего персонала, допуск к обслуживанию лиц, имеющих соответствующую квалификацию, организация ремонтных и наладочных работ и др.), а также ряд технических мер защиты, не нашедших по ряду причин применения в СЭЭС (защитное отключение, компенсация емкостной составляющей тока утечки на землю и др.), в настоящем справочнике не рассматриваются.

Отдельные технические меры защиты, такие как защита от токов короткого замыкания, контроль сопротивления изоляции, блокировки, защитное ограждение токоведущих частей, описываются в соответствующих разделах, главах и параграфах настоящего справочника.

В данной главе рассматриваются некоторые основные вопросы электробезопасности на судах и технические меры защиты по обеспечению безопасной эксплуатации судового электрооборудования. Положения настоящей главы распространяются на системы переменного тока с изолированной нейтралью, а также на изолированные от корпуса судна двухпроводные системы переменного и постоянного тока.

## § 1.4.2. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В СЭЭС питание различных электрифицированных систем, механизмов и устройств осуществляется, как правило, от изолированных от корпуса судна сетей:

двухпроводных постоянного тока напряжением 12, 24, 110 и 220 В и однофазных переменного тока частотой 50 и 400 Гц, напряжением преимущественно 12 и 24 В, а также частотой 200 Гц (для электроинструмента), напряжением 36 В;

трехфазных переменного тока частотой 50 и 400 Гц, напряжением 127, 220 и 380 В.

Условия безопасности при эксплуатации электрооборудования, получающего питание от указанных сетей, будут различными. Они определяются в основном величиной и временем протекания тока, родом тока (постоянный, переменный различной частоты), путями протекания тока через тело человека. Чаще всего электротравмы в СЭЭС возникают при случайном прикосновении человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением, либо прикосновении к металлическим корпусам или частям, оказавшимся под напряжением вследствие повреждения изоляции или по другим причинам (рис. 1.4.1 и 1.4.2). При этом рассматривается только однофазное (однополюсное) прикосновение, так как случаи прикосновения человека к двум фазам (полюсам) редки и не являются определяющими при оценке условий электробезопасности электрических установок.

Выражения, определяющие силу тока (в амперах), проходящего через тело человека, в случае однофазного (однополюсного) прикосновения при условии равенства активной составляющей сопротивления изоляции и емкости фаз сети относительно корпуса судна, имеют вид:

в двухпроводной изолированной сети постоянного тока

$$I_r = \frac{\dot{U}_л}{2R_ч + r_{из}};$$

в двухпроводной изолированной сети переменного тока

$$I_ч = \frac{\dot{U}_ф}{2R_ч \sqrt{1 + \frac{r_{из}(4R_ч + r_{из})}{4R^2(1 + r^2\omega^2c^2)}}};$$

в трехфазной изолированной сети переменного тока

$$I_ч = \frac{\dot{U}_ф}{R_ч \sqrt{1 + \frac{r_{из}(6R_ч + r_{из})}{9R^2(1 + r^2\omega^2c^2)}}};$$

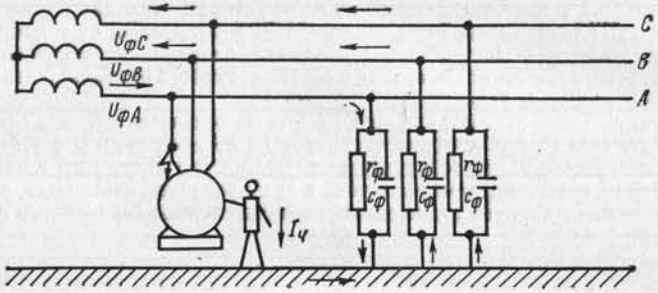



Рис. 1.4.1. Схема протекания тока при прикосновении человека к незаземленному корпусу электрического устройства, оказавшемуся под напряжением, в трехфазной сети переменного тока.

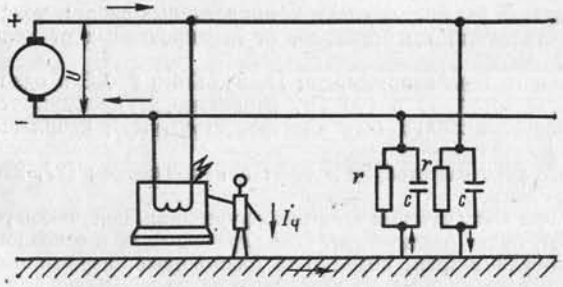



Рис. 1.4.2. Схема протекания тока при прикосновении человека к незаземленному корпусу электрического устройства, оказавшемуся под напряжением, в двухпроводной сети постоянного (переменного) тока.

в трехфазной изолированной сети переменного тока при условии $c_1 = c_2 = c_3 = 0$

$$I_ч' = \frac{3\dot{U}_ф}{3R_ч + r_{из}},$$

где $\dot{U}_ф$ — фазное напряжение, В; $R_ч$ — активная составляющая сопротивления тела человека, Ом; $r_{из} = r_1 = r_2 = r_3$ — активные составляющие сопротивления изоляции фаз, Ом; $c = c_1 = c_2 = c_3$ — емкости фаз сети относительно корпуса судна, Ф; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота переменного тока, равная 314.

Безопасная эксплуатация СЭЭС обеспечивается в том случае, если значение тока $I_ч$ будет меньше значения допустимого для человека тока, безопасного для его жизни и здоровья. Допустимыми для человека в рассматриваемых выше случаях можно принять токи, не превышающие следующих значений [54, 68]:

30 мА при постоянном токе;

6 мА при переменном токе частотой 50 Гц;

8 мА при переменном токе частотой 400 Гц.



Сопротивление тела человека обычно принимается равным 1000 Ом. Расчеты значений токов, проходящих через тело человека, по приведенным выше формулам при различных напряжениях, частотах переменного тока, сопротивлениях изоляции, емкостях сетей и сопротивлении тела человека, равном 1000 Ом, показывают следующее: в трехфазных сетях переменного тока напряжением 380, 220, 127 В, частотой 50 и 400 Гц при емкости сети относительно корпуса, превышающей некоторое предельное значение $C_{пред}$, ток, проходящий через тело человека, при любом сопротивлении изоляции будет больше принятого безопасного значения (6 мА при частоте 50 Гц и 8 мА при частоте 400 Гц). Значения предельных емкостей приведены в табл. 1.4.1.

*Таблица 1.4.1*

**Значения предельных емкостей трехфазных сетей**

| Напряжение сети, В | $C_{пред}$, мкФ, при частоте, Гц | |
|---|---|---|
| | 50 | 400 |
| 380 | 0,029 | 0,0048 |
| 220 | 0,0505 | 0,0084 |
| 127 | 0,088 | 0,0147 |

*Таблица 1.4.2*

**Значения предельных емкостей однофазных (двухпроводных) сетей**

| Напряжение сети, В | $C_{пред}$, мкФ, при частоте, Гц | | |
|---|---|---|---|
| | 50 | 200 | 400 |
| 24 | 1 | — | 0,2 |
| 36 | — | 0,2 * | — |

* Предельная емкость при частоте 200 Гц определена в предположении, что допустимое для человека значение тока такое же, как и при частоте 400 Гц.

Емкости судовых трехфазных сетей переменного тока частотой 50 и 400 Гц, напряжением 380, 220 и 127 В обычно значительно превышают указанные предельные значения [24]. Поэтому прикосновение к токоведущим частям или корпусам электрооборудования, случайно оказавшимся под напряжением, в таких сетях является безусловно опасным.

В однофазных сетях переменного тока частотой 50 и 400 Гц, напряжением 24 В и частотой 200 Гц, напряжением 36 В при емкостях сетей относительно корпуса судна, превышающих указанные в табл. 1.4.2 значения, токи, проходящие через тело человека при однофазном прикосновении, превышают принятые безопасные для человека значения независимо от сопротивления изоляции.

Поскольку емкости таких сетей относительно корпуса судна при использовании помехозащитных конденсаторов могут превышать указанные в табл. 1.4.2 предельные значения, для электрооборудования переменного тока напряжением 24 и 36 В необходимо предусматривать соответствующие меры защиты.

В рассмотренных выше трехфазных и однофазных сетях переменного тока при значениях емкостей относительно корпуса судна, меньших чем указанные в табл. 1.4.1 и 1.4.2, токи, проходящие через тело человека при однофазном прикосновении, будут меньше принятых безопасных значений только при условии, если сопротивления изоляции сетей будут не меньше значений, указанных в табл. 1.4.3.

На рис. 1.4.3 приведены графики, показывающие зависимость тока, проходящего через тело человека (при $R_ч = 1000$ Ом), от сопротивления изоляции при различных значениях емкости в однофазных сетях переменного тока напряжением 12 В, частотой 50 и 400 Гц. Как видно из рисунка, в таких сетях ток, проходящий через тело человека в случае однофазного прикосновения при сопротивлении изоляции более 1 кОм и любых значениях емкости, не превышает принятых безопасных значений.

Кривые зависимости постоянного тока, проходящего через тело человека, от сопротивления изоляции (рис. 1.4.4) показывают, что при напряжениях 12 и 24 В

*Таблица 1.4.3*

**Минимально допустимые сопротивления изоляции сетей переменного тока**

| Напряжение сети, В | $r_{min\ доп}$, кОм, при частоте, Гц | | |
|---|---|---|---|
| | 50 | 200 | 400 |
| 380 | 100 | — | 80 |
| 220 | 60 | — | 45 |
| 127 | 30 | — | 25 |
| 36 | — | 3 | — |
| 24 | 2 | — | 1 |

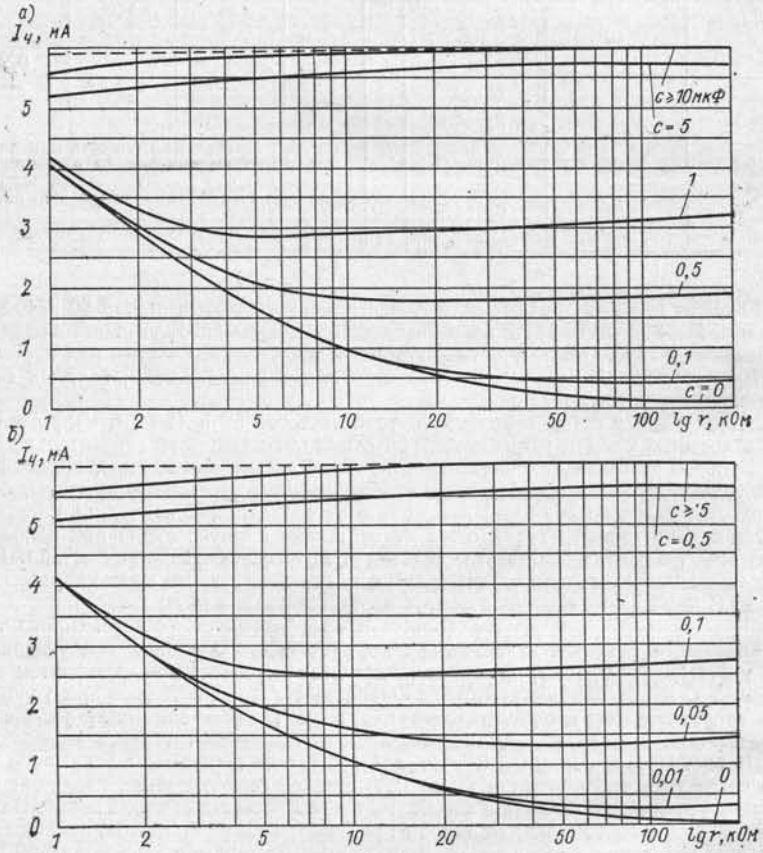



Рис. 1.4.3. Зависимость силы тока, проходящего через тело человека ($R_ч$ = 1000 Ом), от сопротивления изоляции и емкости в однофазных сетях переменного тока напряжением 12 В: *а* — $f$ = 50 Гц; *б* — $f$ = = 400 Гц.



значения токов, протекающих через тело человека, значительно меньше допустимого безопасного значения, а при 110 и 220 В превышают безопасное значение при очень низком (2—6 кОм) сопротивлении изоляции. Учитывая возможность сни-

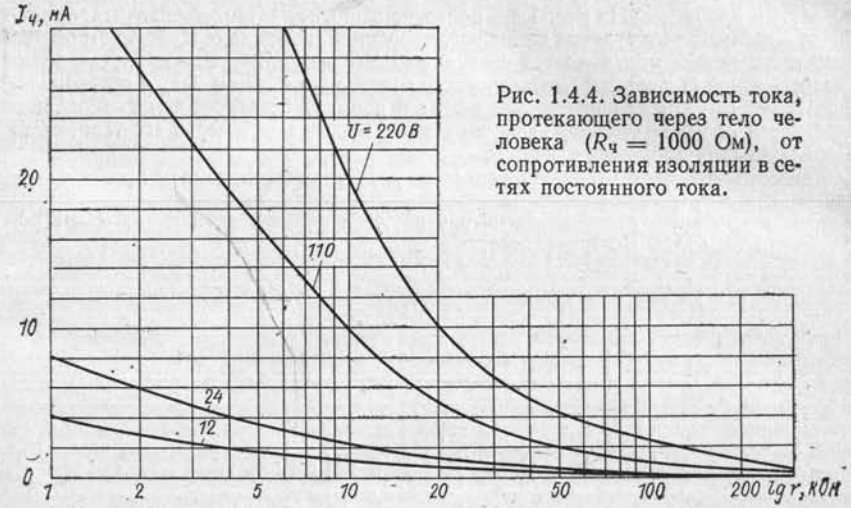



Рис. 1.4.4. Зависимость тока, протекающего через тело человека ($R_ч$ = 1000 Ом), от сопротивления изоляции в сетях постоянного тока.

жения сопротивления изоляции в реальных условиях до значений, близких к указанным, необходимо в сетях постоянного тока напряжением 110 и 220 В предусматривать все необходимые меры защиты.

## § 1.4.3. ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ

«З е м л е й» в судовых условиях при нахождении судна на плаву является металлический корпус судна или магистраль заземления, если корпус судна неметаллический.

М а г и с т р а л ь ю з а з е м л е н и я на судах с неметаллическим корпусом называются соединенные с заземлителем специальные устройства (металлические шины) и (или) доступные по всей длине металлические конструкции, имеющие неразъемное надежное электрическое соединение между собой.

З а з е м л и т е л е м на судах с неметаллическим корпусом является металлический лист (полоса), установленный с наружной стороны корпуса так, чтобы быть погруженным в воду при любых осадке и крене судна.

З а з е м л е н и е м какого-либо элемента судового электрооборудования называется преднамеренное надежное электрическое соединение его с землей.

З а з е м л я ю щ и м п р о в о д н и к о м называется электрический проводник, соединяющий заземляемую часть судового оборудования с землей.

З а м ы к а н и е м н а з е м л ю называется случайное электрическое соединение находящихся под напряжением частей электрической установки с землей или с металлическими конструктивными элементами, электрически соединенными с землей.

В электрических машинах и аппаратах такое замыкание называется з а м ы к а н и е м н а к о р п у с (машины, аппарата).

З а щ и т н ы м з а з е м л е н и е м называется заземление, предназначенное для защиты людей от поражения током при прикосновении их к металлическим частям электрических устройств, которые в нормальных условиях не находятся под напряжением, но могут оказаться под ним вследствие повреждения изоляции или по другим причинам.

В СЭЭС защитное заземление наряду с непрерывным контролем величины сопротивления изоляции является основной защитной мерой от поражения человека при его прикосновении к металлическим частям или корпусам электрооборудования, оказавшимся под напряжением вследствие повреждения изоляции или по другим причинам. На рис. 1.4.5 показано защитное заземление электроприемника, выполненное в судовой сети с изолированной нейтралью. Целью устройства защитного заземления является создание между металлическим корпусом электрооборудования и землей электрического соединения с таким малым сопротивлением, чтобы при прикосновении человека к корпусу электрооборудования, оказавшемуся под напряжением, величина тока, проходящего через его тело, была безопасной для здоровья и жизни.

В СЭЭС защитное заземление согласно действующим правилам предусматривается для электрооборудования:

а) стационарно устанавливаемого с рабочим напряжением свыше 50 В постоянного тока и 30 В переменного;

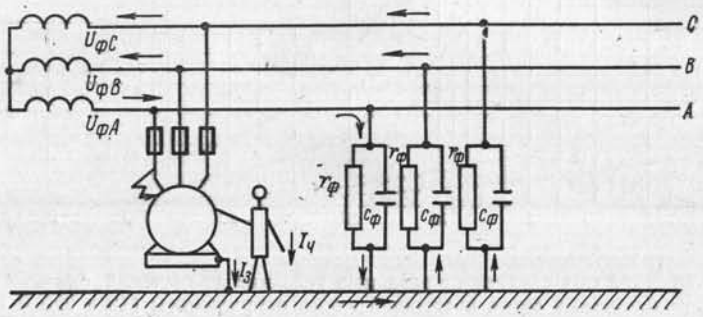



Рис. 1.4.5. Схема заземления корпуса электроприемника и протекания тока в сети переменного тока.

б) переносного с рабочим напряжением свыше 24 В постоянного тока и 12 В переменного.

Электрооборудование, устанавливаемое во взрывоопасных помещениях, заземляется независимо от значения рабочего напряжения. Это вызвано тем, что в этих помещениях возникновение на корпусах электрооборудования электрических потенциалов по отношению к земле может привести к искрению и связанным с ним опасным последствиям.

Заземлению подлежат все доступные для прикосновения металлические части электрооборудования, в нормальных условиях не находящиеся под напряжением, но могущие оказаться под ним вследствие повреждения изоляции или по другим причинам. К таким частям относятся корпуса электрических машин и аппаратов, трансформаторов и приборов, распределительных щитов, установочной арматуры, светильников, металлические оплетки (оболочки) кабелей и др.

Заземление электрооборудования на судах с металлическим корпусом производится на корпус судна, а на судах с неметаллическим корпусом — на магистраль заземления. Магистраль заземления соединяется с заземлителем. В качестве заземлителя используется медный или латунный лист толщиной 2—5 мм и площадью не менее 0,5 м$^2$.

Металлические корпуса стационарно устанавливаемого электрооборудования заземляются одним из следующих способов:

а) с помощью заземляющих проводников (перемычек);

б) с помощью третьей (четвертой) жилы питающего кабеля;

в) путем непосредственного контакта с металлическим корпусом судна или с другими надежно заземленными конструкциями судна.

Металлические оплетки (оболочки) кабелей заземляются, как правило, с помощью заземляющих проводников.



Заземление корпусов электрооборудования посредством заземляющих проводников производится при наличии на них (кроме кабелей) специальных устройств для заземления (винтов или болтов), а также при установке электрооборудования на амортизаторах. При этом предусматривается одна заземляющая перемычка, а для тропических условий при напряжении свыше 250 В — две перемычки. Заземление малогабаритных изделий в тропическом исполнении, у которых по конструктивным соображениям предусмотрен только один винт заземления, осуществляется одной перемычкой независимо от величины напряжения.

Заземление с помощью третьей (четвертой) жилы питающего кабеля применяется для корпусов мелкой установочной арматуры (выключателей, соединительных коробок, светильников и др.) при креплении ее на изоляционной обшивке или электронепроводящей переборке и при наличии внутри таких изделий винта заземления.

В случае установки арматуры на изоляционной обшивке или непроводящей переборке и при отсутствии внутри нее винта заземления допускается в сухих и закрытых помещениях использовать для заземления металлическую оболочку или оплетку кабелей. При этом оболочка или оплетка кабелей заземляется на металлический корпус судна или магистраль заземления в ближайшем удобном для этого месте. Такое заземление не допускается на открытых палубах и в сырых и особо сырых помещениях, так как в этих условиях указанное заземление ненадежно вследствие коррозии и разрушения со временем оплетки (оболочки).

Для взрывозащищенного электрооборудования и арматуры, устанавливаемых во взрывоопасных помещениях, заземление с помощью третьей (четвертой) жилы питающего кабеля является обязательным, причем соединение заземляющей жилы с землей производится во взрывобезопасном помещении.

Заземление корпусов электрооборудования путем непосредственного контакта применяется в том случае, если это электрооборудование не имеет специальных устройств для заземления и устанавливается непосредственно на металлических фундаментах, кронштейнах и прочих надежно заземленных конструкциях судна без использования амортизаторов (кроме случаев установки его на амортизаторах типа АКПО). При этом под одним или двумя крепящими болтами (под лапами) должны быть созданы надежные электрические контакты корпусов электрооборудования с корпусными конструкциями судна, на которых оно устанавливается, не теряющие проводящих качеств за все время эксплуатации устройства.

Для заземления можно использовать все металлические конструкции, имеющие надежное электрическое соединение с металлическим корпусом судна (переборки, кронштейны, фундаменты, бимсы, пиллерсы и др.), за исключением не являющихся частью корпуса судна трубопроводов, цистерн и прочих емкостей с бензином, керосином, нефтью, другими видами жидкого топлива и маслом, а также баллонов для сжатых газов и др.

Способ заземления путем непосредственного контакта не допускается для электрических машин (генераторов, двигателей), так как их работа в составе электромеханизмов сопровождается вибрацией, что может привести со временем к нарушению контакта и недопустимому увеличению его электрического сопротивления. Следует отметить, что заземление путем непосредственного контакта, несмотря на его простоту и удобство, находит на судах все меньшее применение и для другого электрооборудования из-за трудности контроля и поддержания его в надлежащем состоянии в процессе эксплуатации.

Металлические корпуса переносного электрооборудования заземляются с помощью третьей (четвертой) жилы питающего кабеля. Один конец заземляющей жилы соединяется с корпусом переносного прибора, а второй — с заземляющим контактным штифтом штепсельной вилки. Штепсельные вилки и розетки имеют такую конструкцию, что контакт между заземляющим штифтом вилки и заземленным гнездом розетки при включении создается раньше, чем у токоведущих элементов штепсельного соединения, а при отключении разрыв заземляющих контактов происходит позже, чем у токоведущих элементов. Кроме того, исключается возможность случайного включения заземляющего штифта в токоведущее контактное гнездо штепсельной розетки.

Все заземляющие проводники и шины магистрали заземления выполняются из меди или другого антикоррозионного материала. На морских железобетонных

судах и речных судах с железобетонными корпусами в качестве заземляющих проводников и элементов магистрали заземления допускается использовать стальные шины, а также стальные конструкции для прокладки кабелей, стальные переборки и фундаменты.

Медные заземляющие проводники изготовляются из неизолированных гибких жил кабеля, плетенки ПМЛ, антенного канатика, лент и шин. Заземляющие проводники для электрооборудования на судах, предназначенных для эксплуатации в условиях тропического климата, выполняются из неизолированных луженых жил гибкого кабеля, а также луженых лент и шин. Шины магистрали заземления в этом случае также должны быть луженными.

Сечения медных заземляющих проводников выбираются по данным табл. 1.4.4 в зависимости от сечения питающего кабеля, подводимого к электрооборудованию, и суммарной мощности параллельно работающих генераторов судовой электростанции.

**Пример**. Выбрать сечение проводника для заземления электродвигателя мощностью 42 кВт, напряжением 380 В, частотой 50 Гц, получающего питание по кабелю сечением 3×70 мм². Суммарная мощность параллельно работающих генераторов судовой электростанции составляет 3×300 кВт.

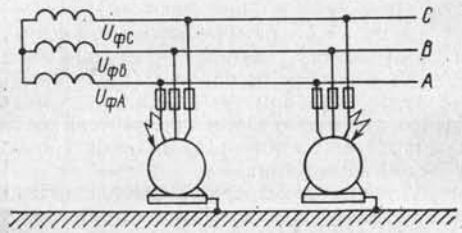



Рис. 1.4.6. Схема двухфазного короткого замыкания через корпус судна в судовой трехфазной сети переменного тока с изолированной нейтралью.

По табл. 1.4.4 находим, что для данных условий сечение заземляющего проводника должно быть не менее 25 мм². По этой же таблице определяем сечение шин магистрали заземления для судов с неметаллическими корпусами.

Выбор заземляющих проводников в зависимости от мощности электроэнергетической установки и сечения кабеля, подводимого к заземляющему электрооборудованию, связан с тем, что в судовых сетях, несмотря на эффективный контроль сопротивления изоляции, отыскать и устранить его в короткое время не всегда оказывается возможным. Поэтому такое однофазное замыкание может сохраняться относительно длительное время. В случае возникновения за этот промежуток времени второго замыкания на землю другой фазы (полюса) возникает двухфазное короткое замыкание через корпус судна (рис. 1.4.6), которое отключается защитой. Поэтому заземляющие проводники должны иметь сечение, достаточное для пропускания кратковременного тока короткого замыкания без чрезмерного нагрева и разрушения. Приведенная выше таблица для выбора сечений заземляющих проводников и шин магистралей заземления составлена с учетом этих условий.

Кроме того, при выборе заземляющих проводников принимается во внимание их механическая прочность, а при выборе шин магистрали заземления — также и возможность их надежного закрепления. По этим условиям сечение заземляющих проводников должно быть не менее 4 мм², а шин магистрали заземления — не менее 35 мм² при ширине не менее 35 мм. Для установочной арматуры сетей освещения, аппаратуры внутренней связи и сигнализации и аппаратуры слабого тока допускается использование заземляющих проводников с минимальным сечением 2,5 мм².

При существующих мощностях судовых электроэнергетических установок напряжением до 380 В применение неизолированных заземляющих проводников (исходя из условия пропускания кратковременных токов короткого замыкания) сечением более 70 мм² не требуется.

Выбор сечений третьей (четвертой) заземляющей жилы в кабеле отличается от описанного выше, поскольку питающие жилы изолированы и температура их нагрева кратковременным током короткого замыкания ограничивается величиной, допустимой для изоляции. Сечение заземляющей жилы в данном случае при-



*Таблица 1.4.4*

**Сечения медных заземляющих проводников**

| Суммарная мощность параллельно работающих генераторов судовой электростанции, кВт | Поперечное сечение, мм² | | |
|---|---|---|---|
| | жилы кабеля, питающего потребитель | минимальное заземляющего проводника | шины магистрали заземления для судов с неметаллическими корпусами |
| До 400 | До 10 | Равное сечению жилы питающего кабеля, но не менее 4 | 35 |
| | Более 10 | 10 | |
| От 401 до 800 | До 16 | Равное сечению жилы питающего кабеля, но не менее 4 | 35 |
| | Более 16 | 16 | |
| От 801 до 1200 | До 25 | Равное сечению жилы питающего кабеля, но не менее 4 | 35 |
| | Более 25 | 25 | |
| От 1201 до 2000 | До 35 | Равное сечению жилы питающего кабеля, но не менее 4 | 50 |
| | Более 35 | 35 | |
| Более 2000 | До 35 | Равное сечению жилы питающего кабеля, но не менее 4 | 70 |
| | Более 35 до 70 | 35 | |
| | Более 70 до 120 | 50 | |
| | Более 120 | 70 | |

Примечание. Сечения заземляющих проводников для заземления ГРЩ, генераторов, гребных электродвигателей, палубных механизмов и устройств должны быть равны: а) для генераторов и ГРЩ — половине сечения генераторного фидера, но не более 70 мм²; б) для гребных электродвигателей, палубных механизмов и устройств — половине сечения их питающего фидера, но не менее 70 мм².

нимается равным сечению питающей жилы до 16 мм² включительно и половине (но не менее 16 мм²) сечения питающей жилы, если оно превышает 16 мм².

Заземляющие проводники и шины магистрали заземления из любого другого материала должны иметь такие сечения, чтобы проводимость их была не ниже проводимости соответствующих медных проводников.

Установка выключателей и предохранителей в заземляющих проводниках не допускается. Нельзя также включать в заземляющий проводник несколько последовательно заземляемых корпусов электрооборудования, кроме случая заземления мелкой установочной и осветительной арматуры с помощью третьей жилы.

Конструктивно выполнение защитного заземления корпусов электрооборудования зависит от наличия или отсутствия на них специальных устройств для заземления, от установки электрооборудования на амортизаторах или без них, от крепления его к металлической или неметаллической конструкции, а также к металлической конструкции при наличии изоляции и обшивки.

Подключение заземляющих проводников к корпусам электрооборудования и металлическому корпусу судна производится посредством специальных деталей (бонок, шпилек, планок, стоек и т. п.). Указанные детали, привариваемые к корпусу судна, изготовляются из материала, аналогичного материалу корпуса.

При отсутствии на корпусах электрооборудования специальных устройств для защитного заземления последнее осуществляется в узлах крепления. Конструкция узлов крепления и заземления электрооборудования, а также требования к их монтажу приведены в третьем томе настоящего справочника.

## § 1.4.4. ЭЛЕКТРОПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТЬ СУДОВОГО ПЕРЕНОСНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

К судовому переносному электрооборудованию относятся потребители, присоединяемые к сети с помощью гибких проводов (кабеля или шнура) через штепсельные розетки. На судах применяется большое количество таких потребителей электроэнергии, и число их продолжает увеличиваться в связи с тем, что вопросам улучшения обитаемости судна и создания комфорта личному составу и пассажирам уделяется все больше внимания.

Переносное электрооборудование является более опасным с точки зрения электропожароопасности, чем стационарно установленное, так как чаще подвергается различным повреждениям. Эта опасность усугубляется также тем, что человек, как правило, периодически находится с ним в относительно длительном контакте. В этом отношении наибольшую опасность представляют переносный электроинструмент, ручные светильники, электробритвы и т. п. Поэтому к ним должны предъявляться повышенные требования электропожаробезопасности.

В табл. 1.4.5 приведены: классификация по назначению применяемого на судах переносного электрооборудования, его состав, электрические характеристики и способы обеспечения питанием. Безопасная эксплуатация указанного в таблице переносного электрооборудования обеспечивается, как правило, сочетанием нескольких технических мер защиты. Прежде всего конструкцией всего переносного электрооборудования исключается возможность случайного прикосновения к токоведущим частям (с помощью корпусов и кожухов, установкой защитных сеток, щитков и т. п.).

Как видно из табл. 1.4.5, ограничение напряжения до значений, при которых исключается или значительно снижается опасность поражения человека, предусматривается только для ручных и переносных светильников и электроинструмента. Это связано с тем, что, как показывает статистика, при использовании для них более высоких напряжений они являются наиболее частыми источниками электротравм. Следует заметить, что для судовых переносных устройств освещения и инструментов ограничение напряжения более жесткое, чем в береговых электроустановках, что обусловлено спецификой его эксплуатации на судах (стесненность помещений, наличие больших заземленных масс металла, высокая влажность в помещениях, возможность потери равновесия при качке и др.).



*Таблица 1.4.5*

**Классификация по назначению, состав и некоторые характеристики судового переносного электрооборудования**

| Вид | Состав | Напряжение, род тока и частота | Способ обеспечения питанием |
|---|---|---|---|
| Аппаратура нестационарного освещения | Ручные и переносные светильники | 12 и 24 В постоянного и переменного тока | От штепсель-трансформаторов или специальных сетей, питающихся через трансформаторы или преобразователи |
| Бытовые электрические приборы | Электробритвы, машинки для стрижки волос, фены, пылесосы, полотеры, калориферы, воздуходувки, стиральные машины, утюги, чайники, кофейники, плитки, настольные вентиляторы и лампы | 127 и 220 В переменного тока, 50 Гц; 110 В постоянного тока | От сети освещения или специальных сетей (электробритвы — от сети освещения через разделяющие трансформаторы) |
| Медицинские электрические приборы | Рентгеновские аппараты, электрокардиографы, эпидиноскопы, электро- и светолечебные аппараты (аппарат для гальванизации, УВЧ-терапии, ванна для облучения конечностей, лампа «соллюкс», облучатели маячный и бактерицидный) и т. д. | 127 и 220 В переменного тока, 50 Гц | От сети освещения |

*Продолжение табл. 1.4.5*

| Вид | Состав | Напряжение, род тока и частота | Способ обеспечения питанием |
|---|---|---|---|
| Электрические приборы культурно-массового назначения | Кинопередвижные установки, диапроекторы, магнитофоны, телевизоры, радиолы, приемники и т. д. | 127 и 220 В переменного тока, 50 Гц | От сети освещения |
| Переносное (передвижное) силовое электрооборудование | Электронасосы (водоотливные, пожарные, маслоперекачивающие), электрокомпрессоры, электровентиляторы, сварочные агрегаты и т. д. | 127, 220 и 380 В переменного тока, 50 Гц | От силовой сети или сети освещения |
| Электрифицированный инструмент | Паяльники, электротигли, банники, воспламенители котлов | 24 В постоянного и переменного тока, 50 Гц | От специальных сетей соответствующего напряжения, питающихся через трансформаторы или преобразователи |
| | Электродрели, электроножницы по металлу | 24 В постоянного и переменного тока, 50 Гц; 36 В переменного тока, 200 Гц | |



Ограничение напряжения для светильников переносного освещения и электроинструмента сочетается с другими техническими мерами защиты. В ряде случаев они выполняются в пластмассовых корпусах, т. е. имеют двойную изоляцию, что предохраняет людей от поражения током не только при повреждении рабочей изоляции этих видов переносного электрооборудования, но и при случайном прикосновении ими к находящимся под напряжением частям какого-либо другого оборудования.

Корпуса всех переносных светильников и электроинструментов с металлическими корпусами имеют защитное заземление, выполненное с помощью третьей (четвертой) жилы в питающем шнуре (кабеле).

Важной защитной мерой для переносных устройств освещения и электроинструмента является также питание их через трансформаторы, штепсель-трансформаторы и преобразователи, т. е. разделение сетей. Это обеспечивает отделение их от силовой сети или сети освещения с возможными в них низкими сопротивлениями изоляции, большими емкостями относительно корпуса, повреждениями изоляции, однофазными замыканиями, т. е. условиями, создающими повышенную опасность поражения человека.

Выполнение перечисленных выше технических мер защиты для переносных устройств освещения и электроинструмента при соблюдении соответствующих организационных мероприятий обеспечивает их безопасную эксплуатацию на судах.

Применению ограниченного до безопасной величины напряжения для всего переносного электрооборудования противодействуют обстоятельства технико-экономического характера, так как в одних случаях применить такие напряжения технически затруднительно, в других — технически и экономически нецелесообразно.

Одной из основных технических мер защиты для переносного электрооборудования напряжением 127, 220 или 380 В является защитное заземление металлических корпусов и других доступных для прикосновения нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением. Все переносное электрооборудование в морском исполнении снабжается питающими шнурами (кабелями) с дополнительными жилами, а штепсельные розетки и вилки имеют соответствующие заземляющие контакты.

Однако на судах эксплуатируется большое число переносных электроприемников в общепромышленном исполнении, у которых либо вообще не предусмотрено защитное заземление, либо оно не отвечает требованиям эксплуатации на судах. Так, все бытовые электрические устройства и приборы культурно-массового назначения (бритвы, машинки для стрижки волос, пылесосы, стиральные машины, чайники, фильмоскопы, кинопередвижные установки и др.) в настоящее время пока еще не имеют защитного заземления. Это объясняется тем, что они рассчитаны на использование в береговых электроустановках, где заземление бытового переносного электрооборудования не требуется. Однако условия в жилых и общественных зданиях существенно отличаются от условий эксплуатации на судах. Не имеет защитного заземления также часть электрических медицинских приборов напряжением 127 или 220 В (бактерицидный облучатель, лампа «соллюкс» и др.). Другая часть медицинских электроприборов и аппаратов имеет защитное заземление в виде отдельных проводников, подключаемых к земле с помощью специальных зажимов, струбцин и т. д. Такой способ заземления не отвечает требованиям судовых правил, так как в судовых условиях такое заземление ненадежно.

Для обеспечения возможности применения на судах указанного электрооборудования предусматриваются различные технические и организационные мероприятия. Так, для подключения некоторых бытовых приборов (электробритв, машинок для стрижки волос, фенов и т. п.) устанавливаются розетки, получающие питание от трансформаторов, предназначенных только для этой цели. При этом от одного трансформатора питается не более трех-четырех розеток. Для подключения электробритв напряжением 220 В в ряде случаев устанавливаются настольные и призеркальные светильники с встроенными в них разделяющими трансформаторами и розетками. Применяются также электробритвы, имеющие изолирующие вставки между электроприводом и металлической рабочей частью, либо бритвы,

в которые встроен понижающий трансформатор. Остальное переносное электрооборудование напряжением 127, 220 или 380 В в общепромышленном исполнении либо дорабатывается, с тем чтобы защитное заземление удовлетворяло требованиям судовых правил, либо его питание осуществляется от специально предназначенных для этой цели трансформаторов.

## § 1.4.5. ЭЛЕКТРОПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ СУДНА С БЕРЕГА

Электроснабжение судна при стоянке у берега (или в доке) может осуществляться от береговой сети с изолированной или заземленной нейтралью. На судне должно быть предусмотрено устройство электрического соединения (заземления) металлического корпуса судна или магистрали заземления неметаллического судна с нейтралью береговой электроустановки (если она заземлена) или с береговым заземляющим устройством (если нейтраль изолирована). Такое соединение осуществляется либо с помощью четвертой жилы кабеля питания с берега, либо отдельным проводом, сечение которых должно быть не менее 50% сечения фазной жилы.

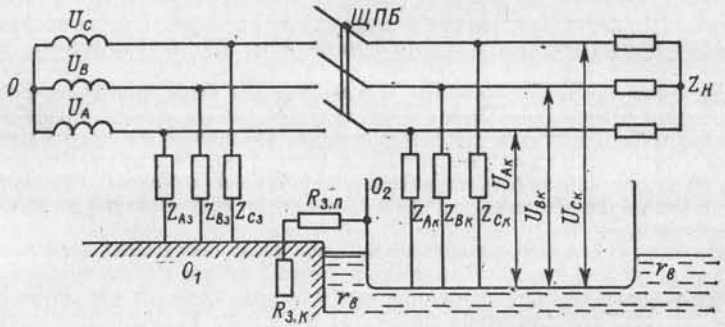



Рис. 1.4.7. Эквивалентная схема питания СЭЭС от сети с изолированной нейтралью.

*ЩПБ* — щит питания с берега; $Z_{Аз}$, $Z_{Вз}$, $Z_{Сз}$ — комплексы полных сопротивлений фаз берегового участка сети относительно земли; $Z_{Ак}$, $Z_{Вк}$, $Z_{Ск}$ — комплексы полных сопротивлений фаз судовой сети относительно корпуса; $Z_н$ — эквивалентное сопротивление нагрузки судовой сети; $R_{з.п}$, $R_{з.к}$ — сопротивления в цепи заземления корпуса судна (перемычки заземления и зоны растекания тока вблизи заземлителя); $r_в$ — сопротивление зоны растекания тока между корпусом судна и землей; $U_A$, $U_B$, $U_C$ — фазные напряжения источника.

**Питание СЭЭС от трехфазной береговой сети с изолированной нейтралью.** Эта схема питания (рис. 1.4.7) чаще всего имеет место при использовании разделяющего трансформатора, вторичная обмотка которого имеет изолированную нейтраль.

При соединении корпуса судна с заземлителем перемычкой ($R_{з.п} \to 0$) условия электропожаробезопасности на самом судне качественно определяются теми же положениями, что и при питании судовой сети от собственных источников электроэнергии (см. § 1.4.1—1.4.3).

Рассчитывая токи, протекающие через тело человека при однофазном прикосновении, следует, естественно, в этом случае учитывать сопротивление изоляции и емкость фаз судовой и береговой сетей.



При отсутствии перемычки заземления корпуса судна ($R_{з.п} \to \infty$) и относительно большом сопротивлении растеканию тока в воде или при постановке судна в док на кильблоки ($r_в \to \infty$) разность потенциалов между нейтралью источника питания (точка $O$) и землей (участок $O_1$), с одной стороны, и между точкой $O$ и корпусом судна (точка $O_2$) — с другой, в общем случае при несимметричных сопротивлениях изоляции сетей будет отличаться от нуля, т. е. $\dot{U}_{O_2O_1} = \dot{U}_{O_2O} - \dot{U}_{O_1O} \neq 0$. Векторная диаграмма напряжений для этого режима имеет вид, приведенный на рис. 1.4.8, *а*.

Из диаграммы видно, что при замыкании одной из фаз судовой сети на корпус (например, фазы $A$) напряжение между корпусом судна и землей будет стремиться к фазному напряжению источника, а напряжение других фаз относительно корпуса судна может увеличиться до линейного ($\dot{U}_{O_2O_1} \to \dot{U}_A$; $\dot{U}_{Bк} = \dot{U}_{Ск} \to \dot{U}_л$).

Таким образом, при отсутствии перемычки заземления $R_{з.п}$, равенстве сопротивления изоляции и емкости фаз относительно земли берегового участка сети и

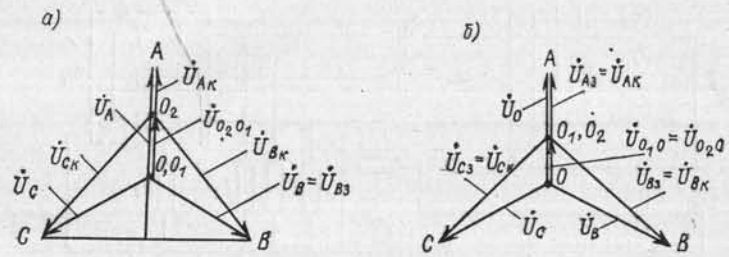



Рис. 1.4.8. Векторные диаграммы напряжений: *а* — при отсутствии цепи заземления корпуса судна; *б* — при наличии цепи заземления корпуса судна.

при уменьшении сопротивления изоляции одной из фаз судового участка сети до нуля напряжение $\dot{U}_{O_2O_1}$ может достигать значения $\dot{U}_ф$.

Сказанное выше будет иметь место и при аналогичных неисправностях в береговом участке сети при исправной изоляции судовой сети.

При заземлении корпуса судна заземляющей перемычкой с относительно малым сопротивлением ($R_{з.п} \to 0$) потенциалы корпуса судна и точки подключения к заземлителю $R_{з.к}$ уравниваются и $\dot{U}_{O_2O_1} \approx 0$.

Однако это заземление, как видно из векторной диаграммы (рис. 1.4.8, *б*), не снимает «перекоса» напряжений фаз сети относительно корпуса (земли). В этом случае напряжение смещения, т. е. $U_{O_2O}$, или равное ему $\dot{U}_{O_1O}$ может достигать фазного значения, например при увеличении до ∞ проводимости одной из фаз судовой или береговой сети (например, фазы $A$). В этих условиях точка $O_2$ (или $O_1$) совпадает с точкой $A$, и тогда напряжения фаз $B$ и $C$ относительно корпуса (земли) будут равняться линейному напряжению.

Это следует учитывать в случае оценки условий электропожаробезопасности при наличии на судне элементов, чувствительных к повышению напряжения.

**Питание СЭЭС от трехфазной четырехпроводной сети с глухозаземленной нейтралью.** При питании судовой сети от береговой четырехпроводной сети с глухозаземленной нейтралью (рис. 1.4.9), отсутствии заземления корпуса судна ($R_{з.п} \to \infty$) и однофазном замыкании в судовой сети напряжение между корпусом судна и нейтралью берегового источника может достигать значения фазного напряжения. В этом случае человек, стоящий на земле и касающийся корпуса судна,

подключается параллельно сопротивлению растекания тока в воде и попадает под напряжение, величина которого (а следовательно, тока, проходящего через тело человека) зависит от сопротивления растекания тока в воде, сопротивления растеканию тока заземлителя нейтрали источника электроэнергии $R_0$ и повторного заземления нулевого провода $R_п$, а также сопротивления тела человека $R_ч$. Наибольшее значение напряжение прикосновения при прочих равных условиях будет иметь при больших значениях $r_в$, например при нахождении судна в доке на кильблоках, у причалов с пресной водой и пр.

При касании корпуса судна заземленными металлическими предметами возможно искрообразование.

Режим однофазного замыкания в рассматриваемом случае может существовать длительно, так как ток замыкания ограничивается сопротивлениями воды и

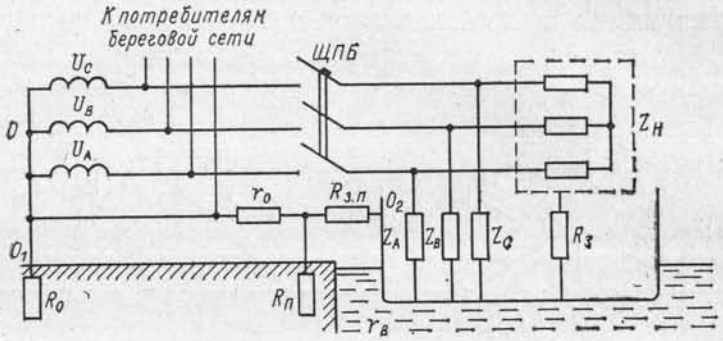



Рис. 1.4.9. Эквивалентная схема питания СЭЭС от сети с глухозаземленной нейтралью.

$r_0$ — сопротивление нулевого провода.

заземляющих устройств и величина его может оказаться недостаточной для срабатывания максимальной защиты судовой сети. При этом возникает опасность выноса потенциала на нулевой провод береговой сети, величина которого при $R_0 \gg r_в$ может достигать $\dot{U}_ф$. Поэтому в данном случае создается угроза поражения током производственного персонала станочных участков, если корпуса станков и электротехнических изделий, расположенных в цехах судозавода, занулены.

При соединении корпуса судна с нулевым проводом и береговым заземлителем одновременно обеспечивается зануление корпусов судового электрооборудования через защитное заземление и тем самым осуществляется автоматическое отключение их, а также зануленного оборудования судостроительного завода при возникновении в судовой сети однофазных замыканий на корпус.

Правильный выбор и эксплуатация устройств максимальной защиты в этих условиях имеют очень важное значение, так как в случае несрабатывания максимальной защиты падение напряжения на нулевом проводе может достигать значений, равных половине фазного напряжения ($\sim 0{,}5U_ф$), и, таким образом, возникает опасность поражения током людей как на пирсе, в доке, так и в цехах судозавода.

При этом следует иметь в виду, что современные технические средства пока не позволяют обеспечить эффективный контроль изоляции СЭЭС в режиме питания от сети с заземленной нейтралью. Поэтому вопрос правильного расчета системы заземления и выбора уставки срабатывания автомата защиты питания с берега приобретает особую актуальность.



## § 1.4.6. НОРМИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

**Принципы нормирования.** Величина сопротивления изоляции в большой мере характеризует надежность судовой электроэнергетической системы и безопасность ее эксплуатации.

Сопротивление изоляции сети зависит от различных факторов (климатических условий, загрязнения, количества подключенных потребителей и т. д.) и поэтому даже для данной конкретной сети может изменяться в значительных пределах. Эти изменения условно можно разделить на две группы: нормальные и аварийные. Нормальные изменения сопротивления изоляции практически не связаны с появлением каких-либо дефектов в изоляционной конструкции и могут быть вызваны климатическими и температурными воздействиями, а также непостоянством количества подключенных потребителей в процессе функционирования сети. Диапазон нормальных изменений сопротивления изоляции является характеристикой данной сети (или ее части) и может быть определен на основе статистических исследований с учетом результатов исследований аналогичных сетей.

Аварийные изменения связаны с появлением какой-либо неисправности в изоляционной конструкции (например, объемное увлажнение временно не работающего электродвигателя в помещении с повышенной влажностью, либо механическое повреждение изоляции с последующим увлажнением или загрязнением места повреждения и т. п.). В случае локализованного снижения сопротивления изоляции активные и емкостные токи утечки на корпус судна сосредоточиваются в одном месте; этот процесс сопровождается значительным увеличением тепловыделения, что может привести к разрушению изоляции, вплоть до образования дугового замыкания на корпус.

*Таблица 1.4.6*

**Нормы сопротивления изоляции электрооборудования, МОм**

| Электрооборудование | Состояние электрооборудования | |
|---|---|---|
| | холодное | нагретое |
| Электрические машины с частотой вращения до 1000 об/мин мощностью: | | |
| до 100 кВт | 5 | 3 |
| от 100 до 1000 кВт | 3 | 1 |
| Трансформаторы | 5 | 1 |
| Распределительные щиты | 1 | — |
| Пускорегулирующая аппаратура | 5 | — |
| Фидер силовой сети и сети освещения | 1 | — |

Нормирование величины сопротивления изоляции направлено на обеспечение возможности оценки состояния изоляции сети или ее отдельных элементов; оно также дает возможность выбрать уставки срабатывания предупредительной сигнализации в устройствах автоматического контроля. За норму сопротивления изоляции принимают величину, соответствующую нижней границе диапазона нормальных изменений.

**Нормы сопротивления изоляции электрооборудования.** Нормы сопротивления изоляции некоторых видов электрооборудования, указанные в Правилах Регистра СССР, приведены в табл. 1.4.6.

**Нормы сопротивления изоляции электрических сетей.** Нормы сопротивления изоляции электрических сетей зависят от их разветвленности, вида и количества подключенных потребителей. Эти нормы определяются по эмпирическим формулам, приведенным в табл. 1.4.7, или по номограммам, приведенным на рис. 1.4.10—1.4.14.

Рассчитанные значения округляются до ближайшей из следующих норм: 5; 2,5; 1,5; 1; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,25; 0,2; 0,15; 0,10; 0,09; 0,08; 0,07; 0,06; 0,05; 0,04; 0,03; 0,025; 0,02; 0,015; 0,01 МОм. При этом, если для разветвленных сетей,

*Таблица 1.4.7*

**Эмпирические формулы для расчета норм (в мегомах) сопротивления изоляции электрических сетей**

| Наименование сети или участка сети | Формула | Обозначения в формуле |
|---|---|---|
| *Обесточенные сети* | | |
| 1. Кабельная сеть распределения электроэнергии (распределительные щиты, коммутационная аппаратура) при включенных автоматах фидеров на распределительных щитах и выключенной коммутационной аппаратуре потребителей | $\frac{3}{n_1 + 0{,}05n_2 + 0{,}02n_3 + 1}$ | $n_1$ — количество щитов, имеющих непосредственную связь с источником электроэнергии;<br>$n_2$ — количество распределительных щитов и коробок, а также подключенных обмоток трансформаторов;<br>$n_3$ — количество пускателей и других коммутирующих устройств, установленных непосредственно в цепях питания потребителей электроэнергии |
| 2. Сеть освещения или ее отдельные участки (совместно с потребителями) | $\frac{40}{n + 5}$ | $n$ — количество светильников, дверных выключателей, штепсельтрансформаторов, имеющих электрическую связь во время измерений сопротивления изоляции |
| 3. Сеть сигнально-отличительных огней и наружного освещения (совместно с потребителями) | $\frac{30}{n + 10}$ | $n$ — количество светильников |
| 4. Сеть электронагревательных приборов (совместно с потребителями) | $\frac{5K}{n}$ | $n$ — количество нагревательных приборов в сети;<br>$K = 1{,}0$ для бытовых нагревательных приборов и камбузного оборудования;<br>$K = 0{,}5$ для приборов подогрева воздуха;<br>$K = 0{,}2$ для приборов подогрева жидкостей |



*Продолжение табл. 1.4.7*

| Наименование сети или участка сети | Формула | Обозначения в формуле |
|---|---|---|
| 5. Сеть звонковой сигнализации (совместно с потребителями) | $\frac{30}{n_1 + 2n_2}$ | $n_1$ — количество звонков, ревунов, колоколов громкого боя, светильников, замыкателей;<br>$n_2$ — количество номерников, трансформаторов |
| 6. Приборы управления судном (телеграфы, электротахометры, рулевые указатели и т. п.) | $\frac{10}{2n_1 + n_2}$ | $n_1$ — количество приемников-передатчиков;<br>$n_2$ — количество датчиков и приемников |
| *Сети, находящиеся под напряжением* | | |
| 7. Силовая сеть постоянного тока | $\frac{1}{\frac{1}{R_с} + \frac{1}{R_{эд}} + \frac{1}{R_{осв}} + \frac{1}{R_п} + \frac{1}{R_и}}$ | $R_с$ — норма сопротивления изоляции сети распределения электроэнергии (п. 1);<br>$R_{эд} = \frac{10}{n}$ — сопротивление изоляции $n$ электродвигателей; |
| 8. Сеть переменного тока с включенными электроприводами (при отсутствии электрически связанного осветительного и электротермического оборудования) | $\frac{1}{\frac{n}{10} + \frac{1}{R_с} + \frac{1}{R_и}}$ | $R_{осв}$ — норма сопротивления изоляции сети освещения (п. 2);<br>$R_п$ — норма сопротивления изоляции нагревательных приборов и камбузного оборудования (п. 4);<br>$R_и = 0{,}8R_г$ — норма сопротивления изоляции участка сети от источника до генераторного автомата;<br>$R_г$ — норма сопротивления изоляции источника электроэнергии (генератора) |

Примечание. Норма сопротивления изоляции сети (или участка), содержащей разнородные потребители (например, нагревательные приборы и светильники), определяется как величина, эквивалентная параллельно включенным сопротивлениям изоляции этих потребителей.

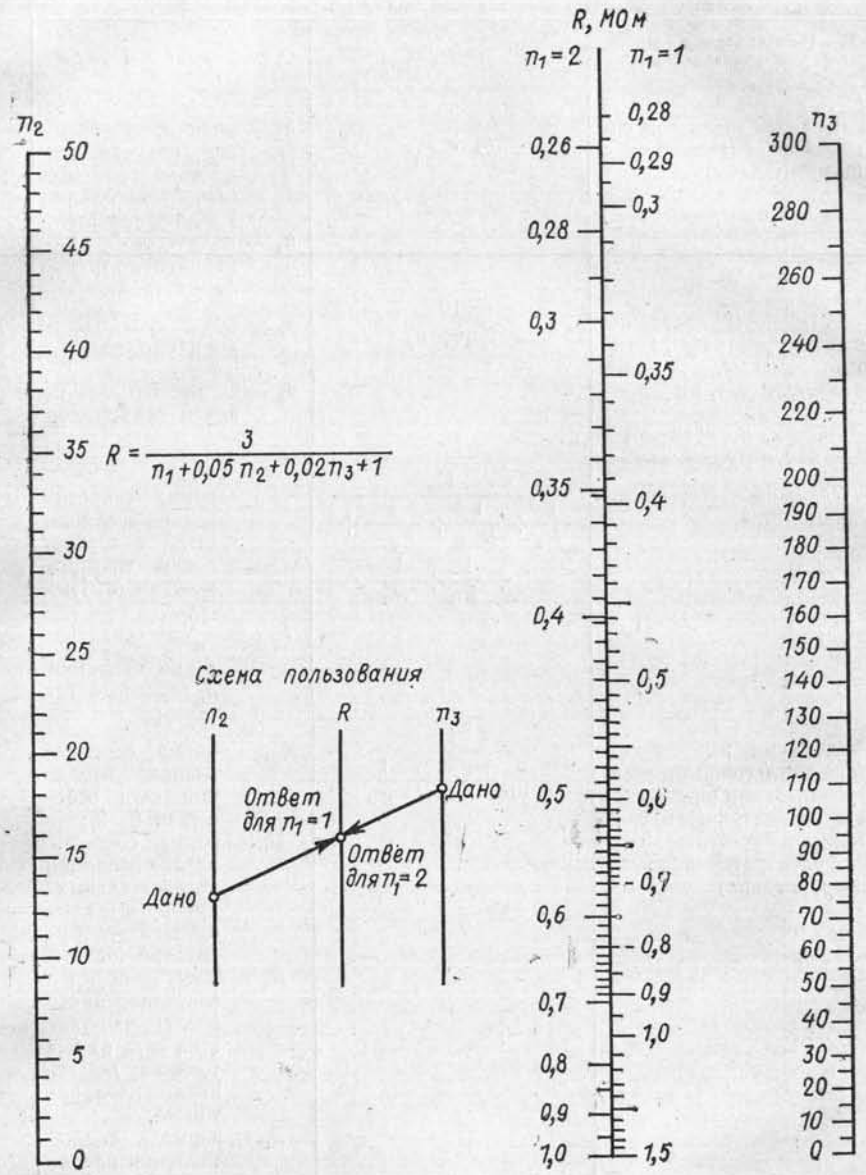



Рис. 1.4.10. Номограмма для определения нормы сопротивления изоляции кабельной сети.

$n_1$ — количество щитов, имеющих непосредственную связь с источником электроэнергии; $n_2$ — количество распределительных щитов и коробок, а также подключённых обмоток трансформаторов; $n_3$ — количество пускателей и других коммутирующих устройств в цепях питания потребителей; $R$ — норма сопротивления изоляции.



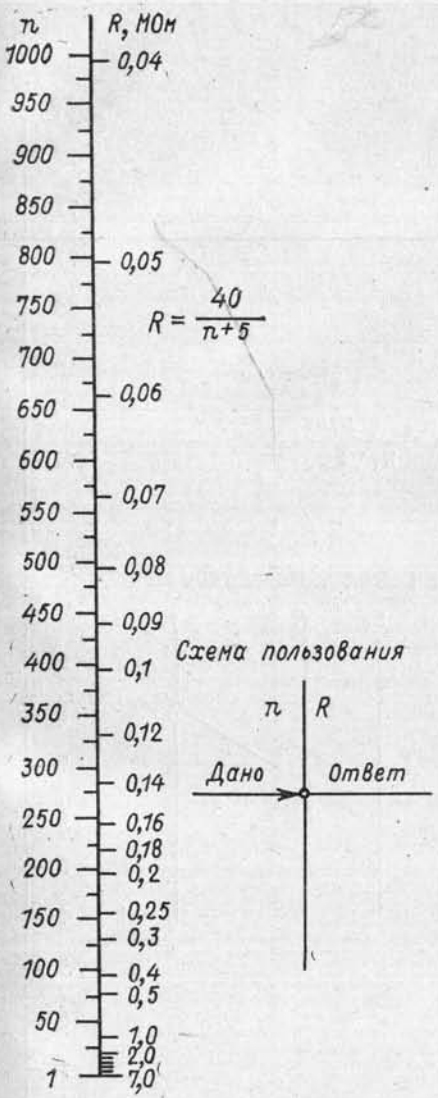



Рис. 1.4. 11. Номограмма для определения нормы сопротивления изоляции сети освещения.

$n$ — количество светильников и других потребителей; $R$ — норма сопротивления изоляции.

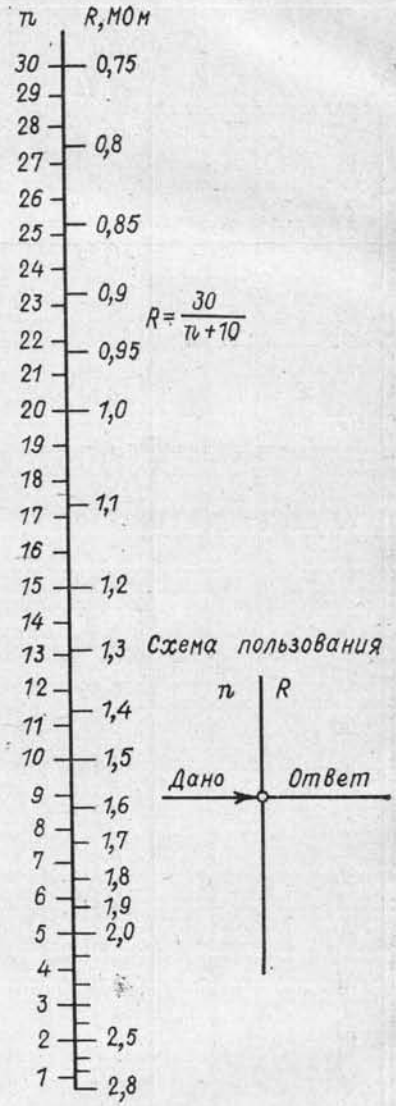



Рис. 1.4.12. Номограмма для определения нормы сопротивления изоляции сети сигнально-отличительных огней и наружного освещения.

$n$ — количество светильников; $R$ — норма сопротивления изоляции.

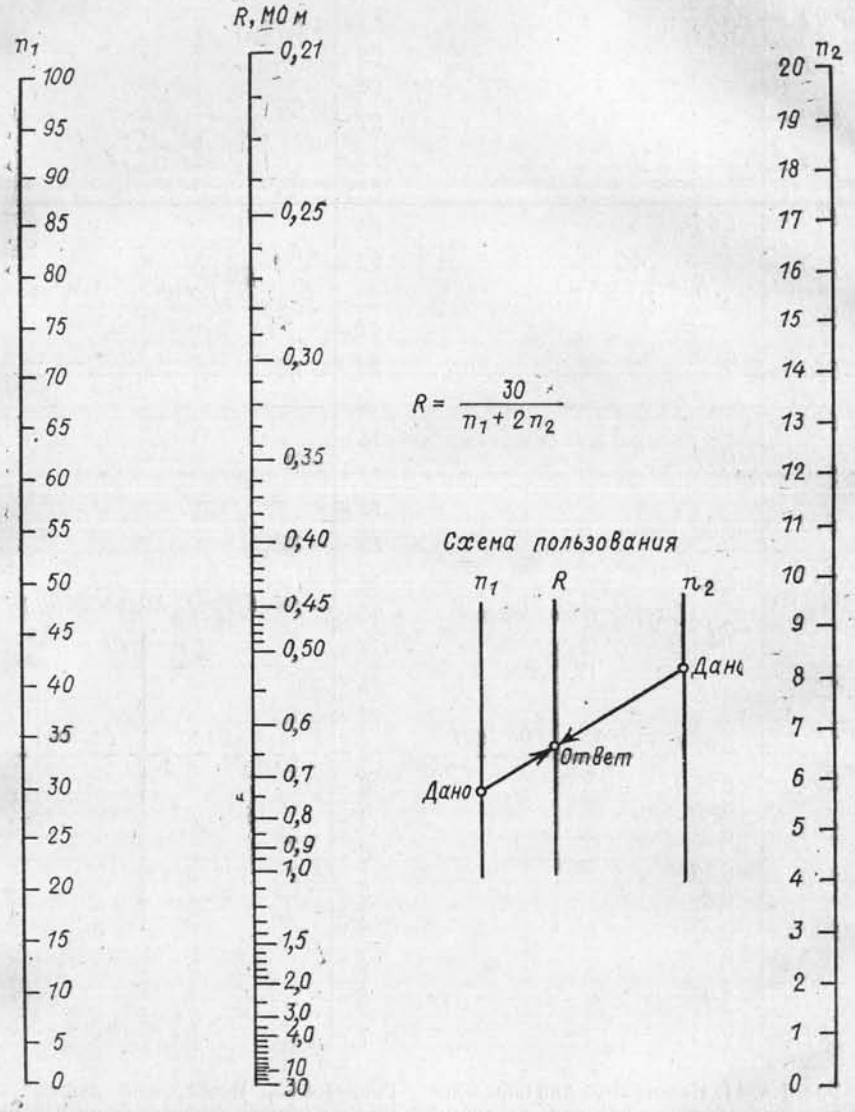



Рис. 1.4.13. Номограмма для определения нормы сопротивления изоляции сети звонковой сигнализации.

$n_1$ — количество звонков, ревунов, колоколов громкого боя, светильников, замыкателей; $n_2$ — количество номерников, трансформаторов; $R$ — норма сопротивления изоляции.



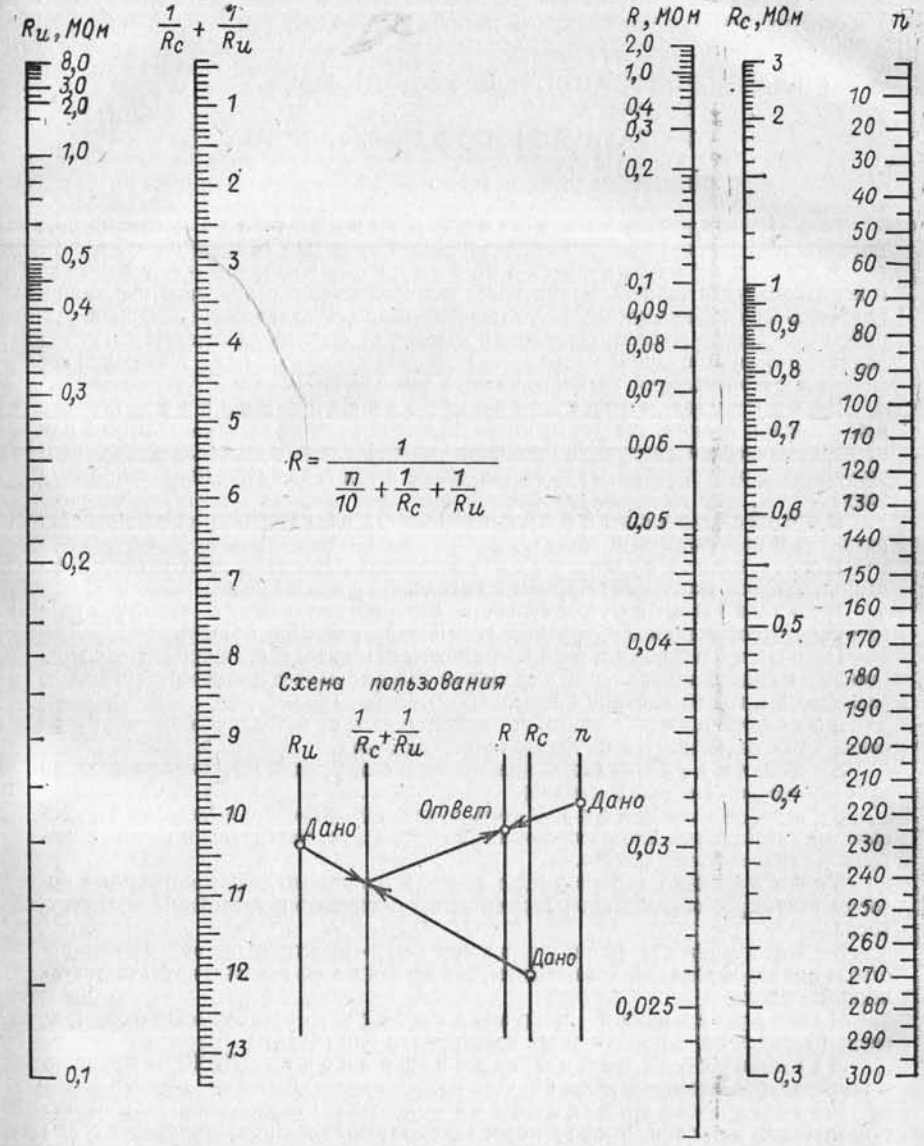



Рис. 1.4.14. Номограмма для определения нормы сопротивления изоляции сети переменного тока с включенными электроприводами.

$n$ — количество электродвигателей; $R_и = 0{,}8R_г$ — норма сопротивления изоляции участка сети от источника до генераторного автомата, где $R_г$ — норма сопротивления изоляции генератора; $R_c$ — норма сопротивления изоляции кабельной сети (рис. 1.4.10); $R$ — норма сопротивления изоляции сети.

содержащих большое число потребителей, сопротивление изоляции получается меньше 10 кОм, следует уменьшать количество гальванически связанных элементов сети, например, с помощью разделяющих трансформаторов.

## § 1.4.7. ГРОЗОЗАЩИТНЫЕ УСТРОЙСТВА И ЗАЩИТА ОТ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

### ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Активная высота молниеотвода — превышение молниеотвода над верхней точкой защищаемой зоны или объекта на судне.

Антистатическое заземление — электрическое соединение с корпусом судна (шиной заземления) непосредственно с помощью перемычки или через другие заземленные электропроводные (металлические) детали и устройства элементов, систем, устройств и отдельных деталей, на которых могут накапливаться или индуцироваться электростатические заряды. Максимальное значение сопротивления антистатического заземления $10^6$ Ом.

Вторичные воздействия разрядов молнии — явления при разрядах молнии, связанные с наведением вследствие электромагнитной или электростатической индукции высоких потенциалов в металлических конструкциях (трубопроводы, сети линии связи и т. д.), не подвергшихся прямому удару.

Высота ориентировки — высота, на которой разряд начинает развитие в направлении к объекту.

Грозовая активность — количество грозовых дней в году в заданном районе акватории Мирового океана.

Грозозащита — совокупность мер, обеспечивающих защиту судна от прямого поражения и вторичных воздействий разрядов молнии.

Грозопоражаемость — количество разрядов, приходящихся на единицу площади поверхности в заданном районе; характеризуется плотностью разрядов $n$ в год на единицу площади (км$^2$).

Заземление — соединение конструкции с металлическим корпусом судна или с заземлителем на неметаллических судах.

Заземлитель — часть молниеотводного устройства, непосредственно соприкасающаяся с водой (землей).

Защищаемая зона — часть судна, где возможно выделение взрывоопасных газов, паров или расположены оборудование, материалы и жилые помещения, подлежащие защите.

Зона захвата разрядов — пространство над молниеотводом, в котором разряды с определенной вероятностью стягиваются к вершине молниеотвода.

Зона защиты (конус защиты) — пространство вблизи молниеотвода под зоной захвата. Зона защиты, так же как и зона захвата, имеет статистический смысл.

Избирательная поражаемость — преимущественное развитие разрядов на возвышающиеся конструкции или объекты.

Легковоспламеняющаяся жидкость (ЛВЖ) — жидкость с температурой вспышки ниже 60° С.

Металлический контакт — контакт между сопрягаемыми металлическими деталями, в зоне которого отсутствуют электроизолирующие среды и материалы (лакокрасочные покрытия, пленки нефтепродуктов, продукты коррозии и т. п.).

Молниезащита — совокупность мер, обеспечивающих защиту судна от прямого поражения грозовыми разрядами.

Молниеотводное устройство — устройство, обеспечивающее отвод тока молнии в землю по безопасному для защищаемого объекта направлению.

Молниеуловитель — верхняя часть молниеотводного устройства.



Ориентировка разряда — физический процесс, следствием которого является развитие разряда в направлении максимального градиента электрического поля.

Отводящий провод — провод, электрически соединяющий молниеуловитель с заземлителем.

Прямое поражение — попадание разряда молнии в зону судна, подлежащую защите.

Показатель грозоупорности (надежность молниезащиты) — вероятность прямого поражения судна за срок службы.

Электростатически активная среда (материал) — среда, способная при операциях с ней генерировать и накапливать в себе электрические заряды (для сред, транспортируемых по трубопроводам, электростатически активными являются среды, имеющие удельную объемную электропроводность ниже $10^{-8}$ Сим/м).

### НАКОПЛЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА, МОЛНИЯ И ЕЕ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Молния — это электрический разряд в атмосфере между облаком и землей или между различными частями облаков, т. е. разряд электричества, накопленного в атмосфере. Из всех видов грозовых разрядов наибольший интерес представляет разряд между облаком и землей в виде линейчатой молнии, потому что именно с ним связано подавляющее большинство повреждений наземных объектов, в том числе и судов.

Процесс возникновения молнии может быть объяснен следующим образом. В атмосфере, насыщенной водяными парами, под действием мощных восходящих воздушных потоков и конденсации водяных паров происходит разбрызгивание водяных капель. Образующаяся при разбрызгивании мельчайшая водяная пыль оказывается заряженной отрицательно, а остающиеся целыми более тяжелые капельки — положительно. Отрицательно заряженная пыль образует основной массив грозового облака. Положительно заряженные капли либо выпадают в виде дождя на землю, либо удерживаются в грозовом облаке в виде местных скоплений положительных зарядов. В верхних слоях грозового облака на высоте около 5 км и выше, где действует иной механизм разделения зарядов, связанный с электризацией кристалликов льда, сосредоточиваются положительные заряды.

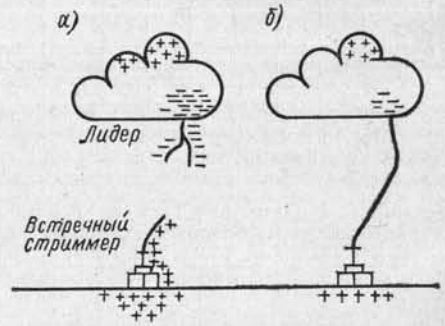



Рис. 1.4.15. Схема развития разряда молнии: *а* — лидерная стадия; *б* — главный разряд.

Грозовое облако, заряженное с нижней стороны в основном отрицательными зарядами, образует гигантский конденсатор, одной обкладкой которого является земля. По мере накопления зарядов, когда напряженность электрического поля вблизи облака достигает критического значения 25—30 кВ/см, создаются условия для развития разряда (молнии). Разряд между облаком и землей обычно начинается с прорастания от облака к земле слабо светящегося канала (лидера), движущегося толчкообразно со средними скоростями $10^7$—$10^8$ см/с с паузами между толчками в 30—90 мкс. Лидер окружен обширной зоной ионизации, которая заполняется зарядами, стекающими из облака (рис. 1.4.15, *а*). Вследствие неоднородности воздуха (наличие объемных зарядов, проводящих частиц и т. д.) лидер может иметь самую разнообразную форму ветвистости. Обычно лишь одна из ветвей лидера достигает земли. При приближении «головки» лидера к земле на его траекторию начинают оказывать влияние возвышающиеся наземные объекты.

Вследствие электростатической индукции на вершинах этих объектов происходит концентрация зарядов противоположного знака по отношению к зарядам лидера. Это способствует повышению напряженности электрического поля у этих объектов, и с них начинает развиваться встречный разряд (встречный стриммер). Зона ионизации встречного стриммера заполняется зарядами, стекающими с наземного объекта. Когда лидер и встречный стриммер соприкасаются, начинается главная стадия разряда (рис. 1.4.15, *б*).

Во время этой стадии происходит нейтрализация зарядов в основном в зоне ионизации лидера. Процесс этот распространяется в направлении от земли к облаку и сопровождается сильным свечением канала разряда. По каналу в течение очень короткого времени (до 100 мкс) протекает весьма большой ток. Главный разряд завершается, когда волна интенсивного свечения достигает облака и яркость канала молнии резко уменьшается. Главный разряд приводит к резкому возрастанию проводимости канала молнии. Через этот канал по завершении главного разряда стекают остаточные заряды лидера и облака. В этой стадии ток, называемый током послесвечения, достигает сотен ампер и лишь изредка — тысяч ампер. Примерно в 40% случаев разряд молнии имеет многократный характер, в среднем с тремя-четырьмя импульсами в одном разряде. При этом токи второго и последующих импульсов, как правило, меньше тока первого импульса.

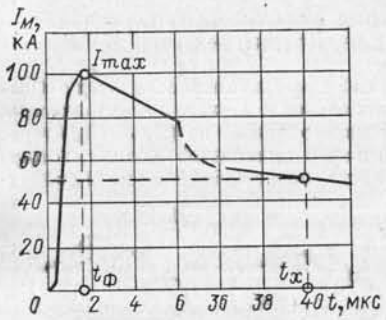


Рис. 1.4.16. Примерная форма кривой тока молнии.

При расчете конструкции молниеотводных устройств основным фактором является ток молнии. Током молнии называют кратковременный импульс тока, протекающий во время главного разряда. Примерная форма кривой тока молнии представлена на рис. 1.4.16. Импульс тока молнии характеризуется временем $t_ф$, в течение которого ток достигает своего максимума и которое называется длиной фронта тока молнии, и временем $t_x$, фиксирующим момент уменьшения тока до половины максимального значения и условно принимаемым за длительность молнии. Существенной характеристикой тока молнии является крутизна (скорость изменения) тока, которая вызывает индуктивное падение напряжения при протекании тока молнии через протяженные проводники (молниеотводы, токоотводы и др.). Чаще всего токи молнии имеют значение около 20 кА. Токи молнии от 50 до 100 кА наблюдаются редко, а свыше 100 кА — совсем редко. Зарегистрированные максимальные амплитуды токов составляют 200—300 кА. Наиболее часто ток молнии имеет среднюю крутизну 5 кА/мкс. Максимальная (из измеренных) крутизна тока молнии составляет 50—60 кА/мкс.

Как указывалось выше, при приближении «головки» лидера к земле на траекторию начинают оказывать влияние возвышающиеся наземные объекты. Таким объектом может оказаться судно при нахождении его в районе грозовой деятельности. При этом разряд молнии в судно, не оборудованное молниеотводным устройством, может произойти в любую выступающую его часть (мачту, надстройку, дымовую трубу, антенну, грузовой кран и т. п.) или даже в человека, находящегося на открытой палубе. Так, при испытаниях на макете деревянного судна без защиты от молнии наибольшее число разрядов попадало в мачты и в рубку. Известно, что разряд молнии сопровождается тепловым, механическим и электромагнитным воздействиями, которые могут представить для судна определенную опасность.

Тепловое воздействие молнии связано с протеканием тока молнии через пораженный объект. Прямой удар молнии в металлические устройства судна, например, может вызвать оплавление металла в месте контакта с каналом молнии и нагревание проводников, по которым протекает ток молнии, до высоких температур, вплоть до температуры плавления или даже испарения.



Механическое воздействие тока молнии при отсутствии соответствующей защиты может проявиться в расщеплении деревянных мачт и надстроек судна, вызванном взрывообразным испарением влаги, содержащейся в древесине.

Наряду с прямыми ударами молнии в судно представляют опасность также так называемые вторичные воздействия молнии. Они заключаются в том, что при разряде молнии на изолированных металлических частях, находящихся внутри судовых помещений или на открытой палубе, вследствие электростатической индукции могут наводиться высокие потенциалы относительно корпуса, а в протяженных металлических элементах (трубопроводах, кабелях и т. п.) вследствие электромагнитной индукции могут наводиться большие напряжения, величина которых зависит от параметров тока молнии, размеров и конфигурации контура и взаимного расположения контура и канала молнии. Под действием наведенных напряжений, достигающих десятков киловольт, может возникнуть искра (что особенно опасно в помещениях, содержащих взрывоопасные концентрации паров, газов или иных горючих веществ), а также может быть поражен человек.

Защита судов от прямых ударов молнии осуществляется с помощью молниеотводов. Молниеотвод представляет собой возвышающееся над защищенным объектом устройство, воспринимающее прямой удар молнии и отводящее токи молнии (посредством определенной системы заземления) в землю. Защитное действие молниеотвода проявляется в лидерной стадии грозового разряда. Направление разряда на больших высотах устанавливается исключительно самим лидером и определяется максимальной напряженностью электрического поля. Однако на некоторой высоте, называемой высотой ориентировки молнии, на направление лидера начинает влиять искажение поля молниеотводом. На вершине молниеотвода скапливаются заряды, создающие наибольшие напряженности электрического поля на пути между лидерным каналом и вершиной молниеотвода. Развитие с молниеотвода встречного стриммера еще больше усиливает напряженность электрического поля в направлении лидера молнии и окончательно предопределяет удар молнии в молниеотвод. При некоторой высоте превышения молниеотводом защищаемого объекта последний практически не будет поражаться молнией. Пространство вокруг молниеотвода, защищенное от прямых ударов молнии, называется зоной защиты.

## ГРОЗОЗАЩИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Грозозащитные устройства предназначены для защиты судов, судового оборудования и людей, а также грузов на судах от прямых ударов молнии и от вторичных воздействий грозовых разрядов.

Для этих целей используются: молниеотводные устройства, грозозащитные заземления и устройства информационного обеспечения защиты.

Молниеотводные устройства применяются для локализации прямого разряда молнии и состоят из молниеуловителя, воспринимающего прямой разряд молнии, и молниеотвода, осуществляющего отвод тока к заземлителю, который обеспечивает контакт с окружающей средой (вода, земля).

Грозозащитные заземления применяются для исключения искрообразования в элементах конструкции судна и судовых систем, не имеющих надежного соединения между собой и корпусом судна. Источником такого искрообразования может быть вторичное воздействие прямых разрядов молнии.

Устройства информационного обеспечения применяются для определения возможности (или невозможности) выполнения на судне технологических операций со взрывоопасными продуктами или материалами в зависимости от грозовой деятельности в районе расположения судна. Устройства информационного обеспечения представляют собой специальные приборы, определяющие и прогнозирующие интенсивность грозовой деятельности. В зависимости от назначения судна и категории его помещений, предусмотренных классификацией Регистра СССР, применяются соответствующие грозозащитные устройства.

*Таблица 1.4.8*

**Рекомендации по применению грозозащитных устройств**

| Категории помещений и пространств на судне по классификации Регистра СССР | Связь помещений с пространством на верхней палубе (ВП) | Категория грозозащиты | Применяемые грозозащитные устройства |
|---|---|---|---|
| Первая | Помещения закрытые или полузакрытые, имеющие прямой выход или открывающиеся отверстия на ВП и связанные с системами на ВП | I | Устройства молниеотводные<br>Устройства грозозащитного заземления в защищаемом пространстве ВП<br>Устройства информационного обеспечения |
| | Помещения закрытые экранированные, не связанные с ВП | III | Устройства молниеотводные |
| Вторая | Помещения, имеющие прямой выход или открывающиеся отверстия на ВП и связанные с системами на ВП | II | Устройства молниеотводные<br>Устройства грозозащитного заземления в защищаемом пространстве ВП |
| | Помещения закрытые экранированные, не связанные с ВП | III | Устройства молниеотводные |
| Третья | Помещения, имеющие выход или открывающиеся отверстия на ВП и связанные с системами на ВП | II | Устройства молниеотводные<br>Устройства грозозащитного заземления в защищаемом пространстве ВП |
| | Помещения закрытые, не связанные с ВП | III | Устройства молниеотводные |
| Прочие | Независимо от характера связи с ВП | III | Устройства молниеотводные |

Примечание. Если на судне по классификации Регистра СССР имеются помещения различных категорий, то категория грозозащиты судна в целом определяется по высшей категории.



Правила и нормы проектирования молниеотводных устройств, методы выполнения грозозащитного заземления судовых систем и конструкций регламентированы отраслевым стандартом «Устройства грозозащитные и заземления для снятия зарядов статического электричества с металлических конструкций и деталей» ОСТ 5.6109—77 [42].

В табл. 1.4.8 приведены рекомендации указанного стандарта по применению грозозащитных устройств.

## ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА

Заряд статического электричества возникает на поверхности материалов (особенно диэлектриков) в результате контакта этих материалов посредством трения, отделения или соединения поверхностей, деформаций, разрыва и т. п. Основной причиной возникновения заряда на поверхности материалов при указанном контакте их является образование так называемого д в о й н о г о с л о я, т. е. образование положительных и отрицательных зарядов, расположенных друг против друга, на соприкасающихся поверхностях в виде противоположно заряженных слоев. Одновременно с накоплением (генерацией) статического электричества всегда происходит и его рассеяние (потери).

Основными факторами, определяющими количественную сторону процесса накопления статического электричества, являются:

— площадь и расстояния между контактирующими (трущимися) поверхностями;

— природа взаимодействующих материалов;

— шероховатость поверхностей, коэффициент трения, скорость взаимного перемещения, давление;

— воздействие внешних факторов (температуры, влажности, наличия внешнего электрического поля и т. п.).

Рассеяние (потери) статического электричества происходит вследствие поглощения (утечки) зарядов окружающей средой, обусловленного проводимостью материала (объемной и поверхностной), излучением в окружающую среду, электронной эмиссией, десорбцией ионов, газовым разрядом и т. п.

На судах в качестве топлива и смазочных масел для судовых машин и в качестве груза перевозится значительное количество материалов, являющихся диэлектриками, способными накапливать заряды статического электричества. При выполнении некоторых технологических операций на судах (перекачка топлива или сырой нефти, мойка танков и т. п.) возможно искрообразование, обусловленное разрядами статического электричества [34].

Рассмотрим основные методы защиты от статического электричества.

**Отвод (рассеяние) зарядов в окружающую среду.** Этот метод может быть реализован путем заземления источника генерации зарядов. Типовые устройства для снятия зарядов статического электричества с металлических конструкций и деталей приведены в ОСТ 5.6109—77. Отвод зарядов статического электричества может также производиться через обрабатываемые вещества путем обеспечения необходимой поверхностной или объемной проводимости этих веществ.

Увеличение п о в е р х н о с т н о й п р о в о д и м о с т и может быть получено образованием или нанесением проводящей пленки (водяной, антистатической и т. п.).

О б ъ е м н а я п р о в о д и м о с т ь твердых тел и жидкостей может быть увеличена путем добавления в них специальных (антистатических) добавок (присадок).

**Снижение генерации статического электричества.** Снижение электризации жидких диэлектриков может быть достигнуто путем ограничения скорости их перемещения, так как величина тока электризации жидких диэлектриков практически пропорциональна квадрату скорости их перемещения. Электризация жидких материалов при перекачке зависит от конструктивных факторов (шероховатость внутренних поверхностей труб, радиусов их изгибов, конструкций затворов, фильтров и т. п.), которые могут быть использованы как средство сокращения электризации жидкостей [34, 70]. Использование специальных релакса-

ционных (разряжающих) емкостей при наливе и заправке топлив также уменьшает их электростатический заряд.

**Сокращение (или исключение) локальных перенапряжений на элементах конструкций, обусловленных наличием электростатического поля.** Напряженность электростатического поля в судовых конструкциях, как правило, неравномерна. Эта неравномерность обусловлена наличием выступающих (и проводящих) частей внутренней конструкции корпуса судна и его оборудования.

Такие части делают структуру электростатического поля весьма неоднородной и являются своего рода «концентраторами» поля. Напряженность поля в непосредственной близости от таких концентраторов может увеличиваться в десятки и сотни раз [34, 70]. Выравнивание структуры электростатического поля путем исключения или перемещения концентраторов может быть использовано как средство снижения вероятности искрообразования во взрывоопасных помещениях судна.

**Нейтрализация зарядов статического электричества.** Метод нейтрализации зарядов статического электричества основан на компенсации генерируемых зарядов зарядами, противоположными по знаку, которые генерируются специальным компенсационным устройством. Приборы и устройства, применяющие принципы нейтрализации зарядов статического электричества, т. е. средства активной электростатической защиты, разрабатываются в нашей стране и за рубежом.

# Глава 1.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

## § 1.5.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

### ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Деление шкалы электроизмерительных приборов — интервал между двумя соседними отметками шкалы.

Цена деления — интервал, выраженный в значениях измеряемой величины.

Длина деления — интервал, выраженный в единицах длины (мм).

Рабочая часть шкалы — часть шкалы, в пределах которой погрешности показаний не превышают значений, определяемых классом точности прибора.

Длина шкалы — расстояние между начальной и конечной отметками, отсчитанное по дуге шкалы или отрезку прямой, проходящей через середины всех самых коротких отметок.

Длина рабочей части шкалы — расстояние между отметками начала и конца рабочей части шкалы.

Перегрузочный амперметр — амперметр, шкала или часть шкалы которого с нормированной погрешностью состоит из двух частей: рабочей, предназначенной для измерений при нормальном режиме работы, и перегрузочной, предназначенной для измерения при кратковременных перегрузках цепи.

Номинальный ток перегрузочного амперметра — ток, соответствующий конечному значению рабочей части шкалы амперметра.

Вольтметр номинального напряжения — вольтметр, начальное значение рабочей части шкалы которого составляет не менее 60% конечного значения рабочей части шкалы.

Номинальная вторичная нагрузка трансформатора тока — полное сопротивление его внешней вторичной цепи (включая соединительные провода), выраженное в омах.



Предельная кратность трансформатора тока — наибольшее отношение первичного тока к его номинальному значению, при котором полная погрешность при заданной вторичной нагрузке не превышает 10%.

Ток динамической устойчивости трансформатора тока — наибольшее амплитудное значение тока короткого замыкания, которое трансформатор выдерживает без повреждений.

Ток термической устойчивости трансформатора тока — наибольшее действующее значение тока короткого замыкания за промежуток времени $t$, которое трансформатор выдерживает в течение этого промежутка времени без нагрева токоведущих частей до температур, превышающих допустимые при токах короткого замыкания, и без повреждений.

Номинальная мощность трансформатора напряжения — значение кажущейся мощности, выраженное в вольт-амперах, которую трансформатор отдает во вторичную цепь при номинальном вторичном напряжении, удовлетворяя классам точности.

Максимальная точность трансформатора напряжения — кажущаяся мощность, которую трансформатор длительно отдает при номинальном первичном напряжении вне классов точности и при которой нагрев всех его частей не выходит за пределы нормы.

### ОСНОВНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ И ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

По методу (способу) получения результата измерений их разделяют на прямые и косвенные. Прямыми называются такие измерения, при которых искомая величина измеряется непосредственно, а косвенными — при которых искомая величина вычисляется по формулам на основе измерений вспомогательных величин. Прямые измерения осуществляются методами сравнения и непосредственной оценки.

Метод сравнения позволяет определить измеряемую величину путем сравнения ее с мерой данной величины (например, измерение ЭДС путем сравнения ее с ЭДС нормального элемента). Таким образом, метод сравнения предусматривает использование образцовых мер. При электрических измерениях используют образцовые меры ЭДС, электрического сопротивления, емкости и взаимной индуктивности.

При методе непосредственной оценки измеряемая величина определяется непосредственно по показаниям измерительного прибора, отградуированного в значениях измеряемой величины (например, измерение тока амперметром). В судовой электротехнике при относительно невысокой точности измерений (0,5—4%) чаще всего применяют метод непосредственной оценки как наиболее простой, требующий наименьшего времени.

Все электроизмерительные приборы делятся на две основные группы: электромеханические и электронные. Электромеханическими называются приборы, у которых электромагнитная энергия, зависящая от измеряемой величины, преобразуется в механическое перемещение подвижной части прибора. Электронными называются приборы, у которых электромагнитная энергия преобразуется в отклонение электронного луча электронно-лучевой трубки. Соответственно методам измерений все электромеханические измерительные приборы делят на приборы непосредственной оценки и приборы сравнения. Приборы непосредственной оценки в свою очередь подразделяют на показывающие (у которых числовое значение измеряемой величины определяется по отсчетным приспособлениям) и интегрирующие (показывающие суммарное значение какой-либо электрической величины за определенный промежуток времени; например, счетчики ампер-часов).

На судах наибольшее распространение получили приборы непосредственной оценки, которые классифицируются по ряду признаков: по измеряемой величине (амперметры, вольтметры, фазометры и т. д.), по роду тока (приборы постоянного, переменного, постоянно-переменного тока), по степени точности (восемь классов точности: 0,05, 0,1, 0,2, 0,5, 1,0, 1,5, 2,5, 4,0), по принципу действия

(приборы магнитоэлектрической, электромагнитной и других систем), по конструкции отсчетного устройства (приборы с механическим или световым указателем, самопишущие или регистрирующие), по характеру применения (стационарные, переносные), по исполнению в зависимости от условий эксплуатации (водозащищенные, герметические, брызгозащищенные), по условиям механических воздействий (тряскопрочные, виброустойчивые, ударопрочные и т. д.), по способу создания противодействующего момента (логометры, приборы с механическим или магнитным противодействующим моментом), по положению нулевой отметки (приборы с одно- или двусторонней шкалой), по характеру шкалы (приборы с равномерной или неравномерной шкалой), по размерам корпусов (миниатюрные, малого, среднего или большого габарита) и др.

## ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Погрешности измерений могут быть систематические и случайные. Систематическими называются погрешности, происходящие из-за несовершенства измерительных приборов, методов измерений, а также органов зрения исследователя. Эти погрешности могут быть изучены, а их влияние на результат измерений уменьшается введением соответствующих поправок. Случайными называются погрешности, происходящие от случайных причин, а также от ошибок в отсчете показаний по шкале прибора или в записи наблюдений. Эти погрешности не могут быть предусмотрены заранее и учтены при вычислении конечного результата измерений.

Погрешностью прибора называется разница между значением, полученным при измерении величины прибором, и истинным значением этой величины. Погрешность прибора является одним из важнейших показателей качества и основным его признаком, положенным в основу классификации приборов по их точности. Понятия погрешности и точности приборов взаимосвязаны. Под точностью прибора понимают его погрешность, ограничивающую степень приближения к истинному значению измеряемой величины.

Погрешности приборов подразделяются на абсолютную, относительную, приведенную, основную и дополнительные.

Абсолютной погрешностью называется разность между показанием измерительного прибора и действительным значением измеряемой величины. Абсолютная погрешность выражается в значениях измеряемой и может быть положительной или отрицательной.

Относительной погрешностью называется отношение абсолютной погрешности прибора к действительному значению измеряемой величины, выраженное в процентах.

Приведенная погрешность равняется выраженному в процентах отношению абсолютной погрешности измерения к верхнему пределу измерений прибора.

Основной называется погрешность прибора, которую он имеет при нормальных условиях работы (нормальное положение, температура окружающей среды 20 ± 5° С и т. д.). Основная погрешность электроизмерительных приборов на всех отметках шкалы не превышает следующих значений:

| Класс точности прибора | Основная погрешность, % | Класс точности прибора | Основная погрешность, % |
|---|---|---|---|
| 0,05 | ±0,05 | 1 | ±1,0 |
| 0,1 | ±0,1 | 1,5 | ±1,5 |
| 0,2 | ±0,2 | 2,5 | ±2,5 |
| 0,5 | ±0,5 | 4 | ±4,0 |



Основная погрешность представляет собой сумму погрешностей от трения вращающихся частей, от опрокидывания (из-за наличия осевого зазора у приборов с вертикальной осью), от неуравновешенности (при несовпадении центра тяжести подвижной части и оси вращения), от неправильной градуировки и установки шкалы, от остаточной деформации пружин, от внутренних электрических и магнитных полей, от параллакса (погрешность отсчета показаний при неперпендикулярности луча зрения к шкале). Основная погрешность выражается в процентах от конечного значения рабочей части шкалы.

Кроме основной погрешности работу приборов характеризуют так называемые дополнительные погрешности, которые вызываются влиянием внешних причин и возникают при отклонении условий работы от нормальных. К числу дополнительных относятся погрешности, вызванные изменением рабочего положения прибора, температуры окружающего воздуха, частоты сети, влиянием внешнего магнитного и электрического полей и отклонением напряжения от номинального (табл. 1.5.1).

*Таблица 1.5.1*

**Допустимые погрешности показаний приборов**

| Нормируемые погрешности | Допустимые значения погрешностей (±) для приборов класса точности | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,5 | 4,0 |
| Основная погрешность | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,5 | 4,0 |
| Погрешность, обусловленная: | | | | | | | | |
| изменением температуры для приборов: | | | | | | | | |
| группы А | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,5 | 4,0 |
| группы Б | — | — | 0,15 | 0,4 | 0,8 | 1,2 | 2,0 | 3,0 |
| группы В | — | — | 0,15 | 0,3 | 0,5 | 0,8 | 1,2 | 2,0 |
| изменением рабочего положения приборов | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,5 | 4,0 |
| отклонением частоты на ±10% от номинальной | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,5 | 4,0 |
| отклонением напряжения на ±10% от номинального | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,5 | 4,0 |

Примечание. Нормируемые погрешности приведены в процентах от конечного значения рабочей части шкалы.

В зависимости от величины погрешностей все электроизмерительные приборы относятся к определенному классу точности. Цифра, обозначающая класс точности прибора, определяет наибольшую допустимую приведенную погрешность для нормальных условий работы прибора, т. е. его основную погрешность. Кроме того, обозначение класса точности характеризует и его допустимые дополнительные погрешности, обусловленные влиянием внешних факторов.

Таким образом, численное обозначение класса достаточно полно характеризует качество прибора, непосредственно указывая на его точность и подверженность влиянию внешних факторов.

## § 1.5.2. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Силу тока и напряжение в сетях постоянного тока измеряют амперметрами магнитоэлектрической системы, а в судовых сетях переменного тока — приборами электромагнитной и ферродинамической систем. Амперметры и вольтметры, имеющие равномерную шкалу, обеспечивают измерения в пределах от 0 до 100%, а при неравномерной шкале — от 25 до 100%.

Амперметры и вольтметры, предназначенные для измерений в сетях с изменяющейся нагрузкой или напряжением, выбирают с запасом по шкале сравнительно с номинальными данными измеряемой величины. Обычно при выборе приборов для генераторов и сетей с постоянной нагрузкой запас по шкале принимается около 25% номинальной величины, а для сетей с переменной нагрузкой и электроприводов с кратковременным режимом работы (шпили, краны, лебедки и т. д.) — до 50% номинальной величины тока.

Верхний предел шкалы амперметра, установленного для измерения нагрузки группового распределительного щита, должен соответствовать сумме номинальных токов потребителей, присоединенных к щиту.

Верхний предел шкалы каждого вольтметра должен составлять не менее 120—150% номинального рабочего напряжения.

Для дистанционного измерения постоянного тока (на расстоянии 100 м и более) разработаны специальные устройства, позволяющие избежать значительного завышения сечения подключающих проводов, — модификации амперметров постоянного тока с малым собственным потреблением мощности, включаемых со специальной подгоночной катушкой. Эти амперметры допускается соединять с шунтом проводами сопротивлением до 3,5 Ом, в то время как сопротивление калиброванных проводов составляет 0,035 Ом. Путем уменьшения сопротивления подгоночной катушки (за счет уменьшения числа витков) можно добиться сопротивления соединительных проводов до 3,5 ± 0,2 Ом.

Для измерений токов заряда и разряда аккумуляторных батарей используются специальные батарейные амперметры.

Для дистанционного измерения переменных токов при длине соединительной линии между трансформатором тока и амперметром, превышающей 25 м, амперметры рекомендуется включать через измерительный трансформатор тока со вторичной обмоткой на 5 А и специально разработанный промежуточный трансформатор тока (типа И1820) с первичным током 5 А и вторичным 0,3 или 1 А.

Для расширения пределов измерения по току и напряжению в сетях постоянного тока используются соответственно шунты и добавочные сопротивления, а в сетях переменного тока — измерительные трансформаторы, которые могут быть как внутренними (встроенными внутри корпуса прибора), так и наружными (изготовляемыми как отдельные устройства).

Мощности измеряют непосредственно — с помощью ваттметров ферродинамической системы.

Для измерения активной мощности в сетях переменного тока при несимметричной и симметричной нагрузках фаз разработаны ваттметры различных типов.

Измерения реактивной мощности, активной и реактивной энергии на судах, как правило, не производятся, но необходимость в подобного рода измерениях иногда возникает при испытании и исследовании судовых электроэнергетических установок.

Коэффициент мощности $\cos\varphi$ в сетях трехфазного тока может быть определен косвенным путем — замером с помощью амперметра, вольтметра соответственно значений тока, напряжения и мощности. Непосредственное измерение коэффициента мощности в судовых сетях производится с помощью щитовых фазометров электромагнитной системы, отградуированных в единицах коэффициентов мощности со шкалой $0_{емк} — 1 — 0_{инд}$.

Частоту переменного тока в судовых сетях измеряют стрелочными частотомерами ферродинамической или магнитоиндукционной системы. Так как при



эксплуатации в большинстве случаев требуется поддержание частоты с большой точностью (0,2—0,1%), то судовые частотомеры изготовляют с растянутым диапазоном измерения в зоне номинальных частот (со шкалами 45—55 и 350—450 Гц).

Момент синхронизации при включении на параллельную работу двух или нескольких генераторов трехфазного переменного тока на судах определяется с помощью стрелочных синхроноскопов электромагнитной системы (логометров). На шкале синхроноскопа обозначены две стрелки (одна с надписью «Быстрее», другая с надписью «Медленнее», дающие информацию о регулировке угловой скорости. В середине шкалы имеется отметка синхронизации. Синхроноскопы рассчитаны на кратковременное включение (не более 15 мин) на время синхронизации.

Порядок следования фаз трехфазного тока определяют посредством щитовых стрелочных фазоуказателей ферродинамической системы. При прямом порядке следования фаз указательная стрелка отклоняется вправо от своего нормального положения, т. е. в направлении стрелки, изображенной на шкале прибора. Отклонение в противоположную сторону свидетельствует об обратном порядке следования фаз.

## § 1.5.3. ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ СУДОВЫХ КИСЛОТНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Емкость кислотных аккумуляторных батарей, выражаемая в ампер-часах, обозначает количество электричества, которое можно получить от данного типа батареи за определенное время. Измерение емкости аккумуляторных батарей, т. е. количества электричества, расходуемого батареей при разряде, позволяет рационально эксплуатировать аккумуляторы, предотвращает ухудшение их параметров или выход из строя в случае глубокого разряда, дает возможность контролировать своевременный их разряд.

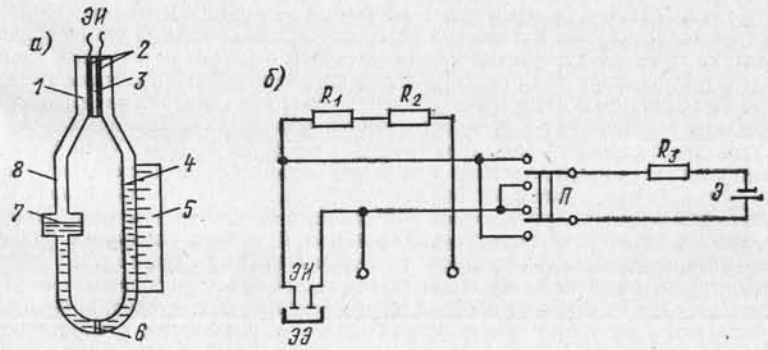



Рис. 1.5.1. Устройство электролитического счетчика ампер-часов.

Способ измерения ампер-часов основан на использовании в аккумуляторных счетчиках электрического водородного элемента — интегратора, подключаемого к батарейному шунту параллельно (рис. 1.5.1). При прохождении через шунт тока в прямом или обратном направлении (при заряде или разряде аккумуляторной батареи) по указателю счетчика соответственно отсчитывается сумма ампер-часов заряда или количество ампер-часов, отданное батареей за весь период разряда.

Электрический водородный элемент (рис. 1.5.1, *а*) представляет собой герметический стеклянный сосуд, состоящий из электродной камеры *1*, расположенной вверху сосуда, и U-образной трубки *8*. Электродная камера разделяется пополам пористым стеклянным диском *3*, на сторонах которого находятся сеточные пла-

тиновые электроды *2*, покрытые платиновой чернью. U-образная трубка имеет внутренний диаметр 5 мм. В нижней части трубка разделена на два колена диафрагмой *6* из пористого стекла. Посредине одного колена имеется расширение *7* на уровне середины отсчетного участка на прямолинейной части второго колена, около которого и располагается шкала *5*. В счетчике находится жидкость — электролит (30%-ный раствор серной кислоты), пропитывающий пористую перегородку в электродной камере и частично заполняющий U-образную трубку. Мениск *4* столба жидкости, находящийся на отсчетном участке, является указателем счетчика. Свободное пространство внутри элемента заполняется водородом.

При прохождении электрического тока через электроды на катоде выделяется водород, а на аноде одновременно такое же количество водорода поглощается, т. е. водород как бы перемещается из анодного пространства в катодное, причем общее количество водорода в счетчике остается неизменным. Вследствие этого давление водорода на жидкость перемещается в сторону анода. Если катодом является левый электрод, указатель перемещается по шкале вверх (режим разряда батареи), а если правый — то вниз (режим заряда). Последовательно с измерительными электродами *ЭИ* электролитического элемента *ЭЭ* подключается компенсационное медное сопротивление $R_1$ и подгоночное сопротивление из манганина $R_2$ (рис. 1.5.1, *б*). С помощью переключателя *П* и вспомогательного элемента *Э* можно изменить полярность электродов и соответственно перемещать указатель (с целью коррекции) вверх или вниз. Последовательно с элементом *Э* включается добавочное сопротивление $R_3$. Перемещение указателя электролитического элемента пропорционально величине тока и времени его прохождения через элемент, т. е. пропорционально ампер-часам.

## § 1.5.4. ОСОБЕННОСТИ И ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ В СУДОВЫХ СЕТЯХ

Состояние изоляции — одна из основных характеристик судовых электроэнергетических установок, так как наиболее частой причиной выхода из строя электрических машин, электрооборудования и сетей в процессе их эксплуатации является снижение пробивного напряжения изоляции из-за теплового старения, механического износа, чрезмерного увлажнения и т. д. Поскольку определить электрическую прочность изоляции в эксплуатационных условиях на судах практически невозможно, измеряют ее сопротивление. Хотя численное значение сопротивления изоляции и не может служить основным и единственным критерием оценки ее общего состояния, сравнение замеров, произведенных в разные периоды времени, дает возможность судить о состоянии изоляции. При значительном снижении сопротивления изоляции в эксплуатационных условиях необходимо определить его причины и по возможности их устранить.

Контроль состояния изоляции путем замера ее сопротивления мегомметрами — один из наиболее простых и распространенных методов, применяемых при испытании изоляции электрических машин и аппаратуры как на заводах-изготовителях, так и в процессе эксплуатации на судах, а также при контроле сопротивления изоляции электрических сетей. Поэтому за состоянием и численным значением сопротивления изоляции судовых сетей, машин и аппаратов необходимо следить регулярно в течение всего срока их работы.

Для обеспечения надежной, безаварийной и безопасной работы судовых сетей с изолированной нейтралью и их отдельных элементов необходимо стремиться поддерживать сопротивление изоляции на определенном уровне. Естественно, что на судах из-за повышенной влажности воздуха и насыщенности его солями состояние изоляции ухудшается быстрее, чем в береговых установках. Металлический корпус судна, кроме того, способствует увеличению токов утечки. Постоянное прохождение токов утечки через слабые места изоляции ускоряет ее разрушение, создавая тем самым опасность возникновения пожаров, аварии электрооборудования, а также поражения обслуживающего персонала током.

Токи утечки, зависящие от состояния изоляции, разделяются на токи утечки между проводами через корпус судна и токи утечки непосредственно от проводника к проводнику. Последние практически не могут быть измерены в условиях эксплуатации электрооборудования на судне. Таким образом, любой централизованный контроль состояния изоляции судовой электроэнергетической системы во время эксплуатации способствует определению только сопротивления изоляции относительно земли (корпуса судна). При этом приборы для централизованного контроля за состоянием изоляции относительно корпуса судна регистрируют только суммарное значение всех параллельно включенных сопротивлений изоляции, не позволяя установить значение сопротивления изоляции и фидер, на котором возникло повреждение (снижение сопротивления) изоляции. Поврежденный фидер можно определить только путем последовательного отключения отдельных фидеров. О состоянии изоляции судят по численному значению ее сопротивления между фазами (полюсами) сети, обмотками электрических машин или трансформаторов между собой или по отношению к корпусу судна.



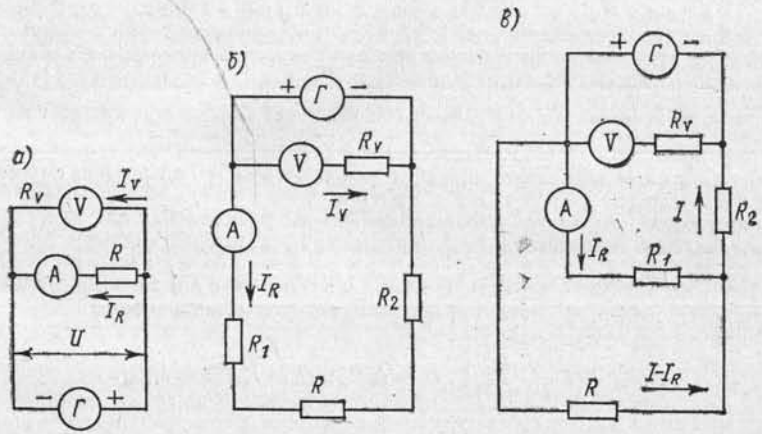



Рис. 1.5.2. Принципиальные схемы: *а* — омметра; *б* — омметра-логометра по схеме последовательного включения измеряемого сопротивления; *в* — омметра-логометра по схеме параллельного включения.

Действующие правила (Правила Регистра СССР и др.) предусматривают нормы сопротивления изоляции для отдельных участков кабельной сети, отдельных потребителей электроэнергии, распределительных щитов и т. д. Общее сопротивление изоляции судовой электроэнергетической системы зависит от многочисленных факторов (числа фидеров, их протяженности, числа потребителей на каждом фидере, сопротивления изоляции отдельных потребителей и кабельных участков, времени эксплуатации судна, влажности и температуры воздуха и пр.), что делает невозможным создание единых норм допустимого общего сопротивления изоляции для различных типов судов.

Основные принципы построения измерительных схем мегомметров поясняются схемами, изображенными на рис. 1.5.2. Сопротивление $R$ (рис. 1.5.2, *а*) может быть вычислено согласно закону Ома по значениям напряжения $U$ и тока $I_R$, замеренных с помощью вольтметра $V$. Если напряжение $U$ поддерживать постоянным, то по показанию амперметра $A$ можно будет судить о значении сопротивления $R = \frac{k}{I_R}$ ($k$ — постоянный коэффициент). Амперметр, отградуированный в единицах сопротивления (омы, килоомы, мегомы), и будет простейшим о м м е т р о м (последовательная схема омметра). Показания таких омметров в большой степени зависят от колебания напряжения источника питания *Г*. Чтобы исключить влияние колебания напряжения источника питания, нужно применить прибор, измеряющий не силу тока, а отношение двух токов, — л о г о м е т р. Если напряжение, измеряемое вольтметром, представить как

$U = I_V R_V$, где $I_V$ — ток в цепи вольтметра, а $R_V$ — внутреннее сопротивление вольтметра, то

$$R = \frac{U}{I_R} = \frac{I_V R_V}{I_R} = k_1 \frac{I_V}{I_R},$$

где $\frac{I_V}{I_R}$ — отношение токов, проходящих через вольтметр и измеряемое сопротивление. Как видно из формулы, результат измерений не зависит от колебаний напряжения источника питания, потому что в случае изменения напряжения оба тока ($I_V$ и $I_R$) изменяются пропорционально, а следовательно, их отношение и соответственно результат замера сопротивления $R$ остаются неизменными.

Принципиальная схема омметра-логометра по схеме последовательного включения измеряемого сопротивления изображена на рис. 1.5.2, *б*. Для ограничения токов в последовательной цепи при замыкании зажимов прибора накоротко включены постоянные по значению известные сопротивления $R_1$ и $R_2$. Если замеряемое сопротивление $R = 0$, то $k_1 \frac{I_V}{R_V} = R_1 + R_2$, чему соответствует начало отсчета по шкале. Если сопротивление $R = \infty$, т. е. цепь разомкнута, то $I_R = 0$, чему соответствует конечная отметка шкалы. Такие приборы называются омметрами с бесконечным пределом измерения.

Омметры-логометры с последовательной схемой применяются для измерения больших значений сопротивлений. Для измерения относительно малых сопротивлений используются омметры-логометры по схеме параллельного включения измеряемого сопротивления (рис. 1.5.2, *в*). Для этой схемы характерны следующие зависимости:

$$U = IR_2 + I\frac{R_1 R}{R_1 + R}; \quad U = I_V R_V; \quad (I - I_R) R = I_R R_1.$$

Решая указанные уравнения, получим

$$IR - I_R R = I_R R_1,$$

или

$$I_V R_V = I_R \left(\frac{R_1 + R}{R}\right)\left(R_2 + \frac{R_1 R}{R_1 + R}\right),$$

или

$$\frac{I_V}{I_R} R_V = \left(1 + \frac{R_1}{R}\right) R_2 + R_1.$$

Так как $\frac{I_V}{I_R} = k_2 = f(R)$, то и $\frac{I_V}{I_R} = f(\alpha)$.

В уравнениях $R_1$ — сопротивление в последовательной цепи логометра; $R_2$ — ограничивающее сопротивление; $I$ — общий ток источника питания; $I_R$ — ток в последовательной цепи логометра (но не в цепи измеряемого сопротивления); $I_V$ — ток в параллельной цепи логометра; $R$ — измеряемое сопротивление.

Если $R = \infty$, то $\frac{I_V}{I_R} R_V = R_1 + R_2$. При закороченных зажимах $R_2 = 0$ и $I_V = 0$. Тогда $\frac{I_V}{I_R} R_V = R_1$, т. е. измерение невозможно.

По углу поворота $\alpha$ подвижной части логометра можно судить о численном значении измеряемого сопротивления, что позволяет градуировать шкалу непосредственно в единицах сопротивления. При отсутствии в рамках логометра



тока, а следовательно, и вращающего момента его подвижная часть может занимать любое произвольное положение.

Поскольку сопротивление изоляции имеет сравнительно высокие значения, прибор, измеряющий токи или отношение токов, должен быть весьма чувствительным, а напряжение источника тока — как можно большим. Например, при измерении сопротивления 25 МОм и напряжении источника тока 500 В ток в измеряемой цепи будет равен 2 мкА.

Следует отметить, что даже в случаях измерения сопротивления изоляции омметрами-логометрами колебания напряжения источника питания не влияют на результат измерения лишь тогда, когда емкость измеряемой электрической сети (электрической машины, аппаратуры) сравнительно мала. В случае больших емкостей измеряемого объекта (протяженная кабельная линия, обмотка машины) колебания напряжения источника питания вызовут колебания стрелки логометра и затруднят измерение. Эти колебания стрелки объясняются зарядно-разрядными токами емкости измеряемого объекта, проходящими через токовую рамку логометра в сторону источника тока при уменьшении напряжения генератора и в сторону потребителя — при повышении напряжения.

Существующая практика периодического контроля сопротивления изоляции судовых сетей не всегда является достаточно эффективной, так как нет гарантии постоянства измеренного значения сопротивления изоляции в промежутках между измерениями. В тех случаях, когда необходим непрерывный контроль за сопротивлением изоляции сетей переменного тока, применяется устройство типа «Электрон», в основу работы которого положен принцип наложения постоянного тока на контролируемую сеть.

Устройство «Электрон» выполнено на бесконтактных элементах и позволяет с помощью встроенной в него сигнальной лампы и выносного звонка сигнализировать о снижении сопротивления изоляции в контролируемой сети ниже установленного значения. Устройство «Электрон» может получать питание как от контролируемой сети, так и от постороннего источника. В последнем случае в цепи питания устройства должен быть предусмотрен выключатель для снятия в случае надобности напряжения контролируемой сети. Технические характеристики устройства «Электрон» приведены во втором томе справочника.

## § 1.5.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОВПАДЕНИЯ ФАЗ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Определение совпадения фаз при включении синхронных генераторов на параллельную работу на судах основано на использовании синхроноскопов — электромагнитных измерительных механизмов с замкнутым магнитопроводом (статором). В пазах статора $S$ уложена трехфазная обмотка, а внутри помещается ротор с обмоткой возбуждения $B$. Обмотка статора и обмотка возбуждения ротора через добавочные сопротивления $R_д$ подключаются соответственно к напряжению синхронизируемого генератора и сети (рис. 1.5.3).

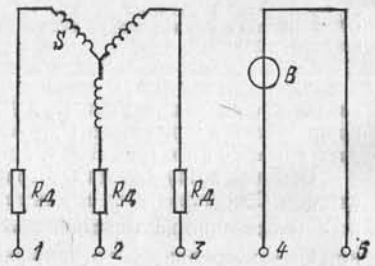


Рис. 1.5.3. Принципиальная схема определения совпадения фаз.

Взаимодействие магнитных полей ротора и статора создает вращающий момент, приводящий ротор во вращение с частотой, пропорциональной разности частот работающего и подключаемого генераторов. При равенстве частот вращения ротор и укрепленная на его оси стрелка устанавливаются в определенное положение, зависящее от угла сдвига одноименных фаз работающего и подключаемого генераторов. При равенстве частот и совпадении фаз стрелка прибора устанавливается на отметке синхронизации.

Во избежание ложных отсчетов следует иметь в виду, что при отключении питания стрелка синхроноскопа может занимать любое положение по шкале. Технические характеристики судовых синхроноскопов приведены во втором томе справочника.

## § 1.5.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРЯДКА СЛЕДОВАНИЯ ФАЗ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Определение порядка следования фаз основано на использовании фазоуказателей — ваттметровых измерительных механизмов ферродинамической системы с двумя параллельными цепями, принципиальная схема которых приведена на рис. 1.5.4, *а*.

Принцип действия фазоуказателя основан на взаимодействии тока в подвижной обмотке (рамке), укрепленной на подвижной части прибора, $I_р$ с током в неподвижной обмотке (обмотке возбуждения) $I_в$. Как видно из принципиальной схемы прибора, обмотка рамки *OP* последовательно с добавочным сопротивлением $R_1$ включается между зажимом *1* сети и искусственной нулевой точкой, обра-

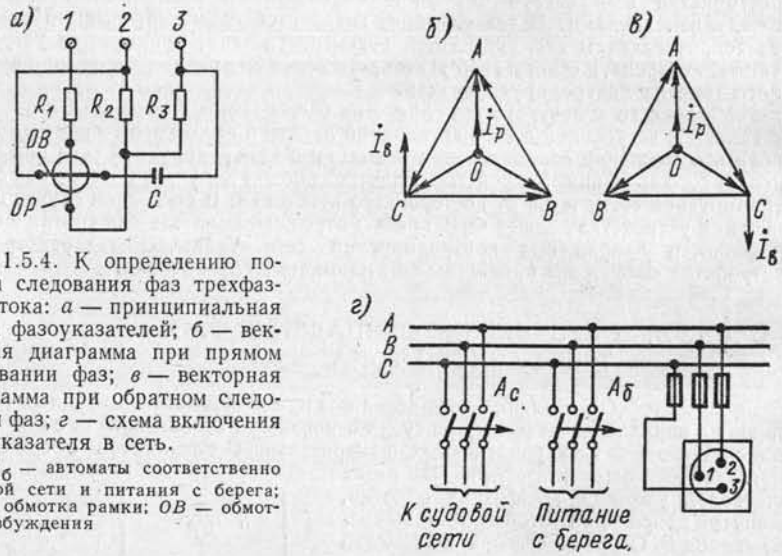



Рис. 1.5.4. К определению порядка следования фаз трехфазного тока: *а* — принципиальная схема фазоуказателей; *б* — векторная диаграмма при прямом следовании фаз; *в* — векторная диаграмма при обратном следовании фаз; *г* — схема включения фазоуказателя в сеть.

$A_с$, $A_б$ — автоматы соответственно судовой сети и питания с берега; *OP* — обмотка рамки; *OB* — обмотка возбуждения

зованной сопротивлениями $R_2$ и $R_3$. Следовательно, ток в обмотке рамки $I_р$ пропорционален напряжению $U_{AO}$ между клеммами *1—2* (см. рис. 1.5.4, *а*) и совпадает с ним по фазе (рис. 1.5.4, *б* и *в*).

Обмотка возбуждения *OB* совместно с последовательно включенным конденсатором *C* подключается к зажимам *2—3*, т. е. к линейному напряжению $U_{BC}$, и соответственно вектор тока обмотки возбуждения $\dot{I}_в$ опережает на 90° вектор приложенного линейного напряжения $U_{BC}$, вследствие чего векторы $\dot{I}_в$ и $\dot{I}_р$ параллельны. В зависимости от порядка следования фаз в контролируемой сети вектор $\dot{I}_в$ направлен в ту же сторону, что и вектор $\dot{I}_р$, или навстречу ему.

Если индуктивность рамки и активное сопротивление обмотки возбуждения, ввиду их незначительной величины и, следовательно, малого влияния на показания прибора, не учитывать, то из векторной диаграммы, изображенной на рис. 1.5.4, *б*, видно, что при прямом порядке следования фаз вектор тока в обмотке возбуждения $\dot{I}_в$ параллелен вектору в обмотке рамки $\dot{I}_р$ и совпадает с ним



по направлению. Вращающий момент равен $M_{вр} = kI_вI_р \cos\varphi$, где $k$ — коэффициент пропорциональности; $\varphi$ — угол сдвига фаз между токами $\dot{I}_в$ и $\dot{I}_р$. Так как при прямом порядке следования фаз $\varphi = 0$, то $\cos\varphi = 1$ и $M_{вр} = kI_вI_р$.

При обратном порядке следования фаз (рис. 1.5.4, *в*) вектор напряжения $\dot{U}_{BC}$ меняет свое направление на противоположное, а следовательно, и вектор тока в обмотке возбуждения $\dot{I}_в$ меняет направление, оказываясь в противофазе с вектором тока в обмотке рамки.

Вращающий момент в этом случае равен $M_{вр} = kI_вI_р \cos\varphi = -kI_вI_р = -1$, так как при обратном следовании фаз $\varphi = 180°$ и $\cos\varphi = -1$.

Таким образом, направление вращающего момента, приложенного к подвижной части фазоуказателя, зависит от взаимного направления векторов тока $\dot{I}_в$ и $\dot{I}_р$, т. е. от порядка следования фаз контролируемой сети.

При прямом порядке следования фаз указательная стрелка фазоуказателя отклоняется вправо от своего нормального положения, т. е. в направлении стрелки, изображенной на шкале прибора. Отклонение стрелки в противоположную сторону свидетельствует об обратном порядке следования фаз.

# РАЗДЕЛ 2

# СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

## Глава 2.1. ТЕРМИНЫ, ПОКАЗАТЕЛИ, РОД ТОКА, ЧАСТОТА И НАПРЯЖЕНИЕ СЭЭС

### § 2.1.1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Судовой электроэнергетической системой (СЭЭС) называется совокупность судовых электротехнических устройств, объединенных процессом производства, преобразования и распределения электроэнергии и предназначенных для питания судовых приемников (потребителей) электроэнергии.

Любую СЭЭС условно можно считать состоящей из трех частей, в первую из которых входят судовые электростанции (основные и аварийные), во вторую — силовая электрическая сеть, в третью — сети одноименных потребителей.

Судовой электростанцией принято называть совокупность источников электроэнергии с главным распределительным щитом (ГРЩ), к которому они подключены. Электрическая сеть состоит из линий электропередачи и электрораспределительных щитов. Силовая электрическая сеть начинается от ГРЩ и заканчивается у преобразователей или потребителей электроэнергии. Электрическая сеть одноименных потребителей начинается от преобразователей электроэнергии (преобразователь входит в данную сеть) и заканчивается у потребителей. Аварийная электрическая сеть начинается от аварийного распределительного щита и заканчивается у потребителей.

В качестве источников электрической энергии на современных судах применяются дизель-генераторы, турбогенераторы и валогенераторы (генераторы с приводом от гребного вала или утилизационной турбины) постоянного или переменного тока, а также аккумуляторные батареи. В качестве преобразователей электрической энергии используются как электромашинные (вращающиеся), так и статические агрегаты. Электрораспределительные щиты, входящие в СЭЭС, в зависимости от назначения подразделяют на главные, аварийные, районные, отсечные, групповые и щиты электроснабжения (питания) с берега.

Главным электрораспределительным щитом называется щит, предназначенный для присоединения источников электроэнергии к силовой судовой электрической сети и для управления работой источников электроэнергии.

Аварийным электрораспределительным щитом называется щит, предназначенный для присоединения аварийного источника электроэнергии к электрической аварийной сети и управления работой аварийного источника электроэнергии.

Районным электрораспределительным щитом называется щит, предназначенный для распределения электроэнергии в пределах определенного района и обеспечивающий электроэнергией два и более отсечных щита.

Отсечным электрораспределительным щитом называется щит, предназначенный для распределения электроэнергии в пределах определенного отсека судна.



Групповым электрораспределительным щитом называется щит, предназначенный для распределения электроэнергии между группой приемников одинакового назначения.

Распределительным щитом электроснабжения с берега называется щит, предназначенный для присоединения к береговой электрической сети или аналогичному устройству другого судна главного распределительного щита электростанции.

Линии электропередачи подразделяются на фидерные и магистральные. Фидером называют линию электропередачи, включенную между двумя любыми электрораспределительными щитами либо между распределительным щитом и потребителем или источником электроэнергии. Магистралью называют линию электропередачи, параллельно к которой по ее длине подключается ряд распределительных щитов или отдельных приемников электроэнергии. В соответствии с этим различают фидерные, магистральные или магистрально-фидерные силовые судовые электрические сети.

Источники электрической энергии в зависимости от назначения подразделяют на основные, резервные и аварийные. Основным является источник, предназначенный для работы в любом режиме СЭЭС; резервный предназначен для обеспечения резерва мощности системы, аварийный — для работы в аварийном режиме СЭЭС.

Каждая СЭЭС может характеризоваться конфигурацией, структурой, схемой, состоянием, режимами работы, технико-экономическими параметрами и показателями.

Конфигурацией энергосистемы называется топографически представленное (на виде сбоку и на плане судна) расположение входящих в нее электростанций, основных кабельных трасс или шинопроводов, преобразователей, распределительных щитов и отдельных потребителей.

Структурой является краткая характеристика основных элементов, составляющих СЭЭС, с указанием их параметров и основных связей.

Оформление СЭЭС на чертежах производится в виде схем — структурных, общих и расположения. Для отдельных элементов СЭЭС выпускаются схемы принципиальные, функциональные, подключений и соединений.

Среди большого разнообразия состояний СЭЭС можно выделить нормальные и ненормальные (в том числе аварийные) состояния. Нормальным является такое состояние, когда СЭЭС обеспечивает производство и распределение электроэнергии заданного качества от основных или резервных источников электроэнергии по потребителям в любом их сочетании. Всякое отклонение от этого состояния следует называть ненормальным. К такому можно отнести состояние перегрузки отдельных элементов, короткого замыкания в любой точке системы, отключения части потребителей или источников электроэнергии, ухудшения показателей качества электроэнергии и т. п. Большинство ненормальных состояний СЭЭС прерывается соответствующей автоматической защитой.

Аварийным считается такое состояние, когда СЭЭС обеспечивает производство и распределение электроэнергии требуемого качества от аварийных источников электроэнергии по потребителям аварийного назначения согласно Правилам Регистра СССР и Правилам Речного Регистра РСФСР. Аварийное состояние СЭЭС обычно рассматривается в рамках состояния системы высшего ранга, которой является судно в целом.

Различают установившийся и переходный режимы работы СЭЭС.

Установившимся является такой режим, когда энергосистема работает при практически постоянных параметрах или при очень медленных их изменениях в заданных пределах.

Переходным является режим, который возникает при быстром (скачкообразном) изменении параметров и характеризует переход от одного установившегося режима к другому установившемуся режиму.

К параметрам системы относят значения тока, мощности, напряжения, частоты, сопротивления, проводимости и т. п. (иногда эти параметры разделяют на параметры процессов, протекающих в системе, и параметры собственно системы).

## § 2.1.2. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СЭЭС

Проектирование конкретной СЭЭС и ее составных элементов осуществляется с учетом технико-экономических показателей, которые характеризуют: 1) надежность и живучесть производства и распределения электроэнергии при всех возможных состояниях и режимах работы; 2) качество производства и распределения электрической энергии; 3) массу и габариты; 4) строительную стоимость; 5) эксплуатационные расходы; 6) уровень автоматизации; 7) уровень унификации; 8) уровень шума, помех радиоприему и др.

Перечисленные показатели СЭЭС во многом взаимосвязаны. Задание и реализация этих показателей в практике осуществляются принятием компромиссных решений на основании анализа ряда вариантов. Однако во всех случаях базовыми являются показатели надежности, живучести и качества функционирования СЭЭС (качества производства и распределения электроэнергии). Следующими по значимости можно считать показатели массогабаритные, строительной стоимости, эксплуатационных расходов и др.

Необходимо стремиться к получению высоких показателей по надежности, живучести, качеству функционирования при допустимых показателях по массе, габаритам, строительной стоимости, эксплуатационным расходам, уровням шума и т. д.

Высокая надежность и живучесть СЭЭС должны обеспечиваться с учетом всех возможных воздействий (электрических, механических и климатических) как на систему в целом, так и на ее отдельные элементы. С этой целью в СЭЭС используют составные элементы, имеющие должную безотказность и восстанавливаемость, применяют резервирование элементов и соответствующие связи между ними, предусматривают надлежащее размещение элементов и связей. Повышение долговечности достигается снижением удельных нагрузок, применением материалов, имеющих высокую износоустойчивость, соответствующей защитой от внешних воздействий.

Качество производства и распределения электрической энергии СЭЭС определяется на основании расчетов установившихся и переходных процессов, которые могут иметь место при включении и отключении мощных потребителей, включении генераторов на параллельную работу, изменении режима работы силовой установки судна и т. п.

Снижение массы и габаритов достигается путем создания рациональных схем и конструктивных форм, применения материалов, допускающих наибольшие удельные нагрузки, правильным выбором рода тока, частоты, напряжения и других параметров СЭЭС и ее элементов.

Снижение строительной стоимости достигается увеличением серийности, применением широкой унификации и типизации, отказом от использования дефицитных и дорогих материалов и др.

Эксплуатационные расходы находятся в прямой зависимости от надежности, долговечности, ремонтопригодности, коэффициента полезного действия, численности экипажа и т. п.

Определение уровня автоматизации обычно производится на основании отдельных технико-экономических расчетов (с выявлением влияния на надежность, качество, массу, габариты, стоимость, эксплуатационные расходы). В некоторых случаях автоматизация необходима по технологическим особенностям работы электроустановки.

Повышение уровня унификации требуется главным образом для снижения строительной стоимости и снижения эксплуатационных расходов.

Разработка СЭЭС осуществляется в увязке со стадиями проектирования судов. В стадии эскизного проектирования производят выбор конфигурации и структуры СЭЭС, а также рода тока, частоты и напряжения, руководствуясь в основном общесудовыми требованиями, а также требованиями по надежности, массогабаритным показателям, стоимости, качеству функционирования и др.



В стадии технического проектирования уточняется конфигурация и структура СЭЭС, разрабатываются все принципиальные схемы, производится выбор всех параметров и показателей СЭЭС на основании подробных расчетов.

При разработке рабочих чертежей осуществляется реализация и некоторое уточнение параметров и показателей СЭЭС.

## § 2.1.3. РОД ТОКА, ЧАСТОТА И НАПРЯЖЕНИЕ СЭЭС

Род тока является параметром, от которого зависят, по существу, все особенности и свойства энергосистемы. Поэтому при проектировании СЭЭС вопросу выбора рода тока уделяется большое внимание.

История строительства судов показывает, что в начальные периоды отдавалось предпочтение постоянному току, позднее — переменному току, потом снова постоянному току. В последние десятилетия на большинстве судов применяются электроэнергетические системы переменного тока. В перспективе в связи с развитием новых источников электрической энергии можно ожидать расширения степени использования постоянного тока.

Правильное решение о выборе рода тока электроэнергетической системы данного судна может быть принято только на основании технико-экономического сравнения вариантов СЭЭС.

В общем плане при этом можно отметить, что современные электрические машины переменного тока (частотой 50 Гц) по сравнению с машинами постоянного тока имеют меньшие габариты, массу и стоимость, более надежны и долговечны, требуют меньших эксплуатационных расходов. Однако в некоторых случаях только с применением машин постоянного тока удается создать электропривод с широким и плавным регулированием частоты вращения при близких по значению других показателях по сравнению с электроприводами переменного тока. Вместе с тем развитие полупроводниковой техники в перспективе будет содействовать расширению применения электроприводов переменного тока.

Современные контактные электромагнитные аппараты переменного тока менее надежны по сравнению с аппаратами постоянного тока. Показатели других аппаратов постоянного и переменного тока примерно равнозначны. Распределительные устройства постоянного и переменного тока по массе, габаритам и стоимости имеют несущественные различия.

Практика показывает, что на большинстве крупных и средних современных судов транспортного и промыслового флотов и судах технического флота целесообразно применение СЭЭС переменного тока. На мелких судах и судах специализированного назначения иногда предпочтительными оказываются СЭЭС постоянного тока.

На ряде судов, где массогабаритные показатели являются решающими, признано целесообразным использование СЭЭС переменного тока частотой 400 Гц вместо переменного тока частотой 50 Гц. К числу таких судов относятся: суда на подводных крыльях, воздушной подушке, глиссирующие и т. п. Это дает возможность увеличить частоту вращения электроприводов и механизмов примерно в два-три раза (в отдельных случаях и больше), в результате чего значительно уменьшаются габариты и масса агрегатов двигатель—механизм и двигатель—генератор. Так, например, повышение синхронной частоты вращения асинхронных двигателей с 3000 до 8000 об/мин дает снижение их массы в 2,5—3,5 раза и габаритов в 2,5 раза. Мощность трансформаторов при переходе с частоты 50 Гц на частоту 400 Гц при одинаковом их объеме можно увеличить приблизительно в 2,5—3,0 раза.

При частоте 400 Гц переменного тока значительно улучшаются массогабаритные показатели электромагнитных аппаратов (трансформаторов, дросселей, магнитных усилителей и т. п.), существенно уменьшается время протекания электромагнитных переходных процессов, а также резко улучшаются массогабаритные показатели элементов электроавтоматики, что в совокупности является весьма важным обстоятельством в деле широкого внедрения автоматики на судах [26].

Передача и распределение электрической энергии на судах осуществляется в основном с использованием кабелей. На участках небольшой длины и при больших токах иногда применяются шинопроводы. Сечение, а следовательно, масса и габариты кабелей и кабельных трасс определяются главным образом током, передаваемым по ним. При заданном напряжении величина тока пропорциональна передаваемой мощности. С ростом мощности СЭЭС увеличиваются масса и габариты кабельных трасс. Основным средством их уменьшения является повышение напряжения. При мощности СЭЭС в несколько киловатт применяют напряжения 12, 24 В, при мощности в десятки киловатт — напряжения 110, 127 В, при мощности в сотни киловатт — напряжения 220, 380 В, при мощности в тысячи и десятки тысяч киловатт — напряжения 380, 660, 6000, 10 000 В.

Выбор напряжения обычно производится на основании технико-экономических сравнений ряда вариантов СЭЭС. При этом рассматривается комплекс вопросов, связанных с принятием напряжения для электростанций, сети распределения электроэнергии, отдельных наиболее крупных по мощности потребителей электрической энергии, сетей освещения, сетей связи, управления и др.

В конечном итоге на выбор уровня напряжения СЭЭС оказывают влияние не только масса и габариты кабелей, но и ряд других факторов (токи короткого замыкания, коммутационная способность аппаратов, надежность и сроки службы изоляции, безопасность обслуживания, перенапряжения, масса и габариты распределительных устройств и др.).

# Глава 2.2. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ СЭЭС И СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

## § 2.2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СЭЭС

Схема СЭЭС определяется архитектурным типом, назначением, особенностями эксплуатации и обслуживания судна, а также силовой установкой, обеспечивающей его ходовые качества. Связанные с этим требования к СЭЭС содержатся в Правилах Регистра, решениях международных конвенций и излагаются в техническом задании на проектирование судна.

В общем случае СЭЭС можно классифицировать по трем признакам:

1) количеству электростанций, составляющих СЭЭС;
2) виду линий электропередачи, используемых в системе;
3) связи СЭЭС с силовой установкой (энергетической системой) судна.

По первому признаку СЭЭС делятся на системы с одной, двумя, тремя и большим количеством электростанций; по второму — на фидерные, магистральные и фидерно-магистральные, по третьему — на автономные, с отбором мощности от силовой установки и единые с силовой установкой.

## § 2.2.2. АВТОНОМНЫЕ СЭЭС

На рис. 2.2.1 представлено три варианта структурных схем автономных СЭЭС. Каждая из этих СЭЭС имеет автономные источники электрической энергии — турбогенераторы или дизель-генераторы, главные распределительные щиты, распределительные щиты, трансформаторы, выпрямители, щит питания с берега и линии электропередачи.

СЭЭС с двумя основными электростанциями более надежна и живуча по сравнению с СЭЭС, имеющей одну основную электростанцию. Однако первый вариант является более сложным и дорогим. К двум электростанциям приходится прибегать при необходимости в установке на судне большого количества генераторов и значительной их мощности (например, при мощности электростанции 3000 кВт и напряжении 400 В ударные токи короткого замыкания могут дости-



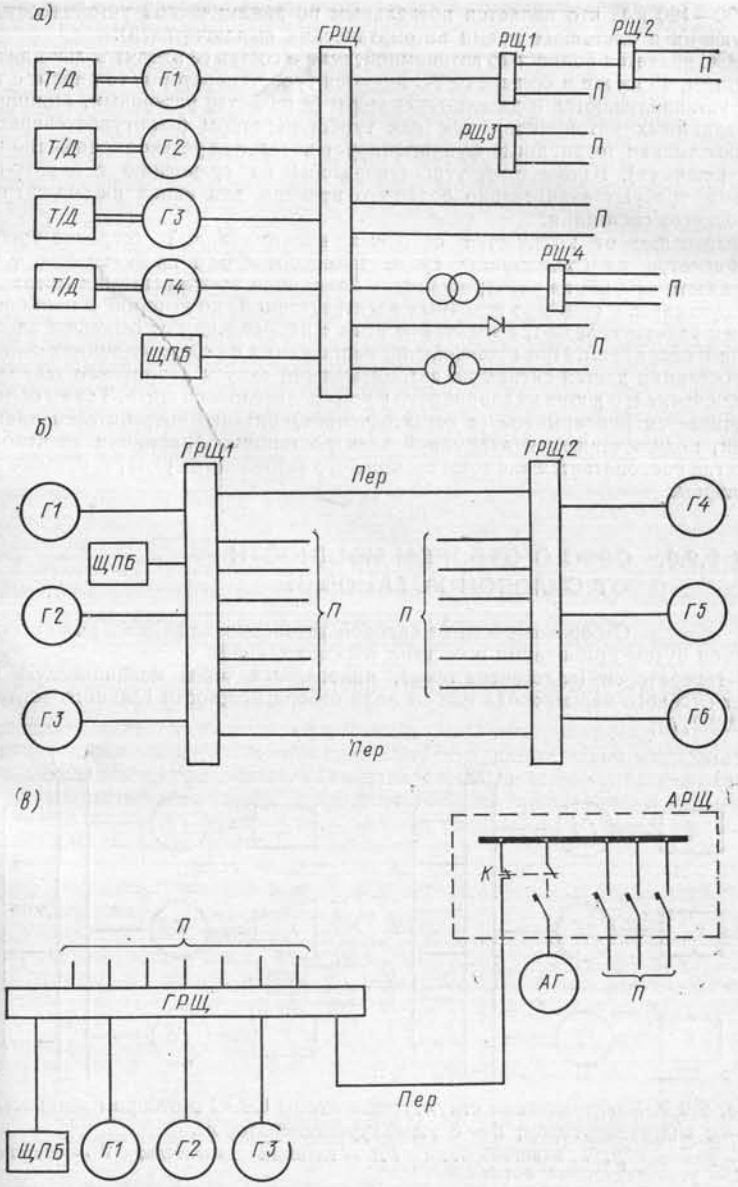



Рис. 2.2.1. Электрические структурные схемы автономной СЭЭС: *а* — с одной основной электростанцией; *б* — с двумя основными электростанциями; *в* — с одной основной и одной аварийной электростанциями.

*Т/Д* — турбина или дизель; *Г1—Г6* — генераторы; *ГРЩ, ГРЩ1, ГРЩ2* — главные распределительные щиты; *РЩ1—РЩ4* — распределительные щиты; *ЩПБ* — щит питания с берега; *П* — потребитель; *Пер* — перемычка; *АРЩ* — аварийный распределительный щит; *АГ* — аварийный генератор; *К* — контактор.

гать 100—120 кА, что является предельным по динамической устойчивости существующих в настоящее время автоматических выключателей).

СЭЭС является полностью автономной, если в состав ее входят только дизель-генераторы. Если же в составе СЭЭС имеются турбогенераторы, то вместе с ними всегда устанавливаются и дизель-генераторы (в качестве резервных, стояночных или аварийных источников), так как турбогенераторы (паротурбогенераторы) работают только тогда, когда функционирует котельная установка (обычно в ходовых режимах). Кроме того, турбогенераторы по сравнению с дизель-генераторами требуют значительно большего времени для ввода их под нагрузку с «холодного» состояния.

Независимо от количества основных электростанций согласно требованиям Регистра на большинстве судов транспортного и промыслового флотов должна быть аварийная электростанция. Аварийная электростанция имеет электрическую связь с одной из основных электростанций, по которой в нормальных режимах работы передается электроэнергия в направлении от основной электростанции к аварийной. При исчезновении напряжения на сборных шинах основной электростанции дается сигнал на автоматический запуск аварийного генератора и подключение его к шинам аварийного распределительного щита. Таким образом, обеспечивается непрерывное (с переключением) питание потребителей электроэнергии, подключенных к аварийной электростанции. Аварийная электростанция всегда располагается вне зоны возможного затопления судна, т. е. выше главной палубы.

## § 2.2.3. СЭЭС С ОТБОРОМ МОЩНОСТИ ОТ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

Отбор мощности от силовой установки для СЭЭС может осуществляться путем применения в составе электростанций:

1) генераторов (валогенераторов), приводимых через механическую передачу от судового валопровода или от вала отбора мощности главного двигателя (рис. 2.2.2, *а*);

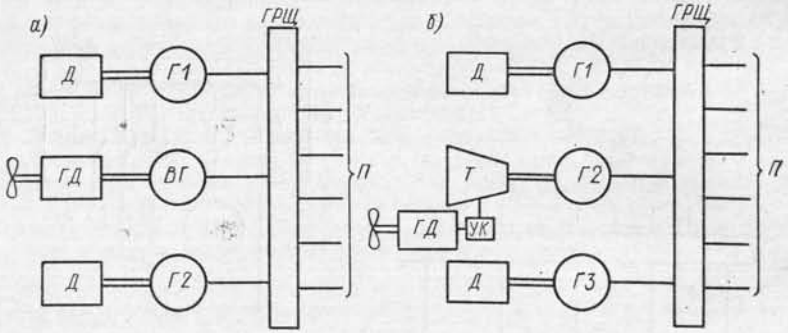



Рис. 2.2.2. Электрические структурные схемы СЭЭС с отбором мощности: *а* — с валогенератором; *б*— с утильтурбогенератором.

*Д* — дизель; *ВГ* — валогенератор; *ГД* — главный двигатель; *Т* — турбина; *УК* — утилизационный котел.

2) турбогенераторов (утильтурбогенераторов), которые получают пар от утилизационных котлов, использующих тепло выхлопных газов главных двигателей (рис. 2.2.2, *б*).

Первые могут применяться как на теплоходах, так и на пароходах, вторые — только на теплоходах. Существуют также комбинированные системы, которые имеют валогенераторы и турбогенераторы отбора мощности.



Очевидно, что валогенераторные системы являются системами непосредственного отбора мощности, а утильтурбогенераторные — системами косвенного отбора мощности.

Применение рассматриваемых систем целесообразно на тех судах, которые почти все ходовое время имеют постоянную или с незначительными колебаниями скорость (в пределах от «полного» до «среднего»). При этом использование валогенераторов или утильтурбогенераторов дает возможность сократить время работы автономных источников электроэнергии (дизель-генераторов или турбогенераторов) и уменьшить эксплуатационные расходы. Возможно также уменьшение количества автономных источников и сокращение строительной стоимости СЭЭС, особенно при применении валогенераторов. Использование утильтурбогенераторов и соответствующих им утилизационных паровых котлов связано с увеличением строительной стоимости и может быть оправдано только в случае их окупаемости (в течение нескольких лет) за счет снижения эксплуатационных расходов.

Основным недостатком систем отбора мощности является зависимость их работы от скорости судна. При применении валогенераторов изменение скорости судна, т. е. изменение частоты вращения гребного вала, непосредственно связано с изменением частоты вращения генератора, в результате чего выходные параметры валогенераторов — напряжение и частота тока — уменьшаются от номинальных значений при ходе со скоростью «Полный» до нуля при постановке главных машин на «Стоп».

Это, во-первых, затрудняет или делает почти невозможной параллельную работу валогенераторов с автономными генераторами и, во-вторых, требует обеспечения быстрого включения резервного источника электроэнергии при постановке машин на «Стоп».

Стабилизация выходных параметров валогенераторов и улучшение условий их параллельной работы могут быть достигнуты применением специальных преобразователей электроэнергии или устройств, обеспечивающих постоянную частоту вращения генераторов, несмотря на переменную частоту вращения гребного вала.

Утилизационные турбогенераторы благодаря тепловой инерции системы, а также возможности регулирования расхода пара имеют более стабильные выходные параметры и могут обеспечивать удовлетворительную параллельную работу с автономными генераторами. При постановке машины на «Стоп» они продолжают функционировать в течение 5—20 мин.

В настоящее время СЭЭС с валогенераторами широко применяются на тех судах, где не предъявляется особо жестких требований к изменению выходных параметров. В число таких судов входят речные суда и некоторые морские транспортные и промысловые суда, которые используют для движения винты регулируемого шага.

Применение валогенераторов целесообразно на судах с гребными электрическими установками. Утилизационные турбогенераторы и валогенераторы широко используются на судах постройки иностранных фирм [35].

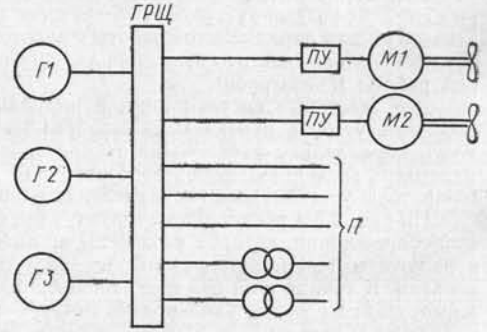



Рис. 2.2.3. Электрическая структурная схема единой СЭЭС.

*ПУ* — преобразовательное (пусковое) устройство; *М1*, *М2* — гребные электродвигатели.

## § 2.2.4. ЕДИНЫЕ СЭЭС

Единой называется СЭЭС, которая представляет собой совокупность источников электроэнергии, электрораспределительных щитов, а также гребных электродвигателей с системой их пуска и управления (рис. 2.2.3). Единая СЭЭС применяется на самоход-

ных плавучих кранах, землечерпательных снарядах и других судах технического флота, где значение мощности, необходимой при работе технологического оборудования в период стоянки судна, соизмеримо с мощностью, необходимой для движения (хода) судна. Возможно также применение единых СЭЭС на некоторых ледоколах, промысловых и других судах, где удается совместить требования, предъявляемые к гребным электрическим установкам и автономным СЭЭС. Наиболее благоприятным это оказывается в случаях использования крыльчатых движителей или винтов регулируемого шага.

## § 2.2.5. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СЭЭС

Структурные схемы электростанций судовых ЭЭС должны предусматривать:

1) параллельную работу всех генераторов, установленных на электростанции;
2) раздельную работу отдельных генераторов (или групп генераторов), каждый (каждая) из которых подключается к отдельной секции сборных шин;
3) защиту генераторов и линий электропередачи от ненормальных режимов работы;
4) прием питания (одной из электростанций) с берега или от других судов;
5) систему управления при переходе от одного режима работы электростанции к другому;
6) выполнение периодических осмотров и ремонтов ГРЩ электростанции при снятом напряжении;
7) возможность изготовления ГРЩ по секциям;
8) минимальные габариты и массу ГРЩ.

Электростанции эксплуатируемых судов имеют весьма разнотипные структурные схемы. Среди них можно найти схемы, допускающие и не допускающие параллельную работу генераторов, схемы с одной и несколькими независимыми системами сборных шин, допускающие переключение генераторов или потребителей, и др.

При проектировании судовых электростанций в настоящее время, как правило, предусматривается параллельная работа генераторов на одну систему сборных шин, которая с помощью коммутационных аппаратов или съемных шинных накладок делится на несколько секций, для того чтобы обеспечить в некоторых случаях раздельную работу генераторов (например, на случай ремонта ГРЩ, невозможности параллельной работы с валогенератором, ухудшения качества работы регуляторов частоты вращения для других систем автоматизации параллельной работы генераторов).

Две отдельные системы шин, в нормальной работе не соединенные между собой, могут быть признаны целесообразными в том случае, когда общая мощность параллельно работающих генераторов ограничивается предельными для аппаратов значениями токов короткого замыкания в системе и вместе с тем все генераторы устанавливаются в пределах одной электростанции.

На рис. 2.2.4 представлена структурная схема электростанции с одной системой сборных шин, которые разделены на пять секций. К секциям шин *Ш1* и *Ш2* подключены генераторы и наиболее ответственные потребители электрической энергии. К секции шин *Ш3* подключены в основном потребители стояночного режима, сюда же может быть подано питание с берега. К секциям шин *Ш4* и *Ш5* подключены потребители камбуза, освещение и другие потребители на напряжение 220 В. С помощью выключателей имеется возможность разделить ГРЩ на секции и осуществить осмотр аппаратуры тех или иных генераторов и соответствующих потребителей электроэнергии.

Наличие выключателя *В1* дает возможность осуществлять параллельную работу генераторов попарно или всех четырех вместе. С помощью выключателя *В2* можно произвести поочередный осмотр секций *Ш4* и *Ш5*. С помощью переключателя секция *Ш3* (со стояночными потребителями) может получить питание от любых двух генераторов, подключенных к секции *Ш1* или *Ш2*. При приеме питания с берега на секцию *Ш3* поочередно могут быть осмотрены секции *Ш1* и *Ш2*.

При наличии трех генераторов на электростанции обычно для каждого из них выделяется отдельная секция шин с разбивкой потребителей на три или только на две крайние секции шин.

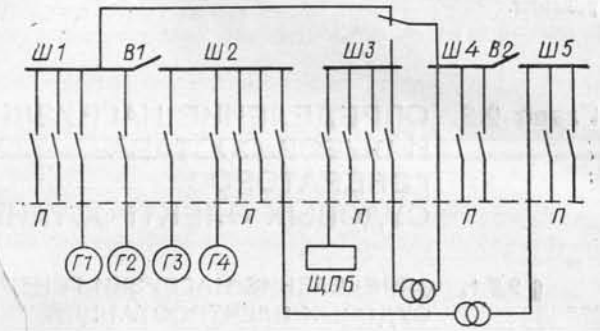



Рис. 2.2.4. Электрическая структурная схема электростанции с одной системой сборных шин.
*Ш1—Ш5* — секции шин; *ЩПБ* — щит питания с берега.

Валогенераторы и утилизационные турбогенераторы, как правило, выделяются на собственные секции шин.

Турбогенераторы и дизель-генераторы также принято разделять по отдельным секциям шин.

В качестве секционных аппаратов применяются как разъединители, так и автоматические выключатели. Последние при коротких замыканиях в соответствии с требованием избирательности действия защиты отделяют неповрежденные секции шин от поврежденных.

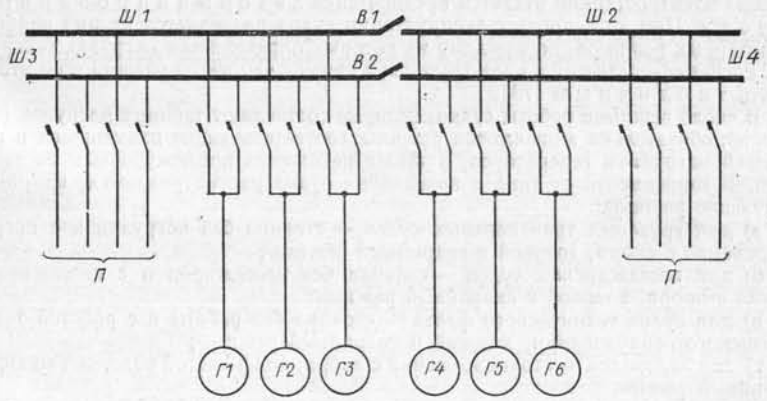



Рис. 2.2.5. Электрическая структурная схема электростанции с двумя системами сборных шин.

Защита генераторов и всех линий электропитания, отходящих от ГРЩ, осуществляется автоматическими выключателями.

На рис. 2.2.5 представлена структурная схема электростанции с двумя системами сборных шин. При этом каждая система шин может быть с помощью выключателей *В1* и *В2* разделена на две секции. Потребители электроэнергии равномерно распределены между двумя системами шин. Подобная схема обладает высокой маневренностью в работе и ремонтопригодностью. Недостатком ее

является двойной комплект автоматических выключателей для каждого генератора, что связано с увеличением габаритов ГРЩ электростанции. Однако при большой мощности генераторов и невозможности разместить на судне несколько электростанций данная схема заслуживает внимания.

Рассмотренные примеры структурных схем электростанций не исчерпывают многообразия их в практике, но могут служить некоторой основой при проектировании.

# Глава 2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ И ВЫБОР СОСТАВА ГЕНЕРАТОРОВ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

## § 2.3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ ГЕНЕРАТОРОВ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Значение нагрузки генераторов судовой электростанции в любой момент времени определяется количеством и мощностью работающих при этом потребителей электрической энергии, что в свою очередь зависит от режимов и особенностей эксплуатации судна в различных условиях (район плавания, состояние моря и погоды, вид и масса груза, скорость судна, характер работы при стоянках и т. п.). Отсюда ясно, что характер изменения нагрузки генераторов судовых электростанций относится к категории случайных процессов, описание которых производится с использованием теории вероятностей. Однако в инженерной практике до настоящего времени при расчете нагрузки генераторов судовых электростанций отдается предпочтение *детерминированному методу*. При этом процесс эксплуатации судна разделяется на ряд наиболее характерных режимов, по каждому из которых определяется нагрузка генераторов. Расчет оформляется в виде таблицы, в связи с чем метод расчета принято называть *табличным* [73].

В число режимов работы судна, которые составляют таблицу нагрузок генераторов, обязательно включаются режимы, соответствующие наименьшей и наибольшей нагрузкам генераторов, а также некоторым промежуточным ее значениям. В зависимости от типа и назначения судна рассматриваются, например, следующие режимы:

а) для грузовых транспортных судов — стоянка без погрузки и с погрузкой, съемка с якоря, ходовой и аварийный режимы;

б) для пассажирских судов — стоянка без пассажиров и с пассажирами, съемка с якоря, ходовой и аварийный режимы;

в) для судов технического флота — стоянка без работы и с работой технологического оборудования, ходовой и аварийный режимы;

г) для ледоколов — стоянка, съемка с якоря, ход в чистой воде, ход во льдах, аварийный режим;

д) для промысловых судов — стоянка, съемка, аварийный режим, а также режимы, связанные с ловом рыбы и ее переработкой.

*Аварийным* считается режим, когда во время хода судна или выполнения им других ответственных операций возникает необходимость бороться с пожаром и затоплением каких-либо отсеков (при работоспособном состоянии электростанции).

Определение нагрузок генераторов судовой электростанции табличным методом заключается в следующем:

1) составляют табличную форму (табл. 2.3.1);

2) на основании расчетов, связанных с выбором отдельных судовых приемников электроэнергии, заполняют графы 1—5 таблицы;



3) на основании исходных данных по графам 2, 3, 4 заполняют графы 6, 7;

4) выбирают значения коэффициентов одновременной работы одноименных приемников и их коэффициенты загрузки в различных режимах работы и заполняют графы 8, 9, 13, 14, 18, 19;

5) определяют значения коэффициента мощности приемников в зависимости от их загрузки, а также активной и реактивной потребляемой мощности и заполняют графы 10, 11, 12, 15, 16, 17, 20, 21, 22;

6) находят суммарную потребляемую мощность по графам 11, 12, 16, 17, 21, 22;

7) находят суммарную потребляемую мощность по графам 11, 12, 16, 17, 21, 22 без учета эпизодически работающих потребителей;

8) выбирают коэффициенты, характеризующие вероятность совместной работы приемников в различных режимах и определяют расчетную потребляемую мощность (с учетом потери активной мощности в сети примерно 3%);

9) находят средневзвешенный коэффициент мощности нагрузки в каждом режиме работы.

Потребляемую единичную мощность приемника вычисляют по формуле

$$P_{\text{потр. ед}} = \frac{P_{\text{уст}}}{\eta},$$

где $P_{\text{уст}}$ — установленная единичная мощность; $\eta$ — номинальное значение КПД.

Мощность, потребляемую группой приемников, находят по формуле

$$P_{\text{потр. общ}} = P_{\text{потр. ед}} n_{\text{уст}},$$

где $n_{\text{уст}}$ — количество одноименных приемников.

Коэффициент одновременной работы одноименных приемников определяется отношением

$$k_{\text{одн}} = \frac{n_{\text{раб}}}{n_{\text{уст}}},$$

где $n_{\text{раб}}$ — количество работающих в данном режиме одноименных приемников; $n_{\text{уст}}$ — количество установленных на судне одноименных приемников.

Коэффициент загрузки приемников определяется отношением

$$k_{\text{загр}} = \frac{P_{\text{факт}}}{P_{\text{ном}}},$$

где $P_{\text{факт}}$ — фактическая мощность приемника; $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность приемника.

Активную и реактивную потребляемые мощности группы приемников в режимах находят по формулам

$$P = P_{\text{потр. общ}} k_{\text{одн}} k_{\text{загр}};$$
$$Q = P \operatorname{tg} \varphi_{\text{реж}},$$

где $\operatorname{tg} \varphi_{\text{реж}}$ определяется по коэффициенту мощности приемника в данном режиме работы.

Расчетную нагрузку и средневзвешенный коэффициент мощности по режимам работы определяют в соответствии с формулами

$$P_{\text{расч}} = 1{,}03 \sum P k_{\text{в. с. р}};$$
$$Q_{\text{расч}} = \sum Q k_{\text{в. с. р}};$$
$$S_{\text{расч}} = \sqrt{P_{\text{расч}}^2 + Q_{\text{расч}}^2};$$
$$\cos \varphi_{\text{ср. взв}} = \frac{P_{\text{расч}}}{S_{\text{расч}}},$$

где $\Sigma P$ и $\Sigma Q$ — суммарная соответственно активная и реактивная мощность без учета эпизодической нагрузки в данном режиме работы; $k_{\text{в. с. р}}$ — коэффициент,

**Нагрузки генераторов**

| Приемники электрической энергии | Количество приемников | Единичная установленная мощность приемников, кВт | КПД, % | Коэффициент мощности | Потребляемая мощность, кВт | | Стоянка | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | единичная | общая | Коэффициент одновременной работы | Коэффициент загрузки | Коэффициент мощности |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | | | | | | | | | |
| Суммарная потребляемая мощность | | | | | | | | | |
| То же без учета эпизодической нагрузки | | | | | | | | | |
| Расчетная нагрузка (активная, реактивная и полная мощность) | | | | | | | | | |
| Средневзвешенный коэффициент мощности | | | | | | | | | |

*Таблица 2.3.1*

**судовой электростанции**

| Потребляемая мощность | | Ходовой режим | | | | | Аварийный режим | | | | | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Потребляемая мощность | | | | | Потребляемая мощность | | |
| активная, кВт | реактивная, квар | Коэффициент одновременной работы | Коэффициент загрузки | Коэффициент мощности | активная, кВт | реактивная, квар | Коэффициент одновременной работы | Коэффициент загрузки | Коэффициент мощности | активная, кВт | реактивная, квар | |
| 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

учитывающий вероятность совместной работы приемников, работающих в данном режиме.

При заполнении граф 8—22 таблицы нагрузок генераторов по каждому режиму работы судна необходимо произвести разделение приемников электрической энергии, указанных в графе 1, на три группы: 1) постоянно (в том числе периодически) работающие; 2) эпизодически (кратковременно) работающие и 3) неработающие приемники. При этом принимаются во внимание наиболее тяжелые условия эксплуатации по работе приемников и нагрузке генераторов (темное время суток, холодное или жаркое время года, наиболее трудный рейс по состоянию моря, наибольшее количество перерабатываемого груза и другие предельные условия эксплуатации судна).

Значения коэффициентов загрузки и одновременной работы приемников определяются на основании анализа эксплуатации проектируемого судна и работы его механизмов, устройств и систем.

Значение коэффициента $k_{в.с.р}$ принимается для стоянки без грузовых операций в пределах 0,7—0,75; для стоянки с грузовыми операциями и съемки с якоря 0,75—0,8; для ходового режима 0,8—0,9; для аварийного режима 0,9—1,0. Наибольшие значения коэффициента обычно соответствуют режимам, в которых работает наименьшее количество приемников электроэнергии, или режимам, которые характеризуются особой стабильностью работы приемников. Значения данного коэффициента уточняются на основании материалов испытаний головных судов и судов-прототипов.

Изложенный метод определения нагрузок генераторов судовых электростанций весьма прост, нагляден и универсален, т. е. применим к судам любого типа и назначения при любом количестве и характере приемников электроэнергии. Основным его недостатком является эмпирический выбор ряда расчетных коэффициентов. Однако при учете определенной статистики и экспертных оценок точность составления таблицы нагрузок оказывается вполне приемлемой для практики.

## § 2.3.2. ВЫБОР СОСТАВА ГЕНЕРАТОРОВ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Выбор состава генераторов судовых электростанций необходимо производить с учетом теории системотехники, исследующей взаимосвязи «больших систем». При этом судовую электростанцию (или СЭЭС) следует рассматривать в качестве подсистемы, входящей в систему силовой (энергетической) установки или в систему судна в целом. Оценка принимаемых решений должна производиться по минимуму критерия «стоимость-эффективность» на уровне старшей системы. Исходя из этого на пароходах, где силовой установкой является комплекс котел—паровая турбина, в качестве основных и резервных источников электроэнергии судовой электростанции применяются турбогенераторы и дизель-генераторы. На теплоходах, где силовой установкой является комплекс с двигателем внутреннего сгорания, в качестве основных и резервных источников электроэнергии используются дизель-генераторы. Валогенераторы и утильтурбогенераторы применяются в качестве основных ходовых источников электроэнергии, а при наличии дизель-генераторов — как резервные источники (см. § 2.2.3).

В качестве аварийных и стояночных источников электроэнергии применяют в основном дизель-генераторы. На относительно небольших судах для этих целей используют аккумуляторные батареи.

В настоящее время изготовляются судовые дизель-генераторы мощностью от 25 до 2500 кВт при частоте вращения 1500, 1000, 750 и 500 об/мин (с генераторами серий МСК, МСС, ГСС, ГМС), а также судовые турбогенераторы мощностью от 400 до 3000 кВт при частоте вращения турбин в пределах 6000—10 000 об/мин (с генераторами серии МСК).

При равной мощности агрегаты с большей частотой вращения имеют меньшие массу и габариты.

Технический ресурс турбогенераторов составляет не менее 30 тыс. ч, тихоходных дизель-генераторов — 10—15 тыс. ч, быстроходных дизель-генераторов — 4—6 тыс. ч.

Итоговые значения нагрузки электростанции в различных режимах работы служат основанием для выбора количества и мощности генераторов, устанавливаемых на судовой электростанции. По режиму максимальной нагрузки определяют общую установленную мощность генераторов судовой электростанции. В зависимости от нагрузки по остальным режимам производят деление этой мощности по отдельным агрегатам. При этом намечают несколько конкурирующих вариантов состава генераторов электростанции. Затем производят их анализ (сравнение) по технико-экономическим показателям и осуществляют выбор оптимального варианта, пользуясь эвристическими и другими методами принятия решений.

Согласно требованиям Регистра Союза ССР на случай выхода из строя любого из основных генераторов должен предусматриваться резервный генератор. При этом мощность электростанции должна быть достаточной для обеспечения в ходовом и аварийных режимах работы потребителей ответственного назначения. К последним относятся потребители, обеспечивающие безопасность плавания, сохранность груза и безопасность находящихся на судне людей.

При компоновке электростанции, состоящей из дизель-генераторов, наиболее целесообразным оказывается вариант равной мощности генераторов (как основных, так и резервных). При использовании турбогенераторов (в качестве ходовых) и дизель-генераторов (в качестве резерва) мощность первых обычно превышает мощность вторых. При использовании валогенераторов и дизель-генераторов мощность последних, как правило, меньше или равна мощности валогенераторов.

Загрузка выбранных генераторов при работе в длительных режимах (ходовой, стоянка) должна составлять 70—90% номинальной. При работе в кратковременных режимах (съемка с якоря, аварийный) загрузка дизель-генераторов может быть уменьшена до 50—60%, турбогенераторов — до 40—50%, валогенераторов — до любого уровня.

Количество генераторов судовой электростанции в большинстве случаев принимается равным от двух до четырех. При этом два или три генератора эксплуатируются под нагрузкой в длительной параллельной работе, а один находится в резерве. Для промысловых и других судов, которые длительное время эксплуатируются без заходов в порты и становятся на заводской ремонт с интервалом не менее четырех лет, должна быть предусмотрена возможность поочередного проведения профилактических работ генераторов в ходовых режимах.

Общая мощность длительно параллельно работающих генераторов электростанции должна быть не более 3000 кВт (при напряжении 400 В) по условию предельной коммутационной способности автоматических выключателей.

По требованиям берегового энергонадзора нефтеналивные и аналогичные им суда запрещается подключать к питанию от берегового источника электроэнергии с заземленной нейтралью. Кроме того, стоимость береговой электроэнергии в ряде портов превышает стоимость собственной (судовой) электроэнергии. Поэтому режим стоянки многих судов должен обеспечиваться работой любого из дизель-генераторов судовой электростанции с весьма высокой загрузкой. Это в ряде случаев может быть связано с разукрупнением дизель-генераторов электростанции. Установка так называемого стояночного дизель-генератора меньшей мощности по сравнению с другими генераторами в большинстве случаев оказывается нецелесообразной. Мощность любого генератора должна быть достаточной для пуска наиболее мощных электродвигателей (пожарного насоса, компрессора и др.).



Для всех рассматриваемых вариантов состава электростанции (генераторов и ГРЩ) обязательно выполняются проработки по размещению их на судне. Ограничения, которые возникают при этом, нередко оказываются решающими в выборе количества и типов дизель-генераторов, турбогенераторов или валогенераторов при заданной общей мощности электростанции.

Как правило, суда эксплуатируются в течение 20—30 лет. За это время неизбежна установка на них новых (более мощных), а также дополнительных приемников электрической энергии. В связи с этим при выборе состава генераторов судовой электростанции значение общей установленной ее мощности необходимо принимать на 15—20% больше полученной расчетом.

Сравнение вариантов электростанции по экономическим показателям производится на основании значений приведенных затрат, сроков окупаемости и себестоимости киловатт-часа электроэнергии.

Значение приведенных затрат определяется по формуле

$$З = Э + 0{,}15К,$$

где Э — годовые эксплуатационные расходы; К — капитальные вложения.

Лучшим является вариант, соответствующий наименьшим приведенным затратам.

Срок окупаемости вычисляется по формуле

$$t_{ок} = \frac{К_2 - К_1}{Э_1 - Э_2},$$

где $К_1$, $Э_1$ — капитальные вложения и эксплуатационные расходы по первому варианту; $К_2$, $Э_2$ — то же по второму варианту.

Второму варианту отдается предпочтение в том случае, если срок окупаемости меньше 8 лет.

В сумму капитальных вложений (строительную стоимость) обычно включаются прейскурантная цена оборудования электростанции, транспортные затраты и расходы на монтаж. В сумму эксплуатационных расходов входят затраты на амортизацию, ремонт, топливо, смазочные материалы и обслуживание электростанции.

Затраты на амортизацию и ремонт находят по формуле

$$Э_{а.\,р} = \frac{(К + С_р)\,t_1}{t_2},$$

где К — капитальные вложения; $С_р$ — стоимость всех видов ремонтов за весь период эксплуатации; $t_1$ — количество часов работы оборудования в году; $t_2$ — ресурс оборудования (количество часов работы до вывода из эксплуатации).

Затраты на топливо и смазочные материалы определяются по формуле

$$Э_{т.\,см} = (m_т Ц_т К_т + m_{см} Ц_{см})\, N К_{ном} t \cdot 10^{-6},$$

где $m_т$ — норма расхода топлива при номинальной мощности приводного двигателя генератора, г/(л. с. ч); $m_{см}$ — норма расхода смазочных материалов; $Ц_т$ — цена топлива, руб./т; $Ц_{см}$ — цена смазочных материалов, руб./т; $N$ — номинальная мощность двигателя, л. с.; $К_т$ — коэффициент, учитывающий изменение нормы расхода топлива в зависимости от нагрузки двигателя; $К_{ном}$ — коэффициент использования номинальной мощности двигателя; $t$ — количество часов работы двигателя в году.

Выбор оптимального варианта состава электростанции должен быть подтвержден расчетом рентабельности эксплуатации судна.

Мощность аварийных источников электроэнергии определяется на основании перечня аварийных приемников, который содержится в Правилах Регистра СССР.

Выбор количества и мощности генераторов единой электроэнергетической системы производится в зависимости от режимов работы и нагрузки гребных электродвигателей и общесудовых приемников и в конечном итоге определяется эксплуатационными и экономическими показателями судна.

# Глава 2.4. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СУДОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Режим параллельной работы генераторов переменного и постоянного тока используется в судовых электростанциях главным образом потому, что потребность судна в электроэнергии в значительной степени меняется в зависимости от режима работы судна: стоянки, съемки с якоря, хода в узкостях, длительного перехода, погрузочно-разгрузочных работ и т. п. В каждом из этих режимов количество параллельно работающих генераторов устанавливается таким, чтобы нагрузка каждого из них составляла 70—90% номинальной. При изменении суммарной нагрузки на шинах ГРЩ меняется и количество параллельно работающих генераторов.

Применение режима параллельной работы дает следующие преимущества:

1) обеспечивается работа каждого агрегата при наивысших значениях коэффициента полезного действия;

2) не допускается работа дизель-генераторов при нагрузках менее 30% номинальной, что сохраняет моторесурс двигателей;

3) обеспечивается большая надежность электроэнергетической установки судна, так как при дроблении установленной мощности между несколькими генераторами уменьшается вероятность отказа всей системы электроснабжения в целом;

4) обеспечивается возможность последовательного ремонта или профилактики части генераторных агрегатов с сохранением электроснабжения судна исправными агрегатами.

## § 2.4.1. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В режиме параллельной работы синхронных машин оси их роторов вращаются с одинаковой угловой скоростью. Угол между осями роторов (рис. 2.4.1) в установившемся режиме параллельной работы неизменен. Величина этого угла зависит от величины неравномерности распределения активной нагрузки машин и составляет обычно около $0 \pm 5$ эл. град при одинаковой нагрузке и 20—30 эл. град при неравномерности распределения нагрузки около 100%.

При параллельной работе синхронной машины с сетью в установившемся режиме ротор вращается синхронно с полем статора. Если ось ротора опережает поле статора, машина работает в генераторном режиме, отдавая энергию в сеть. При отставании ротора от поля синхронная машина переходит в двигательный режим, потребляя энергию из сети. Угол между осью ротора и вектором напряжения статора (у г о л в ы б е г а) меняет при этом знак на обратный. Наиболее распространенное обозначение этого угла $\delta$.



Увеличение угла выбега при параллельной работе с сетью приводит к увеличению тока статора, электромагнитного момента и активной мощности. В генераторном режиме с увеличением угла выбега электромагнитный момент на валу является тормозным. Чем больше ротор забегает вперед по отношению к полю статора, тем больше машина тормозится. При равновесии моментов, создаваемых на валу первичным двигателем и генератором, угол $\delta$ принимает единственное значение, определяемое мощностью машины. Зависимость этой мощности $P$ от угла $\delta$ называется у г л о в о й х а р а к т е р и с т и к о й с и н х р о н н о й м а ш и н ы. Угловая характеристика при постоянном возбуждении близка по виду к синусоиде (рис. 2.4.2). Это значит, что с увеличением угла $\delta$ электромагнитный момент растет небеспредельно. При некотором значении угла момент достигает максимального физически возможного значения.

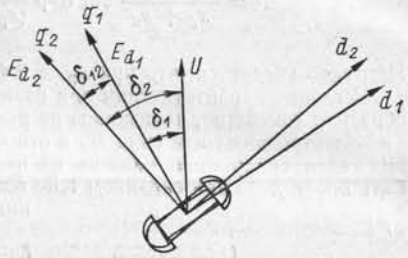



Рис. 2.4.1. Векторная диаграмма напряжений и ЭДС синхронных машин. $U$ — напряжение на шинах; $E_{d_1}$, $E_{d_2}$ — ЭДС; $\delta_1$, $\delta_2$ — углы выбега машин; $\delta_{12}$ — угол между осями роторов; $d_1$, $d_2$ — продольные оси роторов; $q_1$, $q_2$ — поперечные оси роторов.

Область угловой характеристики, в которой электромагнитный момент уменьшается с ростом угла, соответствует неустойчивой параллельной работе синхронной машины с сетью. При работе в этой области электромагнитный момент не препятствует забеганию ротора машины по отношению к полю статора, что приводит к «проворачиванию» машины относительно сети, т. е. к несинхронной работе.

П о т е р я с т а т и ч е с к о й у с т о й ч и в о с т и, таким образом, происходит в результате того, что внешние силы, действующие на ротор машины и заставляющие его забегать вперед по отношению к полю статора, не уравновешиваются электромагнитной силой, возникающей в синхронной машине с ростом угла между поперечной осью ротора и вектором напряжения сети.

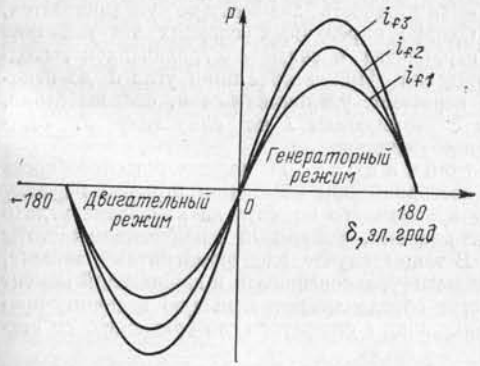



Рис. 2.4.2. Угловая характеристика синхронной машины при постоянном возбуждении.

Аналитическая зависимость активной мощности, передаваемая в сеть в установившемся режиме, для явнополюсной машины выражается формулой

$$P = \frac{U_c E_d}{x_d} \sin\delta + \frac{U_c^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\delta, \qquad (2.4.1)$$

где $P$ — активная мощность, передаваемая в сеть; $U_c$ — напряжение сети; $E_d$ — электродвижущая сила генератора; $x_d$ — синхронная реактивность статора по продольной оси; $\delta$ — угол между осью ротора и вектором напряжения сети; $x_q$ — синхронная реактивность статора по поперечной оси.

Переменные даются обычно в относительных единицах.

При неявнополюсной машине $x_d = x_q$. Поэтому

$$P = \frac{U_c E_d}{x_d} \sin\delta, \qquad (2.4.2)$$

При соединении машины с сетью через индуктивное сопротивление $x_р$ формула (2.4.1) будет иметь вид [1]:

$$P = \frac{U_с E_d}{x_р + x_d} \sin\delta + \frac{x_d - x_q}{(x_р + x_d)(x_р + x_q)} \frac{U_с^2}{2} \sin 2\delta. \qquad (2.4.3)$$

Нетрудно убедиться, что при $x_р = 0$ формулы (2.4.1) и (2.4.3) совпадают.

Угловые характеристики при разных значениях тока возбуждения ($i_{f1} - i_{f3}$) образуют семейство, показанное на рис. 2.4.2.

Электродвижущая сила $E_d$ в относительных единицах равна току возбуждения, если синхронная машина не насыщена. В области насыщения $E_d$ может быть определена при заданном токе возбуждения только по кривой намагничивания машины.

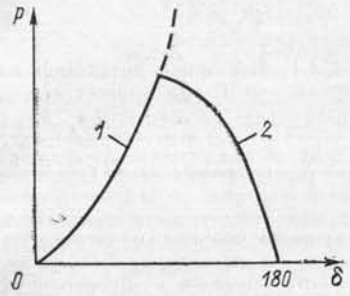



Рис. 2.4.3. Угловая характеристика синхронной машины, работающей параллельно с сетью при автоматическом регулировании возбуждения по закону φ=const.

В реальных судовых электроэнергетических системах ток возбуждения $i_f$ машин с ростом отдаваемой мощности увеличивается благодаря автоматическим регуляторам возбуждения. В связи с этим при росте угла δ для построения угловой характеристики необходимо последовательно переходить с одной характеристики семейства кривых на рис. 2.4.2 на другую. Результирующая кривая угловой характеристики будет представлять собой тангенсоиду *1*, изображенную на рис. 2.4.3:

$$P = \frac{1}{x_q} \operatorname{tg}\delta. \qquad (2.4.4)$$

В соответствии с этим предельная передаваемая мощность значительно увеличивается. Однако в реальных условиях эта величина ограничена в связи с ограничением выходного напряжения регулятора возбуждения. При возрастании угла δ до некоторого значения ток возбуждения перестает увеличиваться и, следовательно, угловая характеристика переходит с тангенсоиды *1* на синусоиду *2*, соответствующую максимальному току возбуждения.

Под динамической устойчивостью понимается способность машины оставаться в синхронном состоянии при изменении момента на валу толчком. Очевидно, что при толчке вращающего момента на изменение угла δ будет оказывать влияние и момент инерции, связанный с изменением частоты вращения генераторного агрегата. В таком случае электромагнитный момент, возникающий при росте угла δ, должен уравновешивать и вращающий момент и момент инерции. Эти обстоятельства обусловливают меньшую величину предела динамической устойчивости синхронного генератора по сравнению со статической.

В двигательном режиме синхронной машины угловая характеристика почти симметрична характеристике в генераторном режиме.

Угловая характеристика синхронной машины при параллельной работе с сетью через реактивное сопротивление $x_р$ может быть выражена посредством угла между векторами напряжений сети и генератора [1]:

$$P = \frac{U_с U}{x_р} \sin\beta, \qquad (2.4.5)$$

где $P$ — активная мощность, передаваемая в сеть; $U_с$ — напряжение сети; $U$ — напряжение генератора; β — угол между векторами напряжений сети и генератора.



При $U_с = U = 1$ о. е. предельная мощность, передаваемая в сеть, ограничена значением

$$P = \frac{1}{x_р} \sin\beta.$$

При нагрузке на шинах генератора (рис. 2.4.4) его активная мощность складывается из трех составляющих:

$$P = g_{нг} U^2 + \frac{1}{x_р} U_с U \sin\beta + g_р (U^2 - U_с U \cos\beta), \qquad (2.4.6)$$

где $g_{нг}$ — активная проводимость нагрузки на шинах; $g_р$ — активная проводимость реактора.

Первая составляющая мощности затрачивается в нагрузке, вторая передается в сеть, третья представляет собой потери в реакторе.

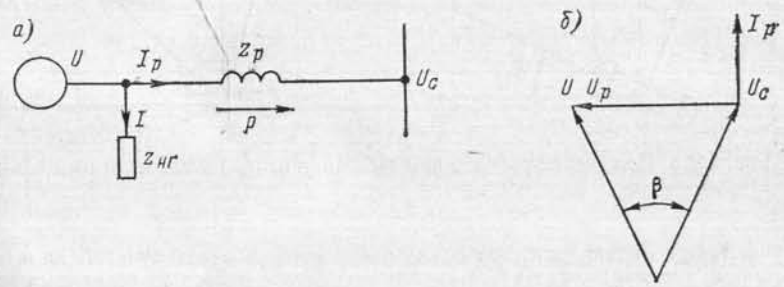



Рис. 2.4.4. Схема (*а*) и векторная диаграмма напряжений (*б*) при параллельной работе генератора с сетью через сопротивление.
$U_с$ — напряжение сети; $U$ — напряжение генератора; $U_р$ — напряжение на сопротивлении реактора; $z_р$ — сопротивление реактора; $z_{нг}$ — сопротивление нагрузки.

**Пример расчета.** Пусть генератор отдает активную мощность в нагрузку с проводимостью $g_{нг} = 0{,}5$ и в сеть через реактор с индуктивным сопротивлением $x_р = 0{,}8$ и активной проводимостью $g_р = 0{,}01$.

Рассчитаем мощность генератора при угле между векторами напряжения и сети, равном $\beta = 30°$ (для $U_с = U = 1$):

$$P = 0{,}5 + \frac{1}{0{,}8} \cdot 0{,}5 + 0{,}01\,(1 - 0{,}87) = 0{,}5 + 0{,}625 + 0{,}001\,3 = 1{,}126\,3 \text{ о. е.}$$

Это составляет 112,6% номинальной мощности генератора, из которых 62,5% передается в сеть и 0,13% расходуется в реакторе.

Предельная мощность, которую можно передать в сеть через реактор с $x_р = 0{,}8$ о. е., равна

$$P_{max} = \frac{1}{x_р} \sin\beta = \frac{1}{x_р} \sin 90° = 1{,}25 \text{ о. е.}$$

Угловая характеристика при параллельной работе двух генераторов соизмеримой мощности близка по виду к синусоиде, если возбуждение неизменно. Предельная по статической устойчивости активная мощность, передаваемая от машины к машине, в данном случае определяется амплитудой синусоиды. При автоматическом регулировании возбуждения максимальное значение ординаты угловой характеристики значительно увеличивается. Конкретное значение его зависит от насыщения систем возбуждения.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

*Распределение активной нагрузки на холостом ходу.* Рассмотрим состояние системы, в которой к шинам главного распределительного щита не подключен ни один потребитель, на обмотки возбуждения от независимых источников поданы напряжения холостого хода, а впуск энергоносителей первичных двигателей генераторов соответствует только потерям их на вращение. В данном

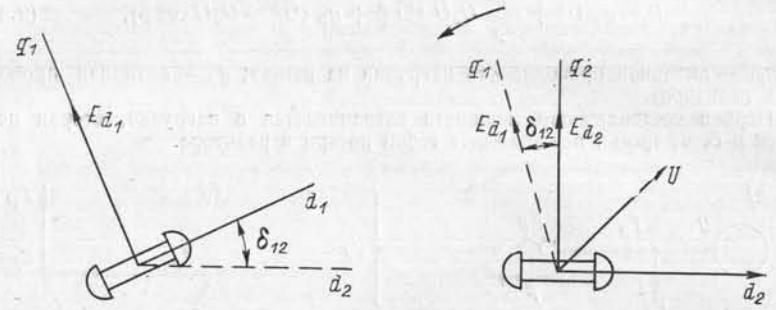



Рис. 2.4.5. Положение роторов при забегании первой машины относительно второй.

случае токи генераторов и угол между осями роторов равны нулю. Если в таком состоянии увеличить уставку по частоте регулятора одного из первичных двигателей, например первого, то его ротор начнет вращаться быстрее, вектор его ЭДС по продольной оси $E_{d_1}$ начнет перемещаться в пространстве относительно вектора $E_{d_2}$. В результате образуется угол между осями роторов (рис. 2.4.5) в контуре, составленном из реактивных сопротивлений машин *M1*, *M2* и сопротивления линии связи (рис. 2.4.6), появится разностное напряжение и связанный с ним ток обмотки статора.

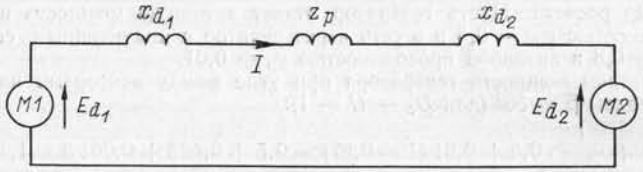



Рис. 2.4.6. Эквивалентная схема параллельной работы синхронных машин.

На валу первого генераторного агрегата возникнет тормозящий генераторный электромагнитный момент, а на валу второго — ускоряющий, двигательный. В результате установится равновесие моментов. Однако в обмотках статоров будет идти ток и между осями роторов появится определенный угол. Синхронная машина второго агрегата будет работать в двигательном режиме, покрывая часть потерь холостого хода своего агрегата.

При дальнейшем изменении уставки регулятора первого агрегата в сторону увеличения частоты вращения потери холостого хода второго агрегата могут быть полностью компенсированы первой машиной, работающей генератором. В этом случае регулятор скорости второго агрегата полностью закроет впуск энергоносителя (топлива, пара). Дальнейшее повышение уставки практически не



будет менять мощности машины. Будет происходить только повышение частоты вращения и частоты на шинах распределительного щита.

Устойчивая параллельная работа агрегатов обычно обеспечивается благодаря статическим регуляторам скорости. В таком случае забегание вперед одного из агрегатов приводит к уменьшению подачи энергоносителя и наоборот, что и обеспечивает устойчивое распределение активной нагрузки. Статические скоростные характеристики агрегатов показаны на рис. 2.4.7.

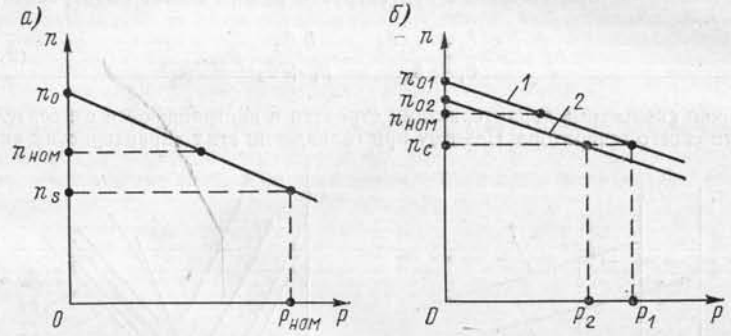



Рис. 2.4.7. Статические скоростные характеристики генераторных агрегатов: *а* — при автономной работе; *б* — при параллельной работе.

$n_0$ — частота вращения при холостом ходе; $n_{ном}$ — номинальная частота вращения; $n_s$ — частота вращения при номинальной нагрузке; $n_c$ — синхронная частота вращения параллельно работающих агрегатов; $P_1$ — активная нагрузка первого генератора; $P_2$ — активная нагрузка второго генератора; $P_{ном}$ — номинальная активная нагрузка; *1* — характеристика первого агрегата; *2* — характеристика второго агрегата.

При анализе параллельной работы агрегатов обычно используют следующие понятия:

$s_{01} = \dfrac{n_1 - n_{ном}}{n_{ном}}$ — скольжение первого генератора относительно номинальной частоты вращения;

$s_{02} = \dfrac{n_2 - n_{ном}}{n_{ном}}$ — скольжение второго генератора относительно номинальной частоты вращения;

$s = \dfrac{n_s - n_{ном}}{n_{ном}}$ — скольжение параллельно работающих генераторов относительно номинальной частоты вращения;

$\delta = \dfrac{n_0 - n_s}{P_{ном}}$ — статизм скоростной характеристики агрегата.

Относительное расположение статических скоростных характеристик параллельно работающих агрегатов в случае, когда первый агрегат покрывает полностью потери второго, показано на рис. 2.4.8. Излом характеристики *2* вверх начинается в точке, соответствующей абсциссе, равной мощности потерь холостого хода $-P_{x.x2}$ слева от нуля, что говорит о работе машины в режиме двигателя. Характеристика *1* относится к машине, работающей в режиме генератора.

*Распределение активной нагрузки при нагрузке.* Когда к шинам распределительного щита подключается активная нагрузка, параллельно работающие агрегаты принимают ее в соответствии с взаимным расположением скоростных характеристик. Если эти характеристики совпадают друг с другом, то активная нагрузка распределяется поровну. Если же характеристики не совпадают, то

возникает неравномерное распределение, величина которого может быть рассчитана по формуле

$$\Delta P = \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_1 + \delta_2} P_{\text{нг}} + 2\,\frac{s_{01} - s_{02}}{\delta_1 + \delta_2}, \qquad (2.4.7)$$

где $\delta_1$, $\delta_2$ — статизм скоростных характеристик агрегатов; $P_{\text{нг}}$ — мощность суммарной активной нагрузки на шинах; $s_{01}$, $s_{02}$ — скольжения относительно номинальной частоты, определяемой уставкой регулятора скорости.

Изменение частоты на шинах при загрузке машин может быть рассчитано по формуле

$$\Delta f = \frac{s_{02}\delta_1 + s_{01}\delta_2}{\delta_1 + \delta_2} - \frac{\delta_1\delta_2}{\delta_1 + \delta_2} P_{\text{нг}}. \qquad (2.4.8)$$

Обычно скоростные характеристики строятся и настраиваются относительно мощности своего генератора. Поэтому при совпадении этих характеристик актив-

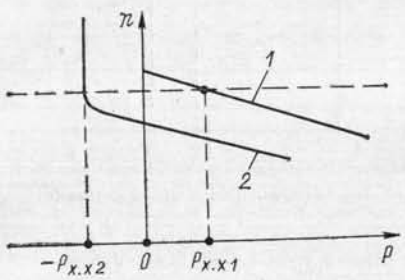



Рис. 2.4.8. Положение скоростных характеристик синхронных машин, работающих параллельно, без нагрузки на шинах.

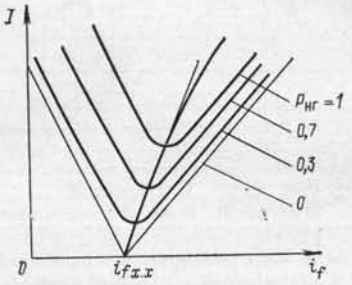



Рис. 2.4.9. V-образные характеристики синхронной машины.

ные мощности распределяются не только равномерно, но и пропорционально мощностям параллельно работающих машин.

**Пример расчета.** Исходные данные: нагрузка на шинах $P_{\text{нг}} = 1$ о.е; статизм $\delta_1 = 0{,}02$; $\delta_2 = 0{,}03$; скольжения относительно номинала $s_{01} = 0{,}01$; $s_{02} = 0{,}005$.

Неравномерность распределения активной нагрузки

$$\Delta P = \frac{0{,}03 - 0{,}02}{0{,}05} + 2\,\frac{0{,}01 - 0{,}005}{0{,}005} = 0{,}4\ (40\%).$$

Изменение частоты на шинах

$$\Delta f = \frac{0{,}005 \cdot 0{,}02 + 0{,}01 \cdot 0{,}03}{0{,}05} - \frac{0{,}02 \cdot 0{,}03}{0{,}05} = 0{,}004\ (0{,}4\%).$$

Таким образом, разность нагрузки составляет 40%, а скольжение машин относительно синхронной скорости — 0,4%.

Для того чтобы принудительно вручную распределить активные нагрузки между параллельно работающими генераторами и в то же время оставить частоту неизменной, необходимо увеличивать уставку регулятора скорости одного агрегата и уменьшать уставку другого.

При рассмотрении вопросов распределения активной нагрузки имелось в виду, что напряжение на шинах поддерживалось равным номинальному.

*Распределение реактивной нагрузки при параллельной работе с сетью.* Если первичный двигатель синхронной машины создает только мощность, необходимую для покрытия потерь холостого хода, а независимое возбуждение машины таково, что создает ЭДС статора, равную номинальному напряжению, то агрегат



не отдает в сеть ни активную, ни реактивную мощность. Ток статора и угол равны нулю. Если при таком исходном состоянии увеличить ток возбуждения машины, то она перейдет в генераторный режим, отдавая в сеть реактивную мощность. При этом величина тока статора (в относительных единицах) приближенно определяется формулой

$$I = \frac{i_f - U_{\text{с}}}{x_d}, \qquad (2.4.9)$$

где $i_f$ — ток возбуждения; $U_{\text{с}}$ — напряжение сети; $x_d$ — реактивность статора.

При уменьшении тока возбуждения генератор будет потреблять из сети реактивную мощность для возбуждения через статор. Уменьшение тока возбуждения до нуля приводит к увеличению тока статора до тока установившегося короткого замыкания, равного $U_{\text{с}}/x_d$.

Если же задавать различные значения активной мощности генератора, отдаваемой в сеть, и менять в бо́льшую или меньшую сторону ток возбуждения при постоянстве заданного значения активной мощности, то получим семейство так называемых V-образных характеристик (рис. 2.4.9). При этом геометрическое место точек вершин каждой из этих кривых будет представлять собой регулировочную характеристику синхронной машины при $\cos\varphi = 1$.

*Распределение реактивной нагрузки при параллельной работе двух генераторов одинаковой мощности.* Параллельно работающие синхронные генераторы отдают нагрузке одинаковые значения реактивной мощности, если их ЭДС одинаковы. Увеличение возбуждения одной из машин приводит к увеличению ее доли реактивной нагрузки и уменьшению соответственно доли второй машины. Если увеличивать ток возбуждения первой машины и уменьшать ток возбуждения второй, то первая машина будет не только покрывать весь реактивный ток нагрузки, но и питать реактивным током вторую машину.

В нормальном режиме параллельной работы токи возбуждения (их относительные величины) генераторов должны быть одинаковыми. Если этого равенства нет, то реактивные нагрузки распределяются неравномерно. Величина неравномерности примерно равна относительной разности токов возбуждения.

Устойчивое распределение реактивной нагрузки при параллельной работе соизмеримых по мощности генераторов обеспечивается обычно с помощью уравнительных связей между корректорами напряжения. Эти связи создаются с помощью датчиков реактивного тока, схем измерения разности выходных сигналов датчиков и подачи разности на корректоры. Для устойчивого распределения реактивной нагрузки используется и создание статизма каждого из параллельно работающих генераторов по реактивному току. Расчет неравномерности распределения нагрузки ведется по следующим формулам:

для активной нагрузки

$$\Delta P = \frac{P_{i\ \text{факт}}}{P_{i\ \text{ном}}} - \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{i\ \text{факт}}}{\sum_{i=1}^{n} P_{i\ \text{ном}}}, \qquad (2.4.10)$$

где $\Delta P$ — неравномерность распределения активной нагрузки; $P_{i\ \text{факт}}$ — значение мощности данного генератора в момент измерения; $P_{i\ \text{ном}}$ — номинальная активная мощность данного генератора; $\sum_{i=1}^{n} P_{i\ \text{ном}}$ — сумма номинальных мощностей генераторов; $n$ — количество параллельно работающих генераторов;

для реактивной нагрузки

$$\Delta Q = \frac{Q_{i\ \text{факт}}}{Q_{i\ \text{ном}}} - \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_{i\ \text{факт}}}{\sum_{i=1}^{n} Q_{i\ \text{ном}}}, \qquad (2.4.11)$$

где $\Delta Q$ — неравномерность распределения реактивной нагрузки; $Q_{i\ факт}$ — значение мощности данного генератора в момент измерения; $Q_{i\ ном}$ — номинальная реактивная мощность.

*Пример расчета.* Определить неравномерность распределения активной нагрузки для оценки допустимой величины по нормам Регистра.

Исходные данные: номинальные мощности генераторов $P_{1ном} = 100$ кВт, $P_{2ном} = 200$ кВт; фактические нагрузки в данный момент: $P_{1факт} = 70$ кВт, $P_{2факт} = 170$ кВт; $P_{i\ ном} = 300$ кВт, $\Sigma P_{i\ факт} = 240$ кВт;

$$\Delta P = \frac{70}{100} - \frac{240}{300} = 0{,}7 - 0{,}8 = -0{,}1\ (10\%).$$

*Перевод нагрузки.* В общем случае параллельно работающие генераторы отдают активную и реактивную мощности нагрузке на шинах. Перераспределить эти потоки мощности можно, воздействуя на уставки регуляторов скорости и возбуждения генераторных агрегатов. Например, повышая уставку по частоте вращения двигателя первого агрегата и уменьшая уставку второго, можно всю активную мощность, необходимую нагрузке, отбирать от первой машины. В пределе первый агрегат будет не только отдавать всю активную мощность нагрузке, но и покрывать потери холостого хода второго агрегата.

Такое же перераспределение реактивной нагрузки можно произвести, воздействуя на уставки регуляторов возбуждения. В пределе можно, например, увеличивая уставку второго агрегата, перевести всю реактивную нагрузку на вторую машину.

При выключении агрегата из параллельной работы лучше не переводить с него активную нагрузку, а сразу же выключать генераторный автомат. Иначе условия отключения ухудшатся, поскольку при одинаковых напряжениях возбуждения снятие активной нагрузки приведет к снижению $\cos\varphi$ отключаемого генератора до нуля, а ток статора при этом практически останется неизменным. Известно, что отключение тока при низком $\cos\varphi$ происходит с более мощной дугой, чем при высоком.

## КОЛЕБАНИЯ МОЩНОСТИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

Причинами колебаний мощности параллельно работающих машин могут быть:

1) периодическое изменение вращающего момента первичного двигателя одного или всех параллельно работающих агрегатов. Такое изменение момента происходит из-за неравномерности вращения дизельных двигателей. Оно приводит к периодическому перераспределению активной нагрузки. Однако такого рода колебания мощности обычно невелики и составляют доли процента (в крайнем случае — единицы процентов). Более существенную роль играет явление колебаний количества впрыска топлива, происходящее в результате процессов в форсуночной системе дизеля. По этой причине колебания мощности иногда достигают 30% номинальной и более;

2) автоколебания в системе регулирования частоты вращения. Эти колебания связаны с наличием люфтов в механических связях регуляторов скорости и могут достигать 15—30% номинальной;

3) автоколебания в системе регулирования возбуждения. Данные колебания связаны с неустойчивостью системы в малом, вызванной чрезмерной величиной коэффициента усиления и гистерезисом корректора, и ограничены главным образом нелинейностями корректора напряжения. Они могут достигать 50% номинальной и более.

Кроме того, при включении на параллельную работу агрегатов с регуляторами, имеющими астатические по виду внешние характеристики, без уравнительных связей может произойти потеря устойчивости. В результате апериодического перетекания мощности некоторые агрегаты оказываются перегруженными, а некоторые — недогруженными. Однако синхронная работа машин может здесь сохраниться, если не сработают автоматы защиты. Это особенно характерно для дизель-генераторных электростанций. Поскольку по Правилам Регистра СССР механические упоры устанавливаются на рейке дизелей с отметкой 110% нагрузки, агрегат не может принять большую активную нагрузку. Нарушение статической устойчивости и «развал» параллельной работы произойдет здесь в том случае, если один и тот же агрегат примет на себя большую активную нагрузку и снимет реактивную.



## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ ПОСЛЕ СИНХРОНИЗАЦИИ

После синхронизации генераторных агрегатов в установившемся режиме активная нагрузка распределяется между ними в зависимости не только от статизма скоростных характеристик параллельно включенных машин, но и от начальных условий их работы перед синхронизацией, от начальной разности частот и загрузки. Рассмотрим несколько конкретных случаев.

1. Если два агрегата имеют одинаковый статизм скоростных характеристик, оба работают перед синхронизацией на холостом ходу и начальное скольжение их равно нулю, то после синхронизации они будут продолжать работать синхронно (и без нагрузки) с той же частотой, что и до включения на параллельную работу.

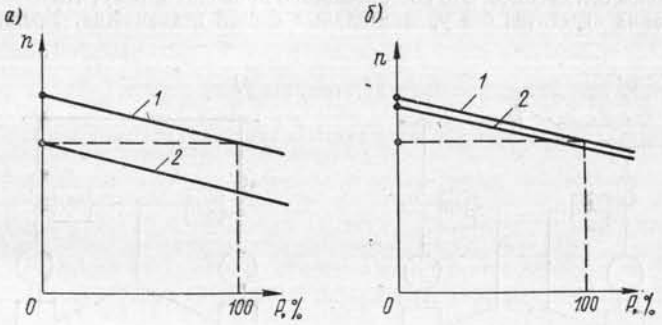



Рис. 2.4.10. Графики распределения нагрузки после включения генераторных агрегатов на параллельную работу при разных начальных условиях.

2. Если до синхронизации первый агрегат (характеристика *1*) работал с полной активной нагрузкой, а второй (характеристика *2*) подключился к нему на холостом ходу с нулевым скольжением (рис. 2.4.10, *а*), то в установившемся режиме активная нагрузка второго агрегата будет равна нулю, а первого останется равной 100%.

3. Если в предыдущем случае частота вращения второго агрегата превышает частоту вращения первого на величину статизма его скоростной характеристики, то после синхронизации активная нагрузка разделится между агрегатами поровну, а частота (при равной мощности агрегатов) возрастет на величину, численно равную половине статизма скоростных характеристик (рис. 2.4.10, *б*).

4. Если два агрегата, работающие вхолостую, синхронизировались при начальном скольжении, близком к статизму скоростных характеристик, то агрегат, имевший до включения меньшую частоту, перейдет в двигательный режим. Частота на шинах будет соответствовать точке пересечения скоростных характеристик.

В общем случае активные нагрузки агрегатов и частота на шинах после синхронизации рассчитываются по формулам

$$P_1 = \frac{s_{01} - s_{02}}{\delta_1 + \delta_2} + \frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2} P_{\text{ном}}, \qquad (2.4.12)$$

$$P_2 = \frac{s_{02} - s_{01}}{\delta_1 + \delta_2} + \frac{\delta_1}{\delta_1 + \delta_2} P_{\text{ном}}, \qquad (2.4.13)$$

$$s = \frac{\delta_2 s_{01} + \delta_1 s_{02}}{\delta_1 + \delta_2} - \frac{\delta_1 \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} P_{\text{ном}}. \qquad (2.4.14)$$

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ АГРЕГАТОВ С КОМБИНИРОВАННЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Генераторные агрегаты с комбинированными регуляторами частоты вращения обычно настраиваются так, что их скоростные характеристики параллельны оси абсцисс. Это обстоятельство приводит к тому, что параллельная работа таких агрегатов без уравнительных связей невозможна. Уравнительные

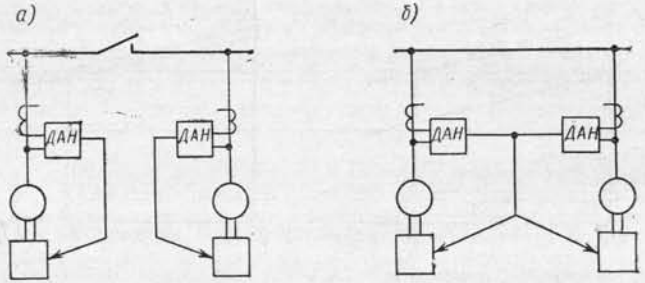



Рис. 2.4.11. Структурные схемы формирования сигналов по активной нагрузке при автономной (*а*) и параллельной (*б*) работе агрегатов с комбинированными регуляторами скорости.

связи выполняются обычно так, что на электромагниты комбинированных регуляторов всех параллельно работающих агрегатов подается один и тот же сигнал по нагрузке. Для этого при замыкании генераторного автомата в момент синхронизации производится переключение датчиков нагрузки. При автономной работе датчик нагрузки каждого агрегата подает сигнал на электромагнит регулятора скорости своего первичного двигателя (рис. 2.4.11, *а*). При параллельной работе на все электромагниты подается один и тот же сигнал, пропорциональный соответствующей доле суммарной нагрузки всех агрегатов (рис. 2.4.11, *б*). Однако показанная на рисунке схема соединения датчиков активной нагрузки (ДАН) обеспечивает только устойчивость распределения активной нагрузки и не обеспечивает его равномерности. Величина неравномерности распределения зависит от начального скольжения машин и от статизмов регуляторов скорости, соответствующих включению сигнала по нагрузке. Соотношения здесь такие же,



как и при обычных статических регуляторах. Изменить распределение нагрузки в рассматриваемом случае можно, как и в обычных системах, изменением уставки регулятора по отклонению с помощью серводвигателя.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ АГРЕГАТОВ СО СТАТИЧЕСКИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ И АГРЕГАТОВ С КОМБИНИРОВАННЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

При подключении агрегата со статическим регулятором скорости к агрегату с комбинированным регулятором, работающему с меньшей частотой, подключаемая синхронная машина переходит в двигательный режим. Работаю-

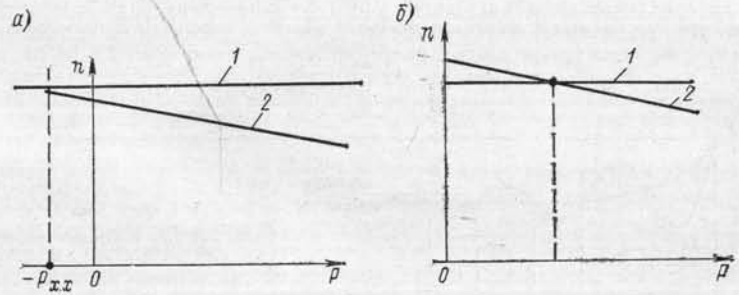



Рис. 2.4.12. Графики распределения активной нагрузки при параллельной работе агрегатов с разными типами регуляторов скорости.
*1* — скоростная характеристика агрегата с комбинированным регулятором;
*2* — то же для статического регулятора.

щая же машина наряду с нагрузкой на шинах покрывает и потери подключенного агрегата. Частота на шинах не меняется (2.4.12, *а*).

Если подключается агрегат со статическим регулятором скорости с большей частотой, то он принимает активную нагрузку в соответствии со статизмом своего регулятора (рис. 2.4.12, *б*).

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОЙ НАГРУЗКИ В ПЕРЕХОДНОМ ПРОЦЕССЕ

Если в установившихся режимах параллельной работы распределение активной нагрузки зависит только от уставок автоматических регуляторов скорости и напряжения и соотношения синхронных реактивностей генераторов, то в переходном режиме положение иное. В таких режимах, как включение и выключение нагрузки, короткое замыкание, синхронизация, значительную роль начинают играть факторы, обусловленные невозможностью мгновенного изменения механической энергии вращающихся масс генераторных агрегатов и электромагнитной энергии обмоток синхронных машин.

Изменение механической энергии связано со статизмом систем автоматического регулирования частоты вращения агрегатов. Например, при включении полной активной нагрузки частота вращения генераторного агрегата должна измениться на 3% соответственно его статической скоростной характеристике. Следовательно, за время переходного процесса должна на 3% измениться кинетическая энергия, запасенная агрегатом к моменту включения нагрузки. Ток возбуждения синхронного генератора также должен значительно измениться из-за реакции статора. Обычно реактивности машин таковы, что ток возбуждения увеличивается

в 2—3 раза, а результирующее потокосцепление — на 20—30%. Вместе с током меняется и связанная с ним электромагнитная энергия.

На распределение активной нагрузки в переходном процессе наибольшее влияние оказывает механическая инерционность агрегатов.

Рассмотрим, в соответствии с вышеизложенным, как распределяется активная нагрузка между двумя агрегатами с разными величинами постоянных инерции. При включении нагрузки на шины параллельно работающих генераторов на их валах возникают электромагнитные моменты, под действием которых агрегаты начинают тормозиться. В первые доли секунды вращающие моменты первичных двигателей агрегатов еще не достигают значений, соответствующих новой нагрузке. Поэтому условно можно считать, что они остались в начальном состоянии. В таком случае изменение (уменьшение) угловых скоростей агрегатов происходит по законам $\omega_1 = \frac{1}{J_1}\int M_{э1}\,dt$ и $\omega_2 = \frac{1}{J_2}\int M_{э2}\,dt$, где $\omega_1$ и $\omega_2$ — угловые скорости генераторных агрегатов; $J_1$ и $J_2$ — моменты инерции агрегатов. Очевидно, что при разных значениях моментов инерции уменьшение угловых скоростей $\omega_1$ и $\omega_2$ будет происходить с разной интенсивностью (рис. 2.4.13, *а*). Но это

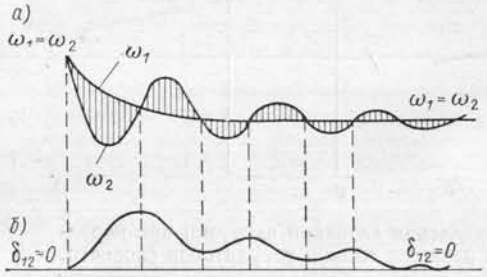



Рис. 2.4.13. Кривые изменения угловой скорости и угла между осями роторов параллельно работающих генераторов с разными инерционными постоянными при включении нагрузки.

значит, что одна машина будет забегать вперед по отношению к другой и, следовательно, начнет расти угол $\delta_{12}$ между осями роторов машин, как показано на рис. 2.4.13, *б*. Ранее указывалось, что изменение угла ведет к передаче активной мощности от одной машины к другой благодаря возникновению активного уравнительного тока. При этом машина, забегающая вперед, набирает активную мощность, а отстающая — сбрасывает ее. В результате забегающая вперед машина вместе с первоначальной нагрузкой забирает дополнительную, что приводит к возникновению разности активной нагрузки, т. е. к неравномерности распределения.

Указанная неравномерность в переходном процессе не связана с установившейся неравномерностью, которая зависит только от статизма регуляторов скорости и их уставок. Поэтому возникшая в переходном процессе разность нагрузок с течением времени может уменьшиться до нуля. Это происходит следующим образом. Как видно из рис. 2.4.13, забегает вперед та машина, угловая скорость которой уменьшается медленней. Ясно, что эта машина относится к агрегату с большей постоянной инерции, который тормозится медленней. Перераспределение нагрузки из-за изменения угла $\delta_{12}$ вызывает увеличение тормозного момента у забегающей вперед машины и уменьшение — у отстающей. Это приводит к все большему сближению угловых скоростей и, наконец, к уравниванию их. В момент уравнивания угловых скоростей прекращается рост угла $\delta_{12}$ и перераспределение нагрузок (рис. 2.4.13, *б*). По инерции изменение угловых скоростей продолжается и дальше, знак их разности меняется, угол $\delta_{12}$ и разность нагрузок начинают уменьшаться. Кроме того, начинает заметней проявляться соотношение уставок регуляторов скорости агрегатов, что приводит в результате к уменьшению неравномерности распределения активной нагрузки до нуля.

Очевидно, что чем больше разница моментов инерции агрегатов, тем больше разность нагрузок в переходном процессе. Отрицательные стороны этого явления состоят главным образом во временной перегрузке одной из машин и, кроме того,



в снижении запаса устойчивости параллельной работы. В принципе возможно такое положение, что угол между осями роторов в переходном процессе превысит предел динамической устойчивости.

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ЧАСТОТЕ И АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

*Автоматическое распределение активной нагрузки при параллельной работе.* Автоматизация распределения активной нагрузки параллельно работающих судовых генераторных агрегатов с обычными и комбинированными регуляторами скорости основана в настоящее время на измерении разности активных нагрузок и реверсивном управлении в функции этой разности серводвигателями регуляторов скорости первичных двигателей генераторов. Основной задачей устройства автоматического распределения активной нагрузки является автоматизация приема активной мощности генераторным агрегатом, включенным на параллельную работу. Кроме того, устройство уменьшает неравномерность распределения, вызванную несовпадением скоростных характеристик агрегатов, их нелинейностью или нечувствительностью регуляторов.

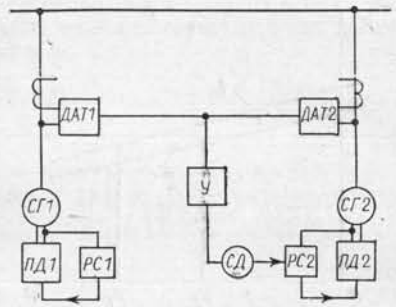



Рис. 2.4.14. Структурная схема автоматического распределения активной нагрузки.

*ПД1, ПД2* — первичные двигатели; *СГ1, СГ2* — синхронные генераторы; *РС1, РС2* — регуляторы скорости; *СД* — серводвигатель регулятора; *ДАТ1, ДАТ2* — датчики активного тока; *У* — усилитель устройства УРАН.

Структурная схема судовой электростанции с системой автоматического распределения активной нагрузки показана на рис. 2.4.14. Датчики активного тока системы установлены на каждом из параллельно работающих синхронных генераторов. Выходные характеристики датчиков прямолинейны и проходят через нуль в третий квадрант системы координатных осей, в которых эти характеристики построены. При настройке системы характеристики могут изменять наклон или смещаться параллельно.

Схема сравнения выходных сигналов датчиков обеспечивает получение на каждом из усилителей тока управления, равного

$$i_k = m\left(I_{ak} - \frac{\sum_1^n I_{ai}}{n}\right), \qquad (2.4.15)$$

где $i_k$ — ток управления $k$-го усилителя; $m$ — коэффициент пропорциональности, зависящий от внутренних сопротивлений датчиков и входных сопротивлений усилителей; $I_{ak}$ — активный ток $k$-го генератора; $n$ — количество генераторов; $\sum_1^n I_{ai}$ — сумма активной нагрузки всех генераторов.

Реверсивные усилители для управления серводвигателями регуляторов скорости имеют обычную реверсивную характеристику, проходящую через нуль. При отсутствии входного сигнала выходное напряжение усилителя равно нулю.

Работает система следующим образом [60]. Предположим, что активные нагрузки параллельно работающих генераторов не равны и нагрузка первого генератора больше нагрузки второго (рис. 2.4.15). В таком случае выходное напряжение первого датчика больше, чем второго, и в цепи, состоящей из внутренних

сопротивлений датчиков и входных цепей усилителей, пойдет ток определенного направления. На выходе усилителя *У* (см. рис. 2.4.14) при этом появится напряжение определенного знака, и серводвигатель *СД* начнет вращаться. Направление его вращения, в соответствии с полярностью напряжения усилителя, будет иметь такой знак, при котором скоростная характеристика второго агрегата будет перемещаться вверх. По мере этого перемещения второй агрегат будет принимать все бо́льшую нагрузку, а с первого агрегата нагрузка будет соответственно сниматься. Процесс сближения характеристик *1* и *2* будет продолжаться до их пересечения в одной точке, где активные нагрузки равны, или до совпадения характеристик, если они параллельны друг другу (см. рис. 2.4.15). Пока не произойдет полного уравнивания активной нагрузки, ток в цепях датчиков не будет равен нулю, на серводвигателях будет напряжение и они будут вращаться. Вращение серводвигателей прекратится только в том случае, если разность нагрузок и соответствующие ей ток управления и ток якоря двигателя станут настолько малы, что не смогут создать момента, который в состоянии преодолеть сопротивление трения на валу серводвигателя.

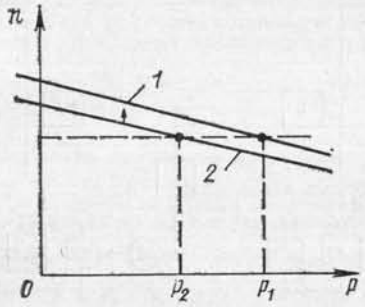


Рис. 2.4.15. Скоростные характеристики агрегатов.

Такой же процесс происходит при подключении генераторного агрегата на параллельную работу к другим работающим агрегатам. Если подключение произошло при близком к нулю скольжении, то агрегат после синхронизации будет работать с нулевой активной нагрузкой.

Набор активной нагрузки произойдет следующим образом. Под воздействием тока управления в схеме сравнения сигналов датчиков активного тока серводвигатель подключаемого агрегата будет перемещать его скоростную характеристику вверх. По мере набора активной нагрузки ток управления усилителя уменьшается до нуля и серводвигатель останавливается. В таком положении подключенный агрегат работает с активной нагрузкой, равной в относительных единицах нагрузкам других параллельно работающих агрегатов.

В подавляющем большинстве случаев используют такой принцип автоматического распределения нагрузки, при котором активная нагрузка распределяется пропорционально номинальным мощностям генераторов. При необходимости можно легко и быстро установить любой желаемый закон распределения нагрузки. Для этого достаточно изменить наклон характеристик датчиков активного тока.

Важной особенностью системы автоматического распределения активной нагрузки является выделение базового агрегата путем отключения питания усилителя одного из агрегатов. В этом случае серводвигатель данного агрегата работать не будет. Это означает, что скоростная характеристика базового агрегата останется неизменной, она не будет перемещаться под влиянием изменения разности активной нагрузки. Частота всех параллельно работающих генераторов меняется в соответствии с базовой скоростной характеристикой.

Необходимость выделения базового агрегата вызвана тем, что без этого мероприятия частота системы становится неопределенной и начинает произвольно меняться вверх или вниз от номинальной.

Схемные решения датчиков активного тока и усилителей устройства могут быть самыми разнообразными.

В реальных системах распределения на частоте 50 Гц (УРЧН и УРМ) применяется схема с трансформаторным фазочувствительным мостом, в системе частотой 400 Гц — схема с транзисторным фазочувствительным выпрямителем.

Схемные решения реверсивных усилителей имеют различный вид в зависимости от типа серводвигателя. Наиболее широкое распространение получили серводвигатели постоянного тока с параллельной обмоткой возбуждения на 24



и 110 В, постоянного тока с двумя обмотками возбуждения на 110 В и асинхронные конденсаторные.

В состав системы УРЧН входят магнитные усилители для управления всеми перечисленными типами серводвигателей. В устройстве типа УРМ применяются тиристорные усилители.

Одной из важных особенностей усилителей для управления серводвигателями является то, что они ограничивают ток якоря двигателей не более чем до 1,5 номинального. Если бы это ограничение не было предусмотрено, то при заклинивании механизма затяга пружин регуляторов скорости двигатель очень быстро сгорел бы, так как уже при небольшой разности нагрузок по его якорю шел бы пусковой ток.

*Причины неточности распределения активной нагрузки.* Основная причина неточности заключается в том, что на валу серводвигателя всегда имеется сухое горение, для преодоления которого необходим определенный вращающий момент. Практика показывает, что в зависимости от конструкции и качества сборки редуктора механизма изменения уставки момент трогания серводвигателя может составлять от 10—15 до 50—100% номинального.

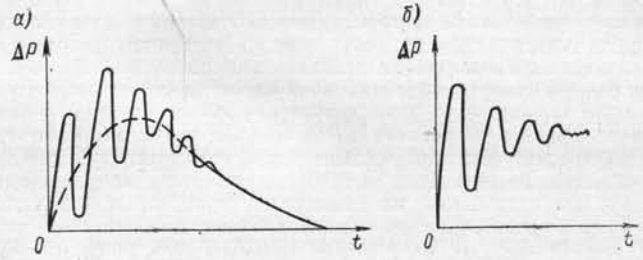


Рис. 2.4.16. Графики изменения разности активных нагрузок *P* при синхронизации генераторов: *а* — с устройством УРАН; *б* — без устройства.

Второстепенные причины ошибок — несовпадение характеристик датчиков, сбой нуля характеристик датчиков и усилителя, неточность выделения активной составляющей тока.

Устойчивость работы системы распределения активной нагрузки практически всегда обеспечивается без коррекции. При этом необходимо выполнить только одно условие — установить соответствующий параметрам агрегатов коэффициент усиления системы.

Для настройки при выключенном устройстве нужно установить вручную какую-либо начальную разность нагрузок, а затем включить устройство. При удовлетворяющих ГОСТу регуляторах скорости агрегатов такая простейшая настройка всегда приводит к положительному результату. Исключение составляют случаи, когда нарушается ГОСТ на регуляторы.

При проектировании систем с устройствами автоматического распределения активной нагрузки целесообразно учитывать следующие обстоятельства:

запас устойчивости системы повышается, если за базовый принят агрегат с с большей инерционной постоянной и если статизм регулирования скорости базового агрегата несколько меньше, чем у других агрегатов;

увеличение количества параллельно работающих агрегатов мало влияет на устойчивость системы;

изменение постоянной времени усилителя в пределах от 0 до 0,5 с мало влияет на качество системы распределения.

Устройство распределения активной нагрузки включается одновременно с генераторным автоматом (его блок-контактами). На процесс синхронизации это устройство влияет незначительно. Можно сказать, что в процессе синхронизации переменные колеблются относительно средних значений (штриховые линии), определяемых работой устройства УРАН (рис. 2.4.16).

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ГЕНЕРАТОРОВ

Для повышения точности стабилизации частоты при статических скоростных характеристиках параллельно работающих агрегатов на усилитель, управляющий серводвигателем базового агрегата, включается датчик отклонения частоты. Если по каким-либо причинам частота напряжения на шинах электростанции отклоняется от уставки, на выходе датчика частоты появляется ток, и серводвигатель базового агрегата начинает перемещать свою скоростную характеристику до тех пор, пока частота не восстановится до прежнего значения. При этом, конечно, происходит перераспределение активной нагрузки генераторов, но система распределения снова вернет ее к прежнему значению. Точность системы стабилизации частоты зависит, как и в системе распределения нагрузки, от зоны нечувствительности серводвигателя. Необходимо иметь в виду, что точность стабилизации частоты при схемах датчиков, использующих эффект зависимости реактивности $L$ или $C$ от частоты, будет меняться в зависимости от нагрузки. Это объясняется тем, что при нагрузке может существенно меняться форма кривой синхронных машин, а это, в свою очередь, влияет на уставку датчика частоты.

В системах стабилизации частоты применяются также датчики, основанные на сравнении частоты синхронного генератора с частотой кварцевого генератора. Если на усилитель серводвигателя подавать импульсы, формируемые в узлах напряжения биений измеряемой и эталонной частот, точность работы устройства становится мало зависимой от зоны нечувствительности серводвигателя.

При использовании устройства УРМ вредное влияние сухого трения на точность распределения нагрузки уменьшается. В этом устройстве датчики активного тока заимствованы из устройства УРЧН, а усилитель выполнен импульсным на тиристорах. Благодаря этому напряжение на серводвигатель подается не непрерывно, а только в дискретные моменты. Увеличивая или уменьшая промежутки времени, в течение которых напряжение подается на серводвигатель, можно регулировать среднюю частоту его вращения. Схема устройства выполнена так, что чем больше разность активной нагрузки, тем больше средняя частота вращения серводвигателя, и наоборот.

Коэффициент усиления системы автоматического распределения нагрузки при импульсном регулировании меняется путем изменения ширины импульса.

## ВКЛЮЧЕНИЕ СИНХРОННЫХ МАШИН НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ

Синхронные машины в судовых электростанциях включаются на параллельную работу при соблюдении двух следующих условий:

1) ток статора включаемой машины в первый момент и в процессе синхронизации должен быть минимальным;

2) процесс синхронизации должен быть устойчивым.

Первое условие связано с очевидным требованием не создавать при каждом включении на параллельную работу опасных для машин и особенно для первичных двигателей ударов электромагнитного момента, а также не ухудшать качества электроэнергии снижением напряжения при больших толчках тока.

Второе условие также не требует пояснений. Ясно, что если после включения синхронная работа машин не обеспечена, то нормальная работа электростанции невозможна.

Величина тока в первый момент включения пропорциональна углу между осями роторов синхронных машин и разности их напряжений до включения. При включении необходимо обеспечить минимальный угол и минимальную разность напряжений.

Для обеспечения устойчивости синхронизации необходимо ограничить начальную разность частот включаемых машин с учетом статизма скоростных характеристик агрегатов, сопротивления линии между машинами и постоянных инерции агрегатов. Формулы для расчета предельных по устойчивости начальных разностей частот даны ниже.



Существует пять способов включения машин на параллельную работу, применяемых в судостроении:

1) точная синхронизация с постоянным временем опережения;

2) точная синхронизация с постоянным углом опережения (через автомат или контактор);

3) синхронизация через реактор с ограничением угла включения;

4) грубая синхронизация (через реактор независимо от угла включения);

5) самосинхронизация (на судах используется редко).

Для любого способа синхронизации необходима подгонка частот включаемого и работающего генераторов. При точной синхронизации это обеспечивает возможность включения генератора при угле, близком к нулю.

*Принцип работы схем автоматической синхронизации. Применяемая аппаратура.* При всех способах синхронизации, кроме грубой, аппаратура выполняет две основные функции:

1) измерение угла между векторами напряжений с выдачей сигнала на включающий электромагнитный механизм автомата;

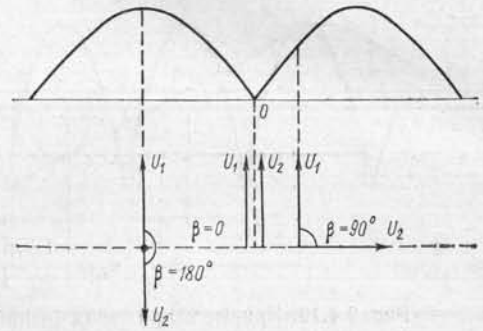



Рис. 2.4.17. График огибающей напряжения биений и относительное положение векторов напряжений, соответствующее различным точкам биений.

2) контроль скольжения и разности напряжений включаемых машин с целью запрета включения, если указанные величины превышают заданные пределы.

Измерение угла происходит обычно путем контроля напряжения биений. Кривая огибающей этого напряжения подходит к нулю в моменты, когда угол между векторами напряжений при относительном скольжении этих векторов проходит через нуль (рис. 2.4.17). Кривая на рисунке соответствует полному равенству напряжений $U_1$ и $U_2$. При неравенстве их огибающая напряжения биений не проходит через нуль (рис. 2.4.18).

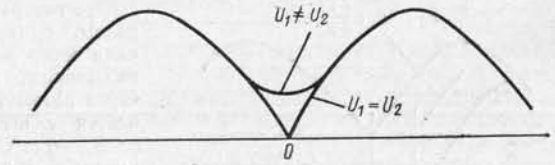



Рис. 2.4.18. Кривые огибающей напряжения биений при равных и неравных значениях напряжений генераторов.

Наиболее распространенный способ контроля угла заключается в подаче напряжения биений на вход триггера Шмидта. При определенном уровне напряжения биений триггер переключается. Переключение триггера используется для формирования сигнала на срабатывание автомата. Таким образом, сигнал на включение в указанном случае подается всегда при одном и том же напряжении биений, а следовательно, при одном и том же угле. Поэтому такой способ называется способом синхронизации с постоянным углом опережения.

Очевидно, что замыкание силовой цепи генераторов происходит не в момент срабатывания триггера в синхронизаторе, а позднее — с задержкой на время включения коммутационного аппарата. Поэтому при большом скольжении, когда период напряжения биений мал, для обеспечения срабатывания автомата в нуле биений необходимо задавать большой угол опережения. При малых же скольжениях угол срабатывания триггера почти равен углу, при котором происходит включение генераторов (рис. 2.4.19).

Принцип работы синхронизатора с постоянным временем опережения [31] отличается тем, что срабатывание триггера, включенного на напряжение биений, происходит всегда с одним и тем же упреждением по отношению к моменту прохождения напряжения биения через нуль (рис. 2.4.20). Осуществляется это благодаря тому, что указанный выше триггер Шмидта включается не на напряжение биений, а на напряжение, пропорциональное сумме $U_б + \frac{dU_б}{dt} = U'_б$. Напряже-

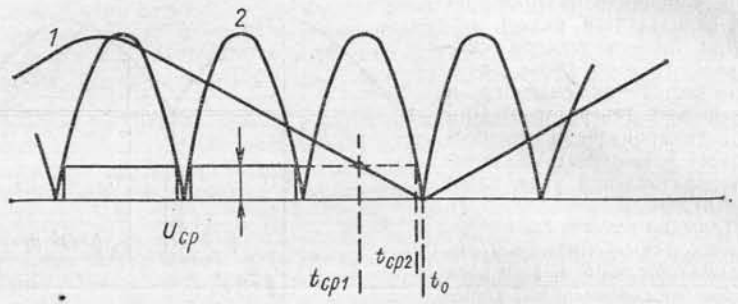



Рис. 2.4.19. Кривые напряжения биений при малом (*1*) и большом (*2*) скольжениях.

$t_0$ — момент достижения нуля биений; $t_{ср1}$, $t_{ср2}$ — момент срабатывания выходного триггера синхронизатора соответственно при малом и большом скольжениях; $U_{ср}$ — напряжение срабатывания триггера.

ние $U'_б$ проходит через нуль всегда с одинаковым упреждением по отношению к узлу напряжения $U_б$. Если время срабатывания триггера установить равным времени срабатывания автомата, то включение будет происходить точно в нуль биений.

Конечно, все сказанное справедливо при условии, что время срабатывания автомата стабильно, а кривая биений синусоидальна.

*Синхронизация через реактор.* Способ синхронизации через реактор состоит в том, что сигнал на включение генераторов подается вначале на контактор, который замыкает цепь реактора, шунтирующего генераторный автомат. Таким образом, синхронизация происходит сначала через реактор, ограничивающий ток включения, а затем уже заканчивается через автомат. При этом автомат включается с выдержкой времени примерно от 2 до 6 с. Однолинейная схема синхронизации через реактор приведена на рис. 2.4.21, *а*.

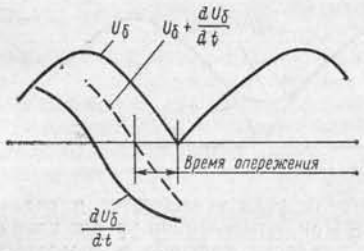



Рис. 2.4.20. Кривые напряжения биений.

Точная синхронизация через контактор (рис. 2.4.21, *б*) заключается в следующем. Точный синхронизатор с постоянным углом опережения включает быстродействующий контактор, соединенный параллельно с автоматом, а блок-контакты контактора подают сигнал на автомат. При необходимости последовательно с контактором может быть включен реактор с небольшим сопротивлением.

При способе грубой синхронизации никакого контроля угла не предусматривается. Включение происходит при любом угле.

Способ самосинхронизации осуществляется включением генератора в сеть без возбуждения. Напряжение в обмотку возбуждения подается одновременно с включением автомата или с небольшим опозданием. Естественно, что при этом способе ток включения может достигать больших значений.



*Подгонка частоты.* Подгонка частоты перед включением на параллельную работу осуществляется обычно по схеме импульсного регулирования с помощью реле, как в синхронизаторе типа УСГ-1П. Импульсы, управляющие включением реле обычной мостовой схемы реверсивного управления серводвигателем регулятора скорости включаемого агрегата, формируются схемой устройства подгонки частоты так, чтобы подгонка происходила всегда в сторону уменьшения начальной разности частот.

*Расчет устойчивости синхронизации.* В первый момент включения синхронных машин на параллельную работу при определенном угле и скольжении в обмотках машин возникают значительные токи, под воздействием которых меняются моменты на валу и напряжение на шинах. Изменение всех этих переменных происходит и в том случае, если включение машин совпадает с моментом, когда угол между векторами напряжений равен нулю. Отличие процессов при этом состоит только в отсутствии большого толчка тока в момент включения.

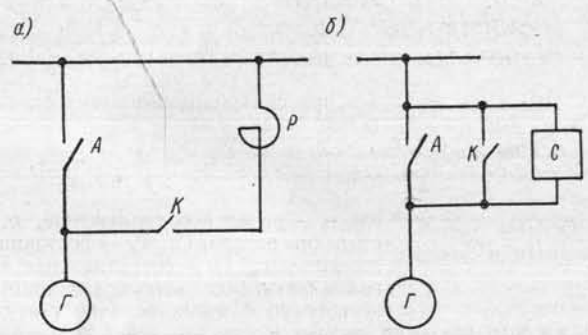



Рис. 2.4.21. Однолинейная схема грубой синхронизации через реактор (*а*) и точной синхронизации через контактор (*б*).

*Г* — генератор; *А* — автомат; *К* — контактор; *Р* — реактор; *С* — синхронизатор.

Основным фактором, вызывающим переходные процессы при синхронизации, является отличие в величинах кинетических энергий синхронизируемых генераторных агрегатов перед их включением и после установления процесса. Избыток кинетической энергии приводит к тому, что роторы агрегатов и после включения на параллельную работу, пусть даже при нулевом угле, продолжают относительное движение в ту же сторону. Возникает векторная разность ЭДС, которая прикладывается к цепи, включающей в себя переходные реактивности синхронных машин и сопротивление линии связи. Под действием разности возникают ток и связанные с ним электромагнитные моменты, тормозящие агрегаты. Скорость нарастания угла $\delta$ под действием тормозного момента уменьшается. Соответственно начинают приближаться друг к другу значения частот подключаемых машин. Когда частоты вращения уравняются, рост угла $\delta$ прекратится. Однако обычно по инерции после уравнивания частот происходит изменение знака скольжения машин, благодаря чему угол $\delta$ снова начинает уменьшаться. После нескольких колебаний процесс устанавливается. При достаточно большой разности частот и медленном уменьшении ее угол $\delta$ может выйти за предельное значение, определяемое динамической устойчивостью.

Особенно быстро растет угол $\delta$ при синхронизации генераторов частотой 400 Гц. Интенсивность роста угла при той же площади, заключенной между кривыми изменения частоты, в 8 раз больше, чем при частоте 50 Гц. Включение реактора между генераторами также увеличивает скорость нарастания угла. Это связано с уменьшением токов реакторов и соответственно меньшей интенсивностью торможения забегающей вперед машины.

На рис. 2.4.22 показана область устойчивой синхронизации, ограниченная осями координат и кривой. При всех сочетаниях начальных скольжений $s$ и

сопротивлений реактора $x_р$ в этой области синхронизация устойчива, т. е. машины после переходного процесса работают синхронно. Вне этой области синхронизация невозможна при любой длительности переходного процесса.

Синхронизация может быть неустойчивой:

1) при превышении предельно допустимой по условиям устойчивости относительной величины разности кинетических энергий агрегата до и после синхронизации;

2) при превышении предельной мощности, передаваемой машиной в сеть через сопротивление связи.

Сущность первого критерия ясна из предыдущего объяснения физики процесса синхронизации. Расчет предельно допустимого начального скольжения машин перед синхронизацией производится по следующим формулам:

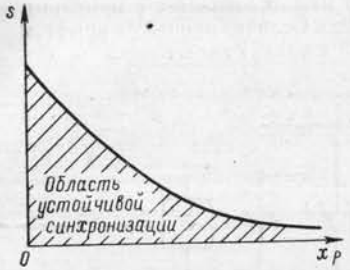



Рис. 2.4.22. Область устойчивой синхронизации через реактор.

при синхронизации с сетью бесконечной мощности

$$s_{01} = \frac{1}{\sqrt{2\pi f T_J x_р}}; \qquad (2.4.16)$$

при синхронизации двух одинаковых агрегатов

$$s_{02} = \frac{1}{\sqrt{\pi f T_J x_р}}, \qquad (2.4.17)$$

где $s_0$ — начальное скольжение, о. е.; $f$ — частота генератора, Гц; $T_J$ — постоянная инерция агрегата, с; $x_р$ — сопротивление между машиной и сетью (или второй машиной), взятое относительно базовых величин генератора.

Сущность второго критерия состоит в том, что через сопротивление связи нельзя передать мощность сверх определенного предельного значения. При передаче мощности по сопротивлению связи течет ток, создающий на нем падение напряжения. Следовательно, между векторами напряжений синхронизируемых машин образуется угол, который добавляется к углу $\delta_{12}$, как бы искусственно снижая потолок его предельного значения.

Расчет предельного скольжения по второму критерию производится по следующим формулам:

при синхронизации с сетью бесконечной мощности

$$s_{01} = \frac{1}{x_р k_\delta}; \qquad (2.4.18)$$

при синхронизации двух одинаковых агрегатов

$$s_{02} = \frac{2}{x_р k_\delta}, \qquad (2.4.19)$$

где $k_\delta$ — коэффициент усиления системы регулирования скорости агрегата, численно равный обратной величине статизма скоростной характеристики. Например, при наклоне характеристики, составляющем 2%,

$$k_\delta = \frac{1}{0{,}02} = 50.$$

**Пример расчета.** Определить предельные скольжения при синхронизации через реактор.

Исходные данные: $T_J = 3$ с; $f = 50$ Гц; $x_р = 1$ о. е.; $k_\delta = 50$.

Расчет по первому критерию:

при синхронизации с сетью

$$s_{02} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot 3{,}14 \cdot 3 \cdot 50}} = 0{,}033 \text{ о. е. } (3{,}3\%);$$



при синхронизации двух машин

$$s_{02} = \frac{1}{\sqrt{3{,}14 \cdot 3 \cdot 50}} = 0{,}046 \text{ о. е. } (4{,}6\%).$$

Расчет по второму критерию:

при синхронизации с сетью

$$s_{01} = \frac{1}{50} = 0{,}02 \text{ о. е. } (2\%);$$

при синхронизации двух одинаковых машин

$$s_{02} = \frac{2}{50} = 0{,}04 \text{ о. е. } (4\%).$$

Расчет тока статора, тока возбуждения, токов демпферных обмоток, напряжения и момента синхронной машины, работающей вхолостую при включении на параллельную работу с сетью, производится с помощью следующих выражений [27]:

$$I = \sqrt{\frac{(1 - U_c \cos\delta_0)^2}{(x_р + x''_d)^2} + \frac{(U_c \sin\delta_0)^2}{(x_р + x''_q)^2}}; \qquad (2.4.20)$$

$$I_f = 1 + \frac{1 - g_2}{1 - g_1 g_2} \mu_d x_d I_d; \qquad (2.4.21)$$

$$I_{дем} = \sqrt{I_D^2 + I_Q^2}; \qquad (2.4.22)$$

$$I_d = \frac{1 - U_c \cos\delta_0}{x_р + x''_d}; \qquad (2.4.23)$$

$$I_q = \frac{U_c}{x_р + x''_q} \sin\delta_0; \qquad (2.4.24)$$

$$I_D = \mu'_d \frac{1 - g_1}{1 - g_1 g_2} x_d I_d; \qquad (2.4.25)$$

$$I_Q = -\mu_q x_q I_q; \qquad (2.4.26)$$

$$U_q = I_f - x_d I_d + I_D; \qquad (2.4.27)$$

$$U_d = x''_q I_q; \qquad (2.4.28)$$

$$U = \sqrt{U_q^2 + U_d^2}; \quad \Delta U = 1 - U;$$

$$M_э = U_q I_q + U_d I_d,$$

где $I_d$, $I_q$ — составляющие тока статора по продольной и поперечной осям; $I_D$, $I_Q$ — составляющие тока демпферной обмотки; $I_f$ — ток возбуждения; $U_d$, $U_q$ — составляющие напряжения на зажимах статора; $\Delta U$ — провал напряжения; $M_э$ — электромагнитный момент; $x_d$, $x_q$, $x''_d$, $x''_q$ — синхронные и переходные реактивности машины; $x_р$ — сопротивление реактора.

Коэффициенты связи обмоток машин, входящие в расчетные формулы:

$$\left.\begin{aligned} \mu_d &= \frac{x_{ad}^2}{x_f x_d}; \quad \mu'_d = \frac{x_{ad}^2}{x_D x_d}; \\ g_1 &= \frac{x_{ad}}{x_f}; \quad g_2 = \frac{x_{ad}}{x_D}; \quad \mu_q = 1 - \frac{x''_q}{x_q}. \end{aligned}\right\} \qquad (2.4.29)$$

Для расчета промежуточных величин — собственных и взаимных индуктивностей — используем соотношения

$$\left.\begin{aligned} x_{ad} &= x_d - x_s;\\ x_f &= x_{ad} + x_{fs};\\ x_{fs} &= \frac{x'_d - x_s}{1 - \dfrac{x'_d - x_s}{x_{ad}}};\\ x_{Ds} &= \frac{1}{\dfrac{1}{x''_d - x_s} - \dfrac{1}{x_{fs}} - \dfrac{1}{x_{ad}}};\\ x_D &= x_{ad} + x_{Ds};\\ x_Q &= x_{aq} + x_{Qs};\\ x_{aq} &= x_q - x_s; \quad x'_d = 1 - \mu_d x_d;\\ x_{Qs} &= \frac{1}{\dfrac{1}{x''_q - x_s} - \dfrac{1}{x_{aq}}}. \end{aligned}\right\} \qquad (2.4.30)$$

Расчет токов и напряжений при синхронизации двух генераторов с холостого хода осуществляется по следующим формулам [1, 27]:

$$i_{d1} = -\frac{(1-\cos\delta)\left(x_p + x''_{q1} + x''_{q2}\right)\cos\delta - \left(x_p + x''_{q1} + x''_{d2}\right)\sin^2\delta}{\left(x_p + x''_{d1} + x''_{d2}\right)\left(x_p + x''_{q1} + x''_{q2}\right)\cos^2\delta + \left(x_p + x''_{q1} + x''_{d2}\right)\left(x_p + x''_{d1} + x''_{q2}\right)\sin^2\delta}; \qquad (2.4.31)$$

$$i_{q1} = \frac{(1-\cos\delta)\left(x_p + x''_{d1} + x''_{q2}\right)\sin\delta + \left(x_p + x''_{d1} + x''_{d2}\right)\sin\delta\cos\delta}{\left(x_p + x''_{d1} + x''_{d2}\right)\left(x_p + x''_{q1} + x''_{q2}\right)\cos^2\delta + \left(x_p + x''_{q1} + x''_{d2}\right)\left(x_p + x''_{d1} + x''_{q2}\right)\sin^2\delta}; \qquad (2.4.32)$$

$$\left.\begin{aligned} i_{q2} &= i_{q1}\cos\delta + i_{d1}\sin\delta;\\ i_{d2} &= i_{d1}\cos\delta - i_{q1}\sin\delta;\\ U_{q1} &= 1 - x''_{d1} i_{d1};\\ U_{q2} &= 1 - x''_{d2} i_{d2};\\ U_{d1} &= x''_{q1} i_{q1};\\ U_{d2} &= x''_{q2} i_{q2};\\ \Delta U_1 &= 1 - U_1;\\ \Delta U_2 &= 1 - U_2;\\ M_{э1} &= U_{q1} i_{q1} + U_{d1} i_{d1};\\ M_{э2} &= U_{q2} i_{q2} + U_{d2} i_{d2}, \end{aligned}\right\} \qquad (2.4.33)$$

где $\delta$ — начальный угол между осями роторов.



Если синхронизируются две одинаковые неявнополюсные машины, то можно принять, что $x'_{d1} = x''_{q1} = x''_{d2} = x''_{q2} = x''$. В таком случае формулы упрощаются:

$$i_{d1} = \frac{1-\cos\delta_0}{x_p + 2x''}; \qquad i_{q1} = \frac{\sin\delta_0}{x_p + 2x''}. \qquad (2.4.34)$$

**Пример расчета.** Определить токи в первый момент включения на параллельную работу.

Исходные данные: генератор типа МСС275-500. Параметры по техническим условиям: $x_s = 0{,}12$; $x_d = 1{,}3$; $x_q = 0{,}83$; $x'_d = 0{,}25$; $x''_d = 0{,}18$; $x''_q = 0{,}15$.

Дополнительные параметры рассчитываем по формулам (2.4.30):

$$x_{ad} = 1{,}3 - 0{,}12 = 1{,}18; \quad x_{fs} = 0{,}15;$$

$$x_f = 1{,}33; \quad x_{Ds} = 0{,}108; \quad x_D = 1{,}3;$$

$$x_{aq} = 0{,}71; \quad x_{Qs} = 0{,}03; \quad x_Q = 0{,}74;$$

$$g_1 = 0{,}89; \quad g_2 = 0{,}92; \quad \mu_d = 0{,}81;$$

$$\mu_q = 0{,}82; \quad \mu'_d = 0{,}84.$$

Сопротивление реактора составляет $x_p = 0{,}3$ о. е.

Угол включения принимаем $\delta_0 = 30^\circ$.

Расчет токов при включении генератора на параллельную работу с сетью:

$$I = \sqrt{\frac{(1 - 1\cdot 0{,}87)^2}{(0{,}3 + 0{,}18)^2} + \frac{(1\cdot 0{,}5)^2}{(0{,}3 + 0{,}15)^2}} = 1{,}14 \text{ о. е.};$$

$$I_f = 1 + \frac{1 - 0{,}92}{1 - 0{,}92\cdot 0{,}89} = 1{,}125;$$

$$I_D = 0{,}84\,\frac{(1 - 0{,}89)\,1{,}3}{1 - 0{,}89\cdot 0{,}92}\,0{,}27 = 0{,}18;$$

$$I_Q = -0{,}82\cdot 0{,}83\cdot 1{,}11 = -0{,}75.$$

Расчет напряжения генератора и его момента:

$$U_q = 1{,}125 - 1{,}3\cdot 0{,}27 + 0{,}18 = 0{,}95;$$

$$U_d = 0{,}15\cdot 1{,}11 = 0{,}166;$$

$$U = 0{,}96; \quad \Delta U = 1 - U = 0{,}04\ (4\%);$$

$$M_э = 0{,}95\cdot 1{,}11 + 0{,}166\cdot 0{,}27 = 1{,}09.$$

## § 2.4.2. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Общие положения.** Устойчивая параллельная работа генераторов постоянного тока с параллельным возбуждением возможна при положительном статизме внешних характеристик их первичных двигателей. Генераторы с параллельными и последовательными обмотками возбуждения работают устойчиво только при наличии уравнительного провода, показанного на рис. 2.4.23.

**Включение на параллельную работу.** Для включения генератора на параллельную работу необходимо соблюдать следующие два условия:

1) напряжение подключаемого генератора должно быть равным напряжению сети;

2) полярность напряжения якоря генератора должна быть такова, чтобы в момент включения на параллельную работу ток якоря имел величину, близкую к нулю.

Величина тока якоря машины, работавшей до включения на холостом ходу, может быть рассчитана по формуле

$$I_a = \frac{E - U}{r}, \qquad (2.4.35)$$

где $E$ — ЭДС якоря; $U$ — напряжение сети; $r$ — суммарное сопротивление якоря и соединительной цепи.

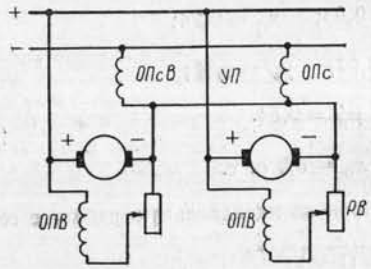



Рис. 2.4.23. Схема параллельной работы генераторов смешанного возбуждения.

*ОПсВ* — последовательная обмотка возбуждения; *ОПВ* — параллельная обмотка возбуждения; *РВ* — реостат возбуждения; *УП* — уравнительный провод.

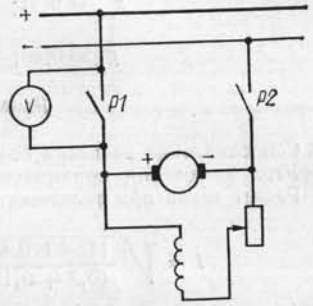



Рис. 2.4.24. Включение вольтметра для проверки правильности схемы перед включением генератора на параллельную работу с сетью.

Ошибка в установке разности ЭДС и напряжения ограничивается допустимой для генератора величиной броска тока якоря в момент включения и провалом напряжения на шинах.

Полярность напряжений определяется с помощью схемы, приведенной на рис. 2.4.24. При замыкании выключателя *Р2* вольтметр, включенный в цепь последовательно, должен показать напряжение, равное нулю, если полярности напряжений якоря и сети выбраны правильно, и равное двойному напряжению — при неправильной схеме.

**Распределение нагрузки после включения на параллельную работу.** Если разность ЭДС и напряжения перед включением была равна нулю, то подключенный генератор не будет нести нагрузки. Для набора генераторной нагрузки необходимо увеличить ток возбуждения генератора. Если ток возбуждения уменьшить, то генератор перейдет в двигательный режим.

Неравномерность распределения нагрузки параллельно работающих генераторов определяется соотношением наклонов результирующих зависимостей ЭДС генераторов от тока якоря.

Перевод нагрузки с одного генератора на другой производится увеличением возбуждения первого генератора и уменьшением возбуждения второго.



# Глава 2.5. РАСЧЕТ СУДОВОЙ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ

## § 2.5.1. РАСЧЕТ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ ПО УСЛОВИЮ НАГРЕВА КАБЕЛЯ

Важнейшими критериями правильности выбора сечения кабеля являются температура нагрева его жил в режиме, принятом для данного кабеля за расчетный, и величина потери напряжения в нем.

Различают следующие режимы работы кабеля:

д л и т е л ь н ы й — режим, при котором время непрерывного нахождения кабеля под нагрузкой превышает время достижения установившейся температуры нагрева токопроводящей жилы кабеля;

к р а т к о в р е м е н н ы й — режим, при котором к концу периода включения нагрузки температура нагрева токопроводящей жилы не успевает достигнуть установившегося значения, а в период отключения снижается до температуры окружающей среды;

п о в т о р н о - к р а т к о в р е м е н н ы й — режим, при котором кратковременные периоды включения нагрузки чередуются с кратковременными периодами отключения. При этом в период включения ($t_1$) температура нагрева токопроводящей жилы кабеля не успевает достигнуть установившегося значения, а в период отключения ($t_2$) не успевает снизиться до температуры окружающей среды. Относительная продолжительность периода включения определяется выражением

$$\text{ПВ} = \frac{t_1}{t_1 + t_2};$$

с т у п е н ч а т ы й — режим, при котором продолжительность периода включения ($t_1$) и продолжительность паузы ($t_2$) являются переменными величинами.

Приведем ряд определений и терминов, которые используются при дальнейшем изложении

Группа кабелей, имеющая общее крепление, в которой каждый кабель (кроме крайних) соприкасается с двумя соседними, составляет р я д. Прокладка группы кабелей, состоящей из двух рядов, не разделенных зазором, и имеющей общее крепление, носит название д в у х р я д н о й.

Группа соприкасающихся между собой кабелей, состоящая из трех и более рядов и имеющая общее крепление, образует п у ч о к.

Время, в течение которого превышение температуры нагрева токопроводящей жилы нагруженного кабеля достигает величины, равной 0,632 значения установившегося превышения температуры, называется п о с т о я н н о й в р е м е н и к а б е л я.

Э к в и в а л е н т н ы м т о к о м для кабелей с резиновой изоляцией считается ток, длительное прохождение которого приводит кабель к такому же износу, как и при кратковременной нагрузке заданным током, а для кабелей с пластмассовой изоляцией (из полиэтилена или полихлорвинила) — ток, длительное прохождение которого вызывает такой же нагрев кабеля, что и к концу кратковременного режима.

Превышение температуры нагрева одиночного кабеля относительно температуры окружающего воздуха определяется разностью температур нагрева токопроводящей жилы кабеля и окружающего воздуха, а пучка кабелей — разностью температур токопроводящей жилы наиболее нагретого кабеля в пучке и окружающего воздуха.

Температура окружающего воздуха характеризуется температурой, измеряемой на расстоянии не менее 1 м от кабеля или пучка кабелей на уровне трассы.

Т е п л о в ы м с о п р о т и в л е н и е м к а б е л я называется величина, определяющая разность температур токоведущей жилы кабеля и окружающей

среды (θ) при заданной мощности потерь ($P$) и измеряемая в тепловых омах: $S = \theta/P$.

Нормы электрических нагрузок обычно устанавливаются для одиночно проложенного кабеля и следующих условий:

а) температура токоведущей жилы равна длительно допустимой для данной марки кабеля;

б) температура окружающей среды +45° С;

в) род тока постоянный или переменный частотой 50 Гц;

г) режим нагрузки — длительный.

Для кабелей с резиновой изоляцией срок службы в этих условиях при непрерывной токовой нагрузке составляет не менее 2200 сут.

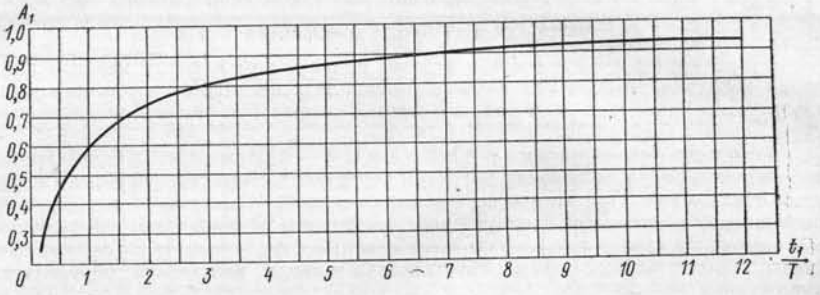



Рис. 2.5.1. Кривая для определения коэффициента $A_1$ (см. табл. 2.5.4).

С учетом сказанного допустимый ток может быть определен по формуле

$$I_{доп} = \sqrt{\frac{\theta}{mRS}}, \qquad (2.5.1)$$

где θ — допустимое превышение температуры нагрева токопроводящей жилы кабеля над температурой окружающей среды, °С; $m$ — число токопроводящих жил в кабеле; $R$ — активное электрическое сопротивление токопроводящей жилы кабеля, Ом/м; $S$ — полное тепловое сопротивление кабеля, т·Ом·м.

Приведенная формула не учитывает потерь в металлических оболочках кабелей и диэлектрических потерь в их изоляции. В этом нет необходимости, поскольку одножильные кабели в металлической оболочке для канализации переменного тока на судах, как правило, не применяются, а диэлектрические потери очень малы благодаря низкому уровню напряжения.

Если условия работы кабеля отличаются от указанных выше, то допустимое значение тока для кабеля определяется по формуле

$$I_{доп} = \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{A}\sqrt{\frac{\theta}{mRS}}, \qquad (2.5.2)$$

где $k_1$ — поправочный коэффициент (см. значения в табл. 2.5.1), учитывающий увеличение активного сопротивления токопроводящих жил двух- и трехжильных кабелей вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости; $k_2$ — поправочный коэффициент (см. значения в табл. 2.5.2), учитывающий отличие принятой рабочей температуры токопроводящей жилы кабеля от 65° С; $k_3$ — поправочный коэффициент (см. значения в табл. 2.5.3), учитывающий отличие температуры окружающей среды от 45° С; $k_4$ — поправочный коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения кабелей, заключенных в трубы или кожухи длиной более 2 м (для трубы $k_4 = 0{,}8$; для кожуха $k_4 = 0{,}85$); $A$ — поправочный коэффициент, учитывающий отличие режима нагрузки кабеля от длительного (формулы для вычисления коэффициентов $A_2 - A_5$ в зависимости от свойств изоляции кабеля приведены в табл. 2.5.4, а коэффициент $A_1$ определяется по кривой рис. 2.5.1).



**Значения поправочного коэффициента $k_1$** *Таблица 2.5.1*

| Сечение кабеля, мм² | $k_1$ | | Сечение кабеля, мм² | $k_1$ | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 50 Гц | 400 Гц | | 50 Гц | 400 Гц |
| 25 | — | 0,99 | 120 | — | 0,83 |
| 35 | — | 0,98 | 150 | — | 0,79 |
| 50 | — | 0,97 | 185 | 0,99 | 0,75 |
| 70 | — | 0,94 | 240 | 0,98 | 0,69 |
| 95 | — | 0,88 | | | |

**Значения поправочного коэффициента $k_2$** *Таблица 2.5.2*

| Температура нагрева токопроводящей жилы, °С | $k_2$ | Температура нагрева токопроводящей жилы, °С | $k_2$ |
|---|---|---|---|
| 65 | 1,000 | 90 | 1,440 |
| 70 | 1,108 | 95 | 1,506 |
| 75 | 1,200 | 100 | 1,568 |
| 80 | 1,290 | 105 | 1,625 |
| 85 | 1,369 | 110 | 1,679 |

**Значения поправочного коэффициента $k_3$** *Таблица 2.5.3*

| Допустимая температура жилы кабеля, °С | $k_3$ при температуре окружающей среды, °С | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 10 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
| 65 | 1,80 | 1,66 | 1,50 | 1,41 | 1,32 | 1,22 | 1,12 | 1,00 | 0,87 | 0,71 | 0,50 |
| 70 | 1,67 | 1,55 | 1,41 | 1,34 | 1,26 | 1,18 | 1,10 | 1,00 | 0,89 | 0,77 | 0,63 |
| 85 | 1,46 | 1,37 | 1,27 | 1,22 | 1,17 | 1,12 | 1,06 | 1,00 | 0,94 | 0,87 | 0,79 |

*Таблица 2.5.4*

**Формулы для вычисления коэффициентов $A_1$—$A_5$ при кратковременных и повторно-кратковременных режимах нагрузки**

| Режим нагрузки | Для кабелей и проводов с резиновой изоляцией | Для кабелей с полихлорвиниловой и полиэтиленовой изоляцией |
|---|---|---|
| Кратковременный | $A_1 = f\left(\frac{t_1}{T}\right)$ (см. рис. 2.5.1) | $A_2 = \sqrt{1 - e^{-\frac{t_1}{T}}}$ |
| Повторно-кратковременный | $A_3 = \sqrt{\frac{t_1}{t_1 + t_2}}$ | $A_4 = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_1}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_1 + t_2}{T}}}}$ |
| Ступенчатый | $A_5 = \sqrt{\frac{t_2}{24}}$ | $A_2 = \sqrt{1 - e^{-\frac{t_1}{T}}}$ |

Условные обозначения: $t_1$ — продолжительность периода нагрузки, мин; $t_2$ — продолжительность паузы, мин; $t_3$ — полное время нахождения кабеля под нагрузкой в течение суток, ч; $T$ — постоянная времени нагрева кабеля, определяемая по формуле (2.5.19).

Примечание. Если коэффициенты $A_4$ и $A_5$ окажутся меньше 0,5, то они принимаются равными 0,5.

Если режим нагрузки ступенчатый, то для кабеля с полихлорвиниловой или полиэтиленовой изоляцией максимальный ток режима не должен превышать длительно допустимого. Для других кабелей допустимый ток в ступенчатом режиме равен эквивалентному току:

$$I_{\text{ступ}} = I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1' + I_2^2 t_2' + \cdots + I_n^2 t_n'}{t_1' + t_2' + \cdots + t_n'}}, \qquad (2.5.3)$$

где $I_1, \ldots, I_n$ — токи ступеней; $t_1', \ldots, t_n'$ — длительность ступеней.

Для кабелей с резиновой изоляцией можно увеличивать длительно допустимую температуру жилы, а следовательно, и длительно допустимый ток, если по условиям эксплуатации срок непрерывного нахождения кабеля под током может быть принят менее 2200 сут. Допустимую температуру жилы можно выбрать по полученной экспериментально зависимости срока службы изоляции от ее температуры (рис. 2.5.2). Допустимый ток при этом определится с помощью соответствующего коэффициента, взятого из табл. 2.5.2.

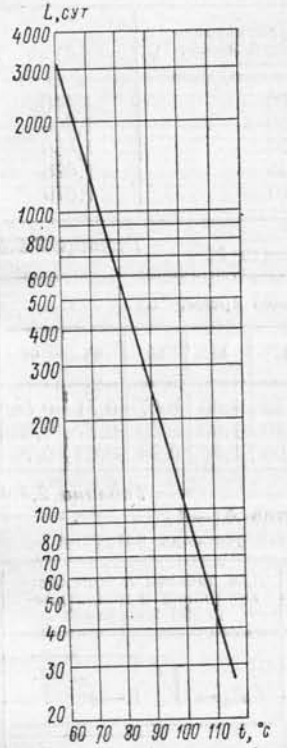



Рис. 2.5.2. Зависимость срока службы резиновой изоляции от ее температуры.

Ниже приводятся данные для расчета теплового сопротивления и постоянной времени одиночно проложенного кабеля, на основании которых можно рассчитать значение допустимого тока для всех марок кабелей, шнуров или проводов, применяемых в судовых сетях.

В проектной практике обычно используют готовые таблицы норм нагрузок, содержащиеся в специальных нормативных документах. Расчет этих норм выполнен изложенными ниже методами.

Значения коэффициентов в приводимых далее формулах могут со временем несколько изменяться в соответствии с результатами исследований в этой области.

**Расчет теплового сопротивления кабеля.** Тепловое сопротивление кабеля $S$ является суммой тепловых сопротивлений изоляции кабеля $S_{\text{из}}$, его защитной оболочки $S_{\text{об}}$ и теплового сопротивления теплоотдаче с поверхности $S_{\text{пов}}$:

$$S = S_{\text{из}} + S_{\text{об}} + S_{\text{пов}}. \qquad (2.5.4)$$

Два первых слагаемых образуют внутреннее тепловое сопротивление $S_{\text{вн}}$.

Тепловое сопротивление изоляции кабеля и его внутреннее тепловое сопротивление вычисляются по следующим формулам [47, 48]:

для одножильного кабеля

$$S_{\text{из}} = \frac{\sigma}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1}, \qquad (2.5.5)$$

где $\sigma$ — удельное тепловое сопротивление, °С·м/Вт; $d_1$ — диаметр токопроводящей жилы; $d_2$ — диаметр кабеля под оболочкой.

Если теплопроводности материалов изоляции и оболочки кабеля близки между собой, то

$$S_{\text{вн}} = \frac{a_1\sigma}{2\pi} \ln \frac{d_3}{d_1}, \qquad (2.5.6)$$



где $a_1$ — поправочный коэффициент; $d_3$ — наружный диаметр оболочки кабеля.

Приводимые ниже формулы для внутреннего сопротивления получены при этом же допущении:

для двухжильного кабеля

$$S_{\text{из}} = \frac{a_2\sigma}{4\pi} \ln \left[ \frac{r_2^2}{r_1^2} \frac{1 - \frac{a^4}{r_2^4}}{\sqrt{\frac{4a^2}{r_1^2} - 1}} \right], \qquad (2.5.7)$$

где $a_2$ — поправочный коэффициент; $r_1$ — радиус токопроводящей жилы; $r_2$ — радиус кабеля без защитной оболочки; $a$ — расстояние между центрами кабеля и токопроводящей жилы;

$$S_{\text{вн}} = \frac{a_2\sigma}{4\pi} \ln \left[ \frac{r_3^2}{r_1^2} \frac{1 - \frac{a^4}{r_3^4}}{\sqrt{\frac{4a^2}{r_1^2} - 1}} \right], \qquad (2.5.8)$$

где $r_3$ — наружный радиус оболочки кабеля;

для трехжильного кабеля

$$S_{\text{из}} = \frac{a_3\sigma}{6\pi} \ln \frac{r_2^3}{1{,}7 r_1 d^2}, \qquad (2.5.9)$$

где $a_3$ — поправочный коэффициент; $d$ — диаметр токопроводящей жилы с изоляцией;

$$S_{\text{вн}} = \frac{a_3\sigma}{6\pi} \ln \frac{r_3^3}{1{,}7 r_1 d^2}; \qquad (2.5.10)$$

для четырехжильного кабеля

$$S_{\text{из}} = \frac{a_3\sigma}{8\pi} \ln \frac{r_2^4}{3{,}34 r_1 d^3}; \qquad (2.5.11)$$

$$S_{\text{вн}} = \frac{a_3\sigma}{8\pi} \ln \frac{r_3^4}{3{,}34 r_1 d^3}; \qquad (2.5.12)$$

для пятижильного кабеля

$$S_{\text{из}} = \frac{a_3\sigma}{10\pi} \ln \frac{r_2^5}{9{,}3 r_1 d^4}; \qquad (2.5.13)$$

$$S_{\text{вн}} = \frac{a_3\sigma}{10\pi} \ln \frac{r_3^5}{9{,}3 r_1 d^4}; \qquad (2.5.14)$$

для многожильного кабеля

$$S_{\text{из}} = \frac{a_4\sigma}{4\pi} \left(1 - \frac{x^2}{r_2^2}\right), \qquad (2.5.15)$$

где $a_4$ — поправочный коэффициент; $x$ — расстояние между центрами кабеля и ближайшей к нему токопроводящей жилы; $r_2$ — радиус кабеля без защитной оболочки.

Тепловое сопротивление оболочки любого кабеля определяется по формуле

$$S_{\text{об}} = \frac{\sigma}{2\pi} \ln \frac{d_3}{d_2}, \qquad (2.5.16)$$

где $d_2$ — диаметр кабеля без оболочки; $d_3$ — наружный диаметр кабеля.

Величина $1 - \frac{x^2}{r_2^2}$ в формуле (2.5.15) зависит от числа жил и системы их скрутки. Ее значения приводятся в табл. 2.5.5.

*Таблица 2.5.5*

**Значения коэффициента $1-\frac{x^2}{r_3^2}$, входящего в формулу (2.5.15)**

| Число токопроводящих жил | Система скрутки | $1-\frac{x^2}{r_3^2}$ | Число токопроводящих жил | Система скрутки | $1-\frac{x^2}{r_3^2}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 1+6 | 1,0 | 24 | 2+8+14 | 0,972 |
| 10 | 2+8 | 0,938 | 27 | 3+9+15 | 0,965 |
| 12 | 3+9 | 0,924 | 30 | 4+10+16 | 0,951 |
| 14 | 4+10 | 0,898 | 33 | 5+11+17 | 0,935 |
| 16 | 5+11 | 0,869 | 37 | 1+6+12+18 | 1,0 |
| 19 | 1+6+12 | 1,0 | | | |

Значения удельного теплового сопротивления σ различных видов изоляции и оболочек кабелей приведены ниже:

| | σ, °С·м/Вт |
|---|---|
| Изоляционная резина типов РТИ-0, РТИ-1 или РТИ-2 на жиле одножильного кабеля | 3,0 |
| Кремнийорганическая резина на жиле одножильного кабеля | 5,2 |
| Оболочка из негорючей шланговой резины типов РШН-1, РШН-2 | 2,6 |
| Изоляционный полихлорвиниловый пластикат на жиле одножильного кабеля | 7,5 |
| Полиэтилен на жиле одножильного кабеля | 4,5 |
| Оболочка из полихлорвинилового шлангового пластиката | 5,3 |
| Прессованная магнезиальная изоляция одножильного кабеля | 3,3 |
| Слой лакированной хлопчатобумажной оплетки | 5,8 |
| Слой хлопчатобумажной оплетки, пропитанной противогнилостным (битумным) составом | 4,4 |
| Защитная оболочка из свинца (включая воздушные прослойки между свинцом и поверхностью кабеля под оболочкой) | 1,4 |
| Слой пропитанной кабельной или хлопчатобумажной пряжи | 5,0 |
| Слой оплетки из стеклянных нитей | 3,4 |

Тепловым сопротивлением металлических оболочек можно пренебрегать.

В табл. 2.5.6 приведены величины поправочных коэффициентов, используемых в формулах (2.5.6)—(2.5.15) для определения теплового сопротивления изоляции и внутреннего теплового сопротивления кабеля.

Тепловое сопротивление теплоотдаче с поверхности кабеля может быть определено по формуле

$$S_{\text{пов}} = \frac{\sigma_{\text{пов}}}{\pi d_{\text{нар}}}, \qquad (2.5.17)$$

где $\sigma_{\text{пов}}$ — удельное тепловое сопротивление поверхности оболочки кабеля, °С·м²/Вт:

$$\sigma_{\text{пов}} = a_1 + b_1 \frac{d_{\text{нар}}}{\theta}; \qquad (2.5.18)$$

$a_1$ и $b_1$ — коэффициенты, полученные экспериментально; $d_{\text{нар}}$ — наружный диаметр кабеля, м; θ — превышение температуры нагрева токопроводящих жил кабеля, °С.



*Таблица 2.5.6*

**Поправочные коэффициенты $a_1$—$a_4$ в формулах (2.5.6)—(2.5.15)**

| Материал изоляции или оболочки и тип кабеля | Поправочный коэффициент | σ, °С·м/Вт |
|---|---|---|
| Резиновая изоляция кабелей вместе с защитной оболочкой из негорючей шланговой резины: | | |
| одножильных | 0,87 | 3,0 |
| двухжильных | 0,78 | 3,0 |
| трех-, четырех-, пятижильных | 0,97 | 3,0 |
| Резиновая изоляция кабелей с заполнением из пряжи: | | |
| двухжильных | 1,06 | 3,0 |
| трехжильных | 1,60 | 3,0 |
| Резиновая изоляция многожильных кабелей | 0,97 | 3,0 |
| Полихлорвиниловая изоляция двух- и трехжильных кабелей с оболочкой из полихлорвинилового пластиката | 0,78 | 7,5 |
| Полихлорвиниловая изоляция многожильных кабелей | 0,70 | 7,5 |
| Прессованная магнезиальная изоляция кабелей с однопроволочными жилами: | | |
| двухжильных | 0,70 | 3,3 |
| трехжильных | 0,85 | 3,3 |
| многожильных | 0,80 | 3,3 |
| Полиэтиленовая изоляция кабелей: | | |
| двух- и трехжильных | 1,35 | 4,5 |
| многожильных | 1,00 | 4,5 |

Формула (2.5.18) — эмпирическая, и ею следует пользоваться лишь в пределах значений, указанных в табл. 2.5.7.

**Расчет постоянной времени одиночного кабеля.** Постоянная времени кабеля в минутах может быть рассчитана по формуле

$$T = \frac{C_V}{240}\left(a_1 d_{\text{нар}} + b_1 \frac{d_{\text{нар}}^2}{\theta}\right), \qquad (2.5.19)$$

где $C_V$ — средняя удельная объемная теплоемкость кабеля, Дж/°С·м³; $a_1$ и $b_1$ — коэффициенты, принимаемые по данным табл. 2.5.7; $d_{\text{нар}}$ — наружный диаметр кабеля, м; θ — превышение температуры токопроводящей жилы кабеля, °С.

Значения средней удельной объемной теплоемкости кабелей с медными жилами приведены ниже:

| | $C_V \cdot 10^{-6}$, Дж/°С·м³ |
|---|---|
| Кабели и провода с различной изоляцией и защитной оболочкой из пропитанной или лакированной хлопчатобумажной оплетки, из резины со стальной оплеткой или без нее | 3,00 |
| Кабели с изоляцией из прессованной магнезии и оболочкой из меди | 2,98 |
| Кабели с резиновой изоляцией и свинцовой оболочкой | 2,35 |
| Кабели с полихлорвиниловой изоляцией, оболочкой и экранирующей оплеткой из медных проволок или без нее | 2,50 |
| Кабели с полиэтиленовой изоляцией, полихлорвиниловой оболочкой и экранирующей оплеткой из медных проволок или без нее | 2,58 |

*Таблица 2.5.7*

**Значения коэффициентов, входящих в формулу (2.5.18)**

| Вид поверхности кабеля | $a_1$ | $b_1$ | Область применения | |
|---|---|---|---|---|
| | | | $d_{нар}$, м | θ, °С |
| Панцирная оплетка из стальной проволоки, покрытой грунтом | 0,052 | 17 | 0,008—0,065 | 20—50 |
| Защитная оболочка из свинца | 0,070 | 23 | 0,06—0,060 | 20—50 |
| Хлопчатобумажная оплетка, пропитанная битумным составом. Оболочка из шланговой резины | 0,055 | 19 | 0,004—0,060 | 20—50 |
| Защитная оболочка из темного полихлорвинилового пластиката | 0,034 | 63 | 0,0025—0,018 | 20—50 |
| Хлопчатобумажная лакированная оплетка | 0,034 | 63 | 0,003—0,021 | 20—50 |
| Защитная оболочка из красной меди | 0,046 | 103 | 0,004—0,029 | 20—100 |
| Оплетка из медной луженой проволоки | 0,040 | 84 | 0,003—0,022 | 20—50 |

Сечение кабеля, необходимое для передачи заданного значения тока $I_{расч}$ при одиночной прокладке кабеля, обычно определяется либо сразу по таблицам допустимых токовых нагрузок, если режим нагрузки кабеля соответствует указанному в этих таблицах, либо по эквивалентному току:

$$I_{экв} = \frac{I_{расч} A}{k_1 k_2 k_3 k_4}, \qquad (2.5.20)$$

где коэффициенты $A$, $k_1$, $k_2$, $k_3$ и $k_4$ те же, что и для формулы (2.5.2).

Эквивалентный ток принимается равным длительно допустимому, значение которого и определяет необходимое сечение. Можно, конечно, и в этом случае пользоваться формулами (2.5.1) и (2.5.2).

Если режим нагрузки отличен от длительного, то значением коэффициента $A$ приходится предварительно задаваться, так как постоянная времени кабеля неизвестна.

Определив сечение кабеля, следует найти его постоянную времени и соответствующее значение $A$. В случае расхождения полученного значения $A$ с принятым необходимо повторить расчет до их совпадения.

При групповой прокладке кабелей условия теплоотвода от кабеля ухудшаются, что должно учитываться соответствующим снижением допустимой для кабеля нагрузки.

Предельно допустимый ток кабелей, предназначенных для групповой прокладки при длительной нагрузке, приближенно можно определить по формуле

$$I_{гр} = \frac{I_{доп}}{\alpha}, \qquad (2.5.21)$$

где $I_{доп}$ — допустимый ток для кабеля при одиночной прокладке и длительной нагрузке, А; $\alpha$ — усредненный коэффициент снижения тока, значения которого приведены в табл. 2.5.8.

Предварительный выбор сечения кабеля по расчетному току кабеля $I_{расч}$ при групповой прокладке производится по фиктивному току $I_{фикт}$, определяемому формулой

$$I_{фикт} = I_{расч}\alpha. \qquad (2.5.22)$$



*Таблица 2.5.8*

**Значения усредненных коэффициентов снижения тока при групповой прокладке кабелей**

| Характер группы кабелей | Способ прокладки | Значение α | |
|---|---|---|---|
| | | I * | II * |
| Группы силовых нагруженных кабелей | В один ряд | 1,10 | 1,30 |
| | В два ряда | 1,27 | 1,50 |
| | Пучком | 1,70 | 2,00 |
| Смешанные группы, состоящие из нагруженных и ненагруженных силовых и слаботочных кабелей | В один ряд | 1,00 | 1,00 |
| | В два ряда | 1,00 | 1,25 |
| | Пучком | 1,46 | 1,72 |

* Для кабелей в сплошной металлической оболочке или в плотной медной оплетке.

** Для всех остальных кабелей.

Если режим нагрузки кабеля отличен от длительного, то в условиях его работы в смешанной группе за эквивалентный можно принимать такой ток, который, протекая по кабелю длительно, вызовет нагрев, равный среднему во времени нагреву кабеля в течение суток. Принимая эквивалентный ток равным длительно допустимому, можно определить последний из формулы

$$I_{гр} = \frac{I_{доп}}{\alpha\beta}, \qquad (2.5.23)$$

где β — коэффициент, зависящий от числа часов работы кабеля в сутки $t_з$:

$$\beta = \sqrt{\frac{t_з}{24}}. \qquad (2.5.24)$$

Если произведение αβ меньше единицы, его следует принять равным единице. Сечение кабеля в этом случае определяется по фиктивному току:

$$I_{фикт} = I_{расч}\alpha\beta. \qquad (2.5.25)$$

Если общая длительность нагрузки кабеля в группе не превышает 6 ч в сутки, то в этом случае можно считать $\alpha\beta = 1$.

Если температура окружающей среды, допустимая температура токоведущей жилы кабеля или частота тока отличаются от тех, для которых действительны табличные нормы, а также если группа кабелей проложена в трубе или кожухе прямоугольного сечения длиной 2 м и более, то вводится поправка к току с помощью тех же коэффициентов $k_1 - k_4$, что и для одиночно проложенного кабеля.

Когда все кабельные трассы скомплектованы, состав и размеры пучков или рядов кабелей известны, необходимо проверить правильность выбора размеров пучков или рядов кабелей. Критерием для такой проверки служит соответствие фактической мощности потерь, выделяющейся во всех кабелях пучка, той величине потерь, которая может быть рассеяна с поверхности пучка данных размеров при соблюдении допустимого превышения температуры токоведущих жил кабелей.

При длительной нагрузке значение предельно допустимой мощности потерь (Вт/м) может быть определено по формуле

$$\sum P_{доп} = \frac{\theta - b_2}{\frac{a_2}{2{,}8\,(b_1 + b_{11})} + \beta S_{вн}}, \qquad (2.5.26)$$

где $\theta$ — допустимое превышение температуры токоведущих жил кабелей, °С; $a_2$ и $b_2$ — коэффициенты (табл. 2.5.9), зависящие от вида поверхности кабелей (установлены опытным путем); $b_I$ и $b_{II}$ — размеры сторон прямоугольника, описанного вокруг поперечного сечения пучка, м; $\beta$ — коэффициент, установленный опытным путем (для кабелей с металлической оплеткой или оболочкой $\beta = 2$; для прочих кабелей $\beta = 3$); $S_{вн}$ — среднее внутреннее тепловое сопротивление пучка длиной 1 м, т·Ом·м. Значения $S_{вн}$ приведены ниже:

| Кабель: | $S_{вн}$, т·Ом·м |
|---|---|
| с резиновой изоляцией без сплошной металлической оболочки с токопроводящими жилами сечением менее 150 мм² и выше | 0,060 |
| то же с токопроводящими жилами сечением 150 мм² и выше | 0,042 |
| с резиновой изоляцией в сплошной металлической оболочке | 0,035 |
| с полихлорвиниловой изоляцией в оболочке из того же материала с медной оплеткой или без нее | 0,110 |
| с магнезиальной изоляцией в медной оболочке | 0,025 |
| с полиэтиленовой изоляцией в полихлорвиниловой оболочке без медной оплетки | 0,136 |
| то же с медной оплеткой | 0,094 |

Формула (2.5.26) справедлива, если длительно загружено током не менее 50% всех кабелей. В противном случае допустимая мощность потерь будет меньше. Коэффициент снижения $k_5$ составит

$$k_5 = \left(1 + 2{,}5 \lg \frac{n}{n_1}\right) \frac{n_1}{n}, \quad (2.5.27)$$

где $n$ — число кабелей пучка; $n_1$ — число нагруженных кабелей.

Для кабелей с полихлорвиниловой или полиэтиленовой изоляцией следует принимать несколько меньшую величину этого коэффициента, а именно:

$$k_5 = \left(1 + 1{,}3 \lg \frac{n}{n_1}\right) \frac{n_1}{n}. \quad (2.5.28)$$

Фактическая мощность потерь вычисляется по формуле

$$\sum P_{факт} = \sum_1^n m I^2_{расч} R \cdot 10^{-3} \quad (2.5.29)$$

или

$$\sum P_{факт} = \sum_1^n m I^2_{экв} R \cdot 10^{-3}, \quad (2.5.30)$$

где $n$ — число кабелей в пучке или ряду; $m$ — число жил кабеля; $I_{расч}$ — расчетный ток нагрузки кабеля в заданном режиме, А; $I_{экв}$ — эквивалентный ток нагрузки кабеля, работающего в режиме, отличном от длительного, А; $R$ — активное сопротивление токопроводящей жилы кабеля при расчетной температуре и фактической частоте тока, Ом/км.

*Таблица 2.5.9*

**Значения коэффициентов $a_2$ и $b_2$**

| Вид поверхности кабеля | $a_2$ | $b_2$ |
|---|---|---|
| Оплетка из стальной проволоки, покрытой грунтом | 0,086 | 3,5 |
| Оплетка из хлопчатобумажной пропитанной пряжи, оболочка из шланговой резины или шлангового полихлорвинилового пластиката | 0,098 | 2,6 |
| Герметизирующая оболочка из свинца, оплетка из медных проволок | 0,103 | 2,9 |
| Герметизирующая оболочка из меди | 0,100 | 9,0 |



*Таблица 2.5.10*

**Значения активного электрического сопротивления многопроволочных жил кабелей**

| Сечения токопроводящих жил кабеля, мм² | $R$, Ом/км, при температуре нагрева токопроводящих жил, °С | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 65 | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 | 95 | 100 |
| 0,75 | 28,8 | 29,3 | 29,9 | 30,3 | 30,8 | 31,2 | 31,8 | 32,3 |
| 1,0 | 21,6 | 22,0 | 22,4 | 22,7 | 23,1 | 23,4 | 23,8 | 24,2 |
| 1,5 | 14,4 | 14,7 | 14,9 | 15,1 | 15,4 | 15,6 | 15,9 | 16,2 |
| 2,5 | 8,65 | 8,8 | 8,96 | 9,09 | 9,25 | 9,36 | 9,52 | 9,7 |
| 4,0 | 5,4 | 5,5 | 5,6 | 5,67 | 5,78 | 5,85 | 5,95 | 6,05 |
| 6,0 | 3,6 | 3,67 | 3,73 | 3,78 | 3,85 | 3,90 | 3,96 | 4,03 |
| 10,0 | 2,16 | 2,20 | 2,24 | 2,27 | 2,31 | 2,34 | 2,38 | 2,42 |
| 16,0 | 1,35 | 1,38 | 1,40 | 1,42 | 1,45 | 1,46 | 1,49 | 1,51 |
| 25,0 | 0,865 | 0,88 | 0,896 | 0,909 | 0,925 | 0,936 | 0,952 | 0,970 |
| 35,0 | 0,617 | 0,629 | 0,640 | 0,650 | 0,660 | 0,669 | 0,680 | 0,691 |
| 50,0 | 0,432 | 0,440 | 0,448 | 0,454 | 0,463 | 0,468 | 0,476 | 0,484 |
| 70,0 | 0,309 | 0,314 | 0,320 | 0,324 | 0,330 | 0,334 | 0,340 | 0,345 |
| 95,0 | 0,227 | 0,232 | 0,236 | 0,239 | 0,243 | 0,246 | 0,251 | 0,255 |
| 120,0 | 0,180 | 0,183 | 0,187 | 0,189 | 0,192 | 0,195 | 0,198 | 0,202 |
| 150,0 | 0,144 | 0,147 | 0,149 | 0,151 | 0,154 | 0,156 | 0,159 | 0,162 |
| 185,0 | 0,117 | 0,119 | 0,121 | 0,123 | 0,125 | 0,127 | 0,129 | 0,131 |
| 240,0 | 0,090 | 0,092 | 0,093 | 0,095 | 0,096 | 0,098 | 0,099 | 0,101 |
| 300,0 | 0,072 | 0,073 | 0,075 | 0,076 | 0,077 | 0,078 | 0,078 | 0,081 |
| 400,0 | 0,054 | 0,055 | 0,056 | 0,057 | 0,057 | 0,58 | 0,059 | 0,060 |

Значения активного сопротивления кабеля можно определить по табл. 2.5.10.

Если $\sum P_{факт} \leqslant \sum P_{доп}$, то можно считать, что размеры пучка выбраны правильно. Если же это условие не удовлетворяется, то следует разделить пучок вертикальным зазором $\delta_{верт} = 25$ мм или горизонтальным зазором $\delta_{гор} = 150$ мм. При таких размерах зазоров каждая часть пучка может рассматриваться как самостоятельный пучок. После этого приведенный выше расчет повторяется.

Если пучок предназначен для прокладки в трубе или кожухе прямоугольного сечения длиной 2 м и более, то допустимая мощность потерь снижается умножением на коэффициенты: 0,64 — для труб; 0,72 — для кожухов.

Фактическое превышение температуры токопроводящих жил кабеля $\theta_{факт}$ можно вычислить по формуле

$$\theta_{факт} = (\theta - 3) \frac{\sum P_{факт}}{\sum P_{доп}} + 3, \quad (2.5.31)$$

где $\theta$ — допустимое превышение температуры нагрева токопроводящей жилы кабеля, °С.

*Необходимо помнить, что $\sum P_{доп}$ должна быть определена при том значении $\theta$, которое подставляется в (2.5.31).*

Нагрев кабеля, проложенного в пучке, определяется параметрами пучка в целом. Поэтому расчет эквивалентного тока для кабеля, работающего в режиме, отличном от длительного, должен выполняться с учетом постоянной времени пучка, а не отдельного кабеля.

**Расчет постоянной времени пучка кабелей.** Постоянная времени пучка (в минутах) определяется формулой

$$T = \left(\frac{5{,}43 C'_V a_2 \theta}{\theta - b_2} \frac{b_I b_{II}}{b_I + b_{II}} + \frac{15{,}2 C'_V b_2 \beta S_{вн} b_I b_{II}}{\theta - b_2}\right) \cdot 10^{-3}, \quad (2.5.32)$$

где $C'_V$ — удельная объемная теплоемкость пучка кабелей, значения которой приведены ниже:

| Кабель: | $C'_V \cdot 10^{-6}$, Дж/°С·м³ |
|---|---|
| с резиновой изоляцией без сплошной металлической оболочки | 2,65 |
| с резиновой изоляцией в свинцовой оболочке | 2,10 |
| с полихлорвиниловой изоляцией в защитной оболочке из того же материала, с медной оплеткой или без нее | 2,20 |
| с полиэтиленовой изоляцией в полихлорвиниловой оболочке с медной оплеткой | 1,75 |
| то же без медной оплетки | 2,42 |

Остальные величины, входящие в формулу (2.5.32), аналогичны величинам в формуле (2.5.26).

Все сказанное выше относится к смешанным пучкам, т. е. к пучкам (или рядам), состоящим из кабелей, питающих разных потребителей. Считают, что в таком пучке кабели включаются и выключаются в разное время. Это сглаживает колебания температуры кабелей и облегчает условия их работы.

Если же группа параллельно включенных кабелей питает одного мощного потребителя или щит, то условия их работы осложняются, так как все они одновременно находятся под полной нагрузкой. В этом случае следует избегать прокладки таких кабелей пучком, поскольку значительно эффективнее будет прокладка в один или в два ряда с зазором или без зазора или в три ряда с зазором между ними. Зазоры между вертикальными рядами должны быть не менее 25 мм, а между горизонтальными — не менее 150 мм. Прокладка вертикальными рядами предпочтительнее.

Сечение и число кабелей при одно- или двухрядной (без зазора) прокладке при длительном режиме нагрузки можно выбрать непосредственно по графикам (рис. 2.5.3).

В случае двух- или трехрядной прокладки с зазорами указанной выше величины сечение и число кабелей находят следующим образом. Полную величину тока $\Sigma I$, которую необходимо передать, делят на предполагаемое число рядов $N$ и приближенно определяют ток, передаваемый одним рядом кабелей:

$$I'_{\text{ряда}} = \frac{\sum I}{N}.$$

Чтобы учесть тепловое влияние, с которым в этом случае при указанных зазорах все же надо считаться, вычисляют эквивалентный ток ряда

$$I_{\text{ряда экв}} = I'_{\text{ряда}} k,$$

где $k = 1{,}1$ — для двухрядной прокладки; $k = 1{,}2$ — для трехрядной прокладки с высотой ряда до 150 мм; $k = 1{,}3$ — для трехрядной прокладки с высотой ряда свыше 150 мм.

По найденному таким образом эквивалентному току по графикам рис. 2.5.3 определяют необходимое число и сечение кабелей в ряду.

Если режим работы группы параллельных кабелей отличен от длительного, то сечение кабеля с достаточной точностью выбирается по эквивалентному току длительной нагрузки способом, указанным ранее. При определении коэффициента $A$ следует использовать величину постоянной времени группы кабелей (пучок, ряд, два ряда и т. д.).

Если режим кратковременной нагрузки имеет место достаточно редко (например, случаи аварийного питания и т. п.), то можно допустить более высокие нагрузки на кабель, так как увеличение его износа будет незначительным и мало отразится на сроке его службы.



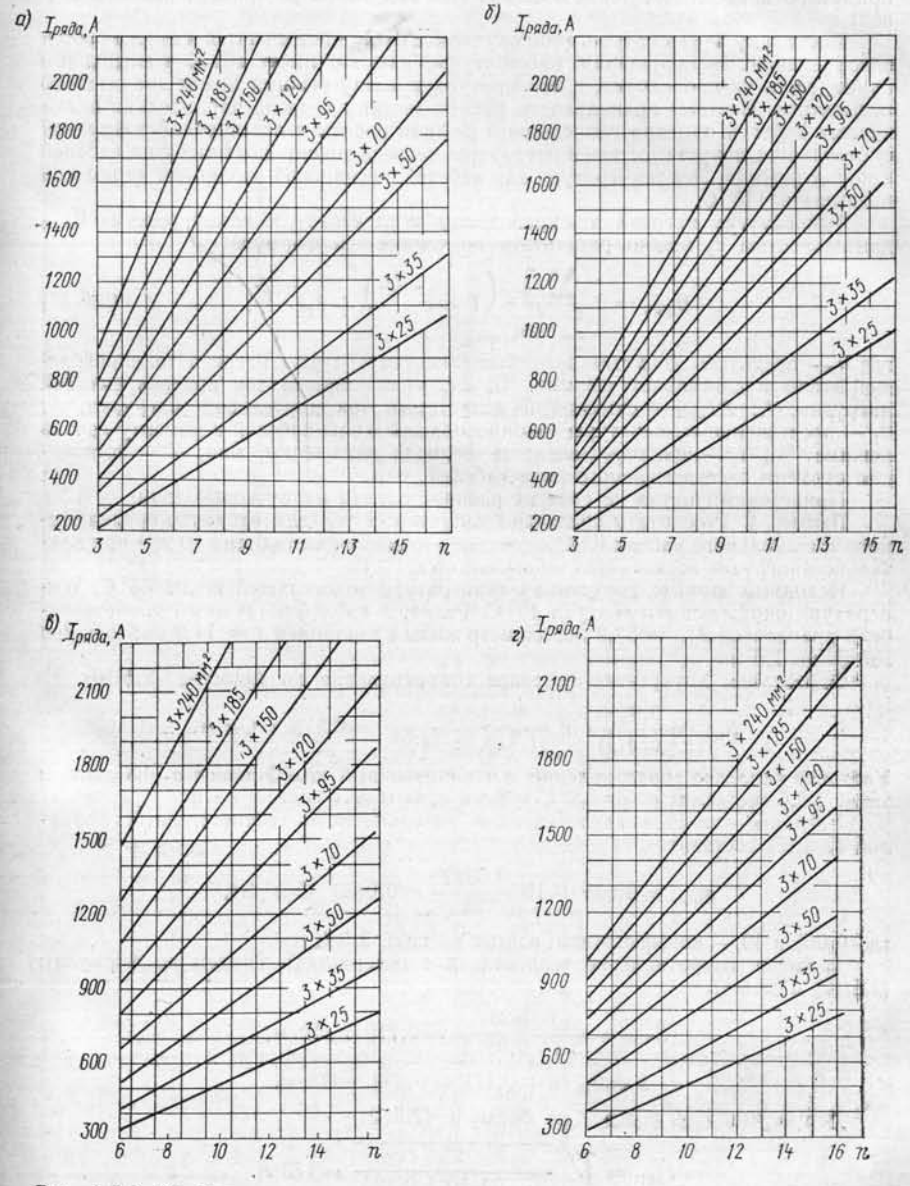



Рис. 2.5.3. Графики длительно допустимых токовых нагрузок судовых кабелей с резиновой изоляцией при $\theta = 25°$ С: *а* — при однорядной прокладке и $f = 50$ Гц; *б* — то же при $f = 400$ Гц; *в* — при двухрядной прокладке и $f = 50$ Гц; *г* — то же при $f = 400$ Гц.

Сказанное относится к кабелям с резиновой изоляцией и не может быть применено к кабелям с термопластической изоляцией (например, полиэтиленовой).

Поскольку в рассматриваемом случае все кабели включаются и выключаются одновременно, выравнивания температуры, как это имеет место в смешанном пучке, здесь не происходит, и температура к концу режима может значительно повыситься. Поэтому правильность выбора сечения и числа параллельно включенных кабелей при кратковременном режиме работы с повышенной нагрузкой определяется допустимостью температуры нагрева токопроводящих жил кабелей к концу режима. Эта температура для кабелей с резиновой изоляцией не должна превышать 110° С.

Температуру нагрева токопроводящих жил кабеля к концу режима $\theta_{max}$ длительностью $t_1$ можно рассчитать по следующей формуле:

$$\theta_{max} = \theta \frac{\sum I_к^2}{\sum I_{доп}^2} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T}}\right) + \theta_1 e^{-\frac{t_1}{T}}, \qquad (2.5.33)$$

где $\theta$ — предельно допустимое превышение температуры нагрева токопроводящей жилы в длительном режиме, °С; $\Sigma I_к$ — суммарный ток кратковременной нагрузки, А; $\Sigma I_{доп}$ — суммарный допустимый ток длительной нагрузки, А; $\theta_1$ — превышение температуры токопроводящей жилы кабелей к моменту начала режима, °С; $t_1$ — продолжительность периода включения, мин; $T$ — постоянная времени рассчитываемого ряда кабелей, мин.

Приведенный метод не следует распространять на пусковые токи.

**Пример 1.** Рассчитать предельно допустимый ток для одиночно продолженного трехжильного кабеля КНР с сечением токопроводящих жил 70 мм² при длительной нагрузке переменным током частотой 50 Гц.

Исходные данные: допустимая температура токоведущей жилы 65° С; температура окружающего воздуха 40° С. Размеры кабеля: наружный диаметр кабеля с оболочкой $d_{нар}$ = 37,2 мм; диаметр жилы с изоляцией $d$ = 14,9 мм; толщина изоляции 1,6 мм.

Определяем внутреннее тепловое сопротивление по формуле (2.5.10)

$$S_{вн} = \frac{0{,}97 \cdot 3}{6 \cdot 3{,}14} \ln \frac{18{,}6^3}{1{,}7 \cdot 5{,}35 \cdot 14{,}9^2} = 0{,}178 \text{ т·Ом·м}.$$

Удельное тепловое сопротивление $\sigma$ и поправочный коэффициент $a_3$ по данным табл. 2.5.6 составляют: $\sigma$ = 3° С·м/Вт и $a_3$ = 0,97.

Удельное тепловое сопротивление поверхности в соответствии с формулой (2.5.18) составит

$$\sigma_{пов} = 0{,}055 + 19 \frac{0{,}0372}{25} = 0{,}0833 \text{ °С·м²/Вт},$$

где 0,055 и 19 — коэффициенты, взятые из табл. 2.5.7.

Тепловое сопротивление теплоотдачи с поверхности найдем по формулам (2.5.17) и (2.5.4):

$$S_{пов} = \frac{0{,}0833}{3{,}14 \cdot 0{,}0372} = 0{,}718 \text{ т·Ом·м};$$

$$S = 0{,}718 + 0{,}178 = 0{,}896 \text{ т·Ом·м}.$$

Допустимый ток найдем по формуле (2.5.1):

$$I_{доп} = \sqrt{\frac{25}{3 \cdot 3{,}09 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}896}} = 173 \text{ А}.$$

**Пример 2.** Рассчитать предельно допустимый ток кабеля марки КНРП сечением 3 × 25 мм² при повторно-кратковременной нагрузке с длительностью периода включения $t_1$ = 3,0 мин и длительностью паузы $t_2$ = 8,0 мин.

Исходные данные: допустимая температура токопроводящих жил 65° С; температура окружающего воздуха 40° С; частота тока 50 Гц.



*Таблица 2.5.11*

**Допустимые продолжительные нагрузки на электрические кабели и провода с резиновой изоляцией**

| Сечение жил кабеля, мм² | Допустимый ток, А, кабелей | | |
|---|---|---|---|
| | одножильных | двухжильных | трехжильных |
| 1,0 | 11 | 11 | 11 |
| 1,5 | 16 | 16 | 16 |
| 2,5 | 21 | 21 | 21 |
| 4 | 27 | 27 | 27 |
| 6 | 35 | 35 | 35 |
| 10 | 47 | 47 | 47 |
| 16 | 80 | 78 | 60 |
| 25 | 100 | 98 | 79 |
| 35 | 135 | 115 | 97 |
| 50 | 166 | 137 | 120 |
| 70 | 205 | 165 | 135 |
| 95 | 245 | 200 | 170 |
| 120 | 285 | 225 | 200 |
| 150 | 330 | 255 | 235 |
| 185 | 375 | — | 275 |
| 240 | 445 | — | 325 |
| 300 | 500/485 * | — | 380 |
| 400 | 605/545 | — | 440 |
| 500 | 700/580 | — | — |
| 625 | 802/665 | — | — |

* Данные, указанные в числителе, относятся к постоянному току, а в знаменателе — к переменному.

*Таблица 2.5.12*

**Допустимые кратковременные нагрузки на кабели и провода с резиновой изоляцией**

| Сечение жил кабеля, мм² | Допустимый ток, А, кабелей | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | одножильных | | двухжильных | | трехжильных | |
| | 30 мин | 60 мин | 30 мин | 60 мин | 30 мин | 60 мин |
| 1 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| 1,5 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| 2,5 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 |
| 4 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 |
| 6 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 |
| 10 | 47 | 47 | 47 | 47 | 47 | 47 |
| 16 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| 25 | 100 | 100 | 100 | 100 | 95 | 80 |
| 35 | 135 | 135 | 125 | 120 | 110 | 100 |
| 50 | 165 | 165 | 155 | 135 | 135 | 130 |
| 70 | 205 | 205 | 185 | 170 | 190 | 165 |
| 95 | 255 | 245 | 235 | 205 | 245 | 205 |
| 120 | 310 | 290 | 275 | 235 | 290 | 245 |
| 150 | 365 | 330 | 325 | 270 | 350 | 285 |
| 185 | 430 | 380 | — | — | 410 | 335 |
| 240 | 540 | 470 | — | — | 500 | 405 |
| 300 | 650/625 * | 545/525 | — | — | 595 | 485 |
| 400 | 810/730 | 670/605 | — | — | 740 | 595 |

* Данные, указанные в числителе, относятся к постоянному току, а в знаменателе — к переменному.

*Таблица 2.5.13*

**Допустимые повторно-кратковременные нагрузки на кабели и провода с резиновой изоляцией**

| Сечение жил кабелей, мм² | Допустимый ток, А, кабелей | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | одножильных | | двухжильных | | трехжильных | |
| | ПВ = 25% | ПВ = 40% | ПВ = 25% | ПВ = 40% | ПВ = 25% | ПВ = 40% |
| 1 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| 1,5 | 25 | 21 | 21 | 21 | 21 | 19 |
| 2,5 | 34 | 27 | 34 | 27 | 27 | 26 |
| 4 | 47 | 38 | 47 | 38 | 38 | 35 |
| 6 | 66 | 55 | 60 | 50 | 54 | 46 |
| 10 | 80 | 65 | 80 | 65 | 75 | 60 |
| 16 | 110 | 100 | 110 | 95 | 105 | 85 |
| 25 | 155 | 135 | 150 | 125 | 135 | 120 |
| 35 | 200 | 170 | 190 | 155 | 175 | 135 |
| 50 | 260 | 215 | 230 | 195 | 205 | 175 |
| 70 | 330 | 275 | 270 | 225 | 270 | 225 |
| 95 | 405 | 330 | 325 | 270 | 325 | 270 |
| 120 | 475 | 400 | 375 | 315 | 375 | 315 |
| 150 | 540 | 460 | 430 | 360 | 430 | 360 |
| 185 | 630 | 530 | — | — | 490 | 410 |
| 240 | 750 | 630 | — | — | 580 | 480 |
| 300 | 860/825 * | 720/690 | — | — | 650 | 540 |
| 400 | 960/900 | 800/750 | — | — | 780 | 650 |
| 500 | 1040/795 | 880/795 | — | — | — | — |

* Данные, указанные в числителе, относятся к постоянному току, а в знаменателе — к переменному.

По формуле (2.5.2) и данным табл. 2.5.4

$$I_{доп} = I\sqrt{\frac{t_1 + t_2}{t_1}},$$

где $I$ — длительно допустимый ток, который по формуле (2.5.1) составляет 95 А. Тогда

$$I_{доп} = 95\sqrt{\frac{3+8}{3}} = 182 \text{ А}.$$

Очевидно, что если бы надо было решить обратную задачу, т. е. по заданному току повторно-кратковременного режима ($t_1 = 3$ мин, $t_2 = 8$ мин, $I_{п.к} = 182$ А) выбрать необходимое сечение, то

$$I_{экв} = 182\sqrt{\frac{3}{3+8}} = 95 \text{ А},$$

что соответствует сечению $3 \times 25$ мм².

В практике судостроения применяется и другой, упрощенный, метод выбора сечения кабеля, по которому сечения одно-, двух- и трехжильных кабелей с резиновой изоляцией выбирают в соответствии с нагрузками, указанными в табл. 2.5.11—2.5.13. Эти таблицы составлены с учетом открытой однорядной прокладки кабелей, длительно допустимой температуры токопроводящей жилы кабеля 65° С и температуры окружающей среды 40° С. Если же применена скрытая прокладка кабелей или открытая прокладка в несколько рядов, нагрузки, указанные в этих таблицах, снижаются на 25% [49].



При использовании пучковой прокладки выбор необходимого сечения или допустимой нагрузки производится методом, описанным ранее.

Поправки за температуру окружающей среды и частоту переменного тока вводятся с помощью формул и коэффициентов, приведенных ранее.

## § 2.5.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ТОКОВ УЧАСТКОВ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ

Расчетный ток в амперах для выбора сечения кабеля определяется по следующим формулам:

а) для кабеля, питающего двигатель постоянного тока,

$$I_{расч} = \frac{P_{ном} k_{загр} \cdot 10^3}{\eta U_{ном}}; \qquad (2.5.34)$$

б) для кабеля, питающего двигатель переменного тока,

$$I_{расч} = \frac{P_{ном} k_{загр} \cdot 10^3}{\eta \sqrt{3}\, U_{ном} \cos\varphi}, \qquad (2.5.35)$$

где $P_{ном}$ — номинальная мощность двигателя, кВт; $k_{загр}$ — коэффициент загрузки двигателя; $\eta$ — КПД двигателя; $U_{ном}$ — номинальное напряжение, В; $\cos\varphi$ — коэффициент мощности двигателя;

в) для фидера, питающего несколько ($n$) потребителей постоянного тока,

$$I_{расч} = k_o \sum_1^n I + I_{зап}, \qquad (2.5.36)$$

где $k_o$ — коэффициент одновременности работы потребителей, питающихся от данного фидера; $\sum_1^n I$ — сумма полных токов всех $n$ потребителей, питающихся от данного фидера, А; $I_{зап}$ — ток запасных ответвлений, А;

г) для фидера, питающего несколько ($n$) потребителей переменного тока, расчетный ток в общем случае определяется как геометрическая сумма активных и реактивных токов всех потребителей с учетом коэффициента одновременности их работы и необходимого запаса по току:

$$I_{расч} = \sqrt{\left(\sum_1^n I_a\right)^2 + \left(\sum_1^n I_p\right)^2} + I_{зап}, \qquad (2.5.37)$$

где $I_a$, $I_p$ — соответственно активный и реактивный ток для каждого потребителя:

$$I_{ai} = I_{потр\ i} \cos\varphi;$$

$$I_{pi} = I_{потр\ i} \sin\varphi;$$

$I_{потр\ i}$ — полный ток $i$-го потребителя.

## § 2.5.3. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ НАПРЯЖЕНИЯ В КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ

Величина потери напряжения $\Delta U$ в кабеле может быть рассчитана по следующим формулам:

для постоянного тока

$$\Delta U = \frac{2 I_{расч} l R}{U} \cdot 100\%; \qquad (2.5.38)$$

для однофазного переменного тока

$$\Delta U = \frac{2I_{\text{расч}}l}{U}(R\cos\varphi + X\sin\varphi)\cdot 100\%; \qquad (2.5.39)$$

для трехфазного переменного тока

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3}\,I_{\text{расч}}l}{U_л}(R\cos\varphi + X\sin\varphi)\cdot 100\%, \qquad (2.5.40)$$

где $I_{\text{расч}}$ — расчетный ток нагрузки кабеля, А; $l$ — длина кабеля, м; $U$ — номинальное напряжение сети, В; $U_л$ — номинальное линейное напряжение сети трехфазного переменного тока, В; $R$ — активное сопротивление одной токопроводящей жилы кабеля при расчетной температуре жилы с учетом влияния частоты тока, Ом/м; $X$ — индуктивное сопротивление, приведенное к одной токопроводящей жиле кабеля, Ом/м.

Нагрузка считается активно-индуктивной.

Значения активных сопротивлений токопроводящих жил кабелей приведены в табл. 2.5.10.

При расчете активных сопротивлений принималось

$$\rho_t = \rho_{20}[1 + \alpha(\theta - 20)], \qquad (2.5.41)$$

где $\rho_t$ — сопротивление медной жилы сечением 1 мм² при температуре $t°$ С; $\rho_{20}$ — сопротивление многопроволочной медной жилы сечением 1 мм² при температуре 20° С, равное 0,0184 Ом·мм²/м; $\alpha$ — температурный коэффициент, равный 0,004° С [1].

При нагрузке кабеля переменным током активное сопротивление жилы должно быть умножено на коэффициент, принимаемый по табл. 2.5.14.

*Таблица 2.5.14*

**Коэффициенты увеличения активного сопротивления токопроводящей жилы кабеля при нагрузке его переменным током**

| Сечение жил, мм² | Одножильные кабели при частоте тока | | Двух- и трехжильные кабели при частоте тока | |
|---|---|---|---|---|
| | 50 Гц | 400 Гц | 50 Гц | 400 Гц |
| 25 | — | 1,01 | — | 1,02 |
| 35 | — | 1,02 | — | 1,04 |
| 50 | — | 1,04 | — | 1,06 |
| 70 | — | 1,09 | — | 1,13 |
| 95 | — | 1,16 | — | 1,29 |
| 120 | — | 1,25 | — | 1,45 |
| 150 | — | 1,34 | — | 1,60 |
| 185 | 1,01 | 1,45 | 1,02 | 1,78 |
| 240 | 1,02 | 1,62 | 1,04 | 2,10 |
| 300 | 1,02 | 1,75 | — | — |
| 400 | 1,04 | 1,98 | — | — |

Примечание. Увеличение сопротивления двух- и трехжильных кабелей объясняется влиянием эффекта близости.

Индуктивное сопротивление двух- и трехжильных кабелей на 1 м длины рассчитывается по формуле

$$X = 2\pi f\alpha\left(0{,}46\lg\frac{D}{r_1} + 0{,}05\right)\cdot 10^{-6}, \qquad (2.5.42)$$



где $f$ — частота переменного тока, Гц; $\alpha$ — коэффициент, учитывающий влияние стальной оплетки (при наличии стальной оплетки $\alpha = 1{,}25$; в остальных случаях $\alpha = 1$); $D$ — расстояние между осями токопроводящих жил; $r_1$ — радиус токопроводящей жилы.

Значения приведенных к одной жиле индуктивных сопротивлений некоторых марок кабелей даются в табл. 2.5.15.

*Таблица 2.5.15*

**Значения индуктивных сопротивлений некоторых марок двух- и трехжильных кабелей**

| Сечение жилы, мм² | Индуктивное сопротивление $X$, Ом/км | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | КНРП | | КНР, КНРЭ, СРМ | | НРШМ | |
| | 50 Гц | 400 Гц | 50 Гц | 400 Гц | 50 Гц | 400 Гц |
| 1,0 | 0,147 | 1,18 | 0,118 | 0,94 | 0,117 | 0,94 |
| 1,5 | 0,139 | 1,11 | 0,110 | 0,89 | 0,110 | 0,88 |
| 2,5 | 0,134 | 1,08 | 0,108 | 0,86 | 0,108 | 0,86 |
| 4,0 | 0,126 | 1,01 | 0,101 | 0,81 | 0,100 | 0,80 |
| 6,0 | 0,119 | 0,95 | 0,095 | 0,76 | 0,092 | 0,73 |
| 10,0 | 0,115 | 0,92 | 0,092 | 0,74 | 0,089 | 0,71 |
| 16,0 | 0,109 | 0,87 | 0,087 | 0,70 | 0,083 | 0,66 |
| 25,0 | 0,106 | 0,85 | 0,085 | 0,68 | 0,082 | 0,66 |
| 35,0 | 0,102 | 0,82 | 0,082 | 0,65 | 0,079 | 0,63 |
| 50,0 | 0,098 | 0,78 | 0,078 | 0,62 | 0,076 | 0,61 |
| 70,0 | 0,095 | 0,76 | 0,076 | 0,60 | 0,073 | 0,59 |
| 95,0 | 0,094 | 0,75 | 0,075 | 0,60 | 0,073 | 0,59 |
| 120,0 | 0,092 | 0,73 | 0,073 | 0,59 | 0,072 | 0,58 |
| 150,0 | 0,092 | 0,73 | 0,073 | 0,59 | 0,072 | 0,57 |
| 185,0 | 0,092 | 0,73 | 0,073 | 0,59 | 0,072 | 0,57 |
| 240,0 | 0,091 | 0,73 | 0,073 | 0,58 | 0,071 | 0,57 |

Для тех редких случаев, когда переменный ток передается по одножильным кабелям (без металлической оплетки), индуктивное сопротивление кабеля в омах можно определить по формуле

$$X = 4\pi f l\cdot 10^{-7}\left(\ln\frac{2l}{r_1} - 0{,}75\right), \qquad (2.5.43)$$

где $l$ — длина кабеля, м.

При активно-емкостном характере нагрузки знак плюс в формулах (2.5.39) и (2.5.40) следует заменить на минус.

С достаточной для предварительной оценки точностью величина потери напряжения в одном метре трехжильного кабеля марок КНР, КНРП, КНРЭ, НРШМ, СРМ и других аналогичных им кабелей с резиновой изоляцией и медной жилой может быть определена по кривым рис. 2.5.4 и 2.5.5 для напряжений 380 и 220 В, частотой 50 и 400 Гц и $\cos\varphi = 0{,}7 \div 0{,}9$.

Кривые построены исходя из усредненных условий работы кабеля в трехфазной сети в смешанном пучке в течение 24 ч в сутки при активно-индуктивной нагрузке.

При расчете потери напряжения в пучке параллельно включенных кабелей в сети переменного тока следует иметь в виду, что индуктивное сопротивление пучка на участке его разделки в месте присоединения к шинам резко увеличивается. С увеличением числа ($n$) параллельно включенных кабелей относительная величина этого сопротивления возрастает и для коротких трасс, рассчитанных

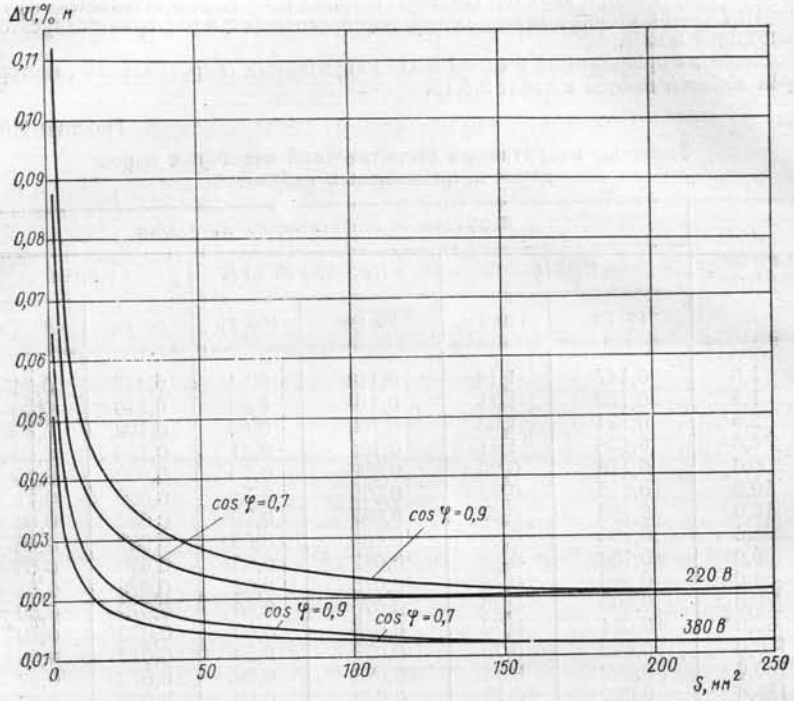



Рис. 2.5.4. Кривые потерь напряжения в одном метре кабеля с резиновой изоляцией при частоте 50 Гц.

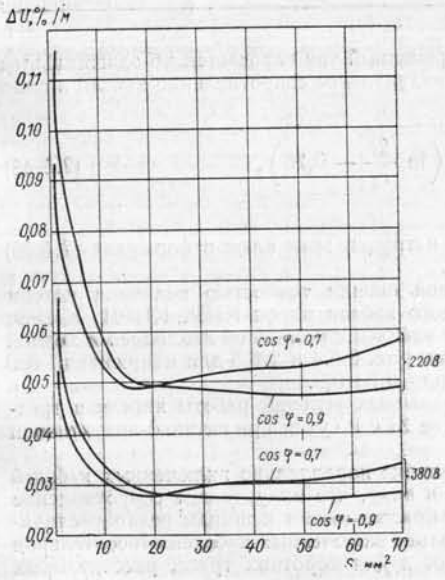



Рис. 2.5.5. Кривые потерь напряжения в одном метре кабеля с резиновой изоляцией при частоте 400 Гц.



на большую силу тока, ошибка в определении потери напряжения может достигать 50—60%. Это особенно заметно в сетях переменного тока частотой 400 Гц.

На рис. 2.5.6 приведены кривые потерь напряжения на двух участках разделки кабелей (с двух концов трассы) сечением 3 × 70 мм². Длина участка разделки принята равной 0,5 м, расстояние между фазами 0,15 м. Напряжение сети 380 В, cos φ = 0,8, нагрузка активно-индуктивная.

Приведенные кривые позволяют оценить величину потери напряжения на участках разделки.

Знание величины потерь напряжения в кабельных трассах является необходимым, но недостаточным для оценки спроектированной системы распределения электроэнергии. Необходимо ясно себе представить, что сопротивления различных участков системы распределения электроэнергии должны обеспечивать такие потери напряжения, при которых в любом режиме работы электроэнергетической системы достигалась бы необходимая стабильность напряжения на зажимах потребителей при правильно выбранном значении уставки напряжения генератора.

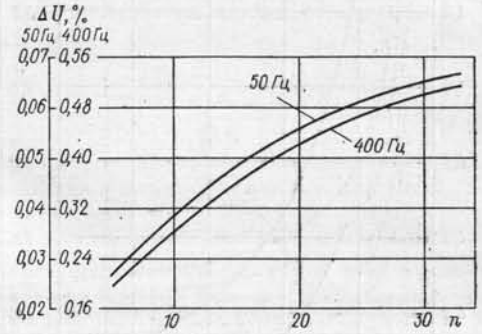



Рис. 2.5.6. Кривые потерь напряжения в двух кабельных разделках.

Если ограничиться рассмотрением только длительных режимов работы электроэнергетической системы, то указанное выше условие можно записать следующим образом:

$$U_{ном} + \Delta U_{дл.\ доп.\ в} - \Delta U_{т.\ в} + |\Delta U_{c\ min}| \geqslant U_{у} \geqslant U_{ном} + \Delta U_{дл.\ доп.\ н} - \Delta U_{т.\ н} + |\Delta U_{c\ max}|, \quad (2.5.44)$$

где $U_{ном}$ — номинальное напряжение потребителя; $U_{дл.\ доп.\ в}$, $U_{дл.\ доп.\ н}$ — соответственно верхнее и нижнее длительные допустимые отклонения напряжения у потребителя; $U_{у}$ — уставка напряжения генератора; $\Delta U_{т.\ в}$, $\Delta U_{т.\ н}$ — соответственно верхний и нижний пределы точности регулирования напряжения генератора; $\Delta U_{c\ min}$, $\Delta U_{c\ max}$ — соответственно наименьшие и наибольшие потери напряжения в цепи от точки подключения корректора напряжения генератора до зажимов потребителя.

Выражение (2.5.44) является необходимым и достаточным условием существования такой уставки напряжения генератора, которая обеспечивает допустимые пределы отклонений напряжения на зажимах потребителя при имеющих место наибольших и наименьших потерях напряжения в сети и данной точности поддержания напряжения генератора. Если условие, задаваемое выражением (2.5.44), удовлетворяется, то последнее определяет и значение уставки напряжения (или допустимую область ее значений).

Выражением (2.5.44) удобно пользоваться, выражая все величины в процентах и принимая номинальное напряжение потребителя за 100%.

При записи этого выражения предполагалось, что асимметрия напряжения отдельных фаз трехфазной системы незначительна, статизм характеристики генератора входит в величину, определяющую точность регулирования его напряжения, а нагрузка генератора — активно-индуктивная. При активно-емкостной нагрузке плюс перед значениями $|\Delta U_{c\ min}|$ и $|\Delta U_{c\ max}|$ заменяется на минус. Остальные величины подставляются в (2.5.44) со своими знаками. Учет асимметрии напряжения и расчет кратковременных отклонений см. в гл. 2.10.

На основании уже приводившихся соображений можно также записать

$$\Delta U_{дл.\ доп.\ в} - \Delta U_{дл.\ доп.\ н} \geqslant |\Delta U_{c\ max} - \Delta U_{c\ min}| + \Delta U_{т.\ в} - \Delta U_{т.\ н} \quad (2.5.45)$$

Это выражение представляет собой необходимое и достаточное условие существования необходимого значения уставки напряжения генератора. Если

неравенство (2.5.45) не удовлетворяется, то это означает, что при данной разности потерь напряжения в сети и точности поддержания напряжения на генераторе невозможно добиться требуемой стабильности напряжения на потребителе.

Приведенные выше выражения написаны для системы с одним потребителем. Наибольшие потери напряжения в сети при этом возникают при максимальной загрузке потребителя, а наименьшие — при минимальной. Эти выражения можно распространить и на группу потребителей, находящихся в равных условиях, т. е. имеющих одинаковые допустимые отклонения напряжения. При этом наибольшая потеря напряжения будет иметь место в режиме наибольшей загрузки

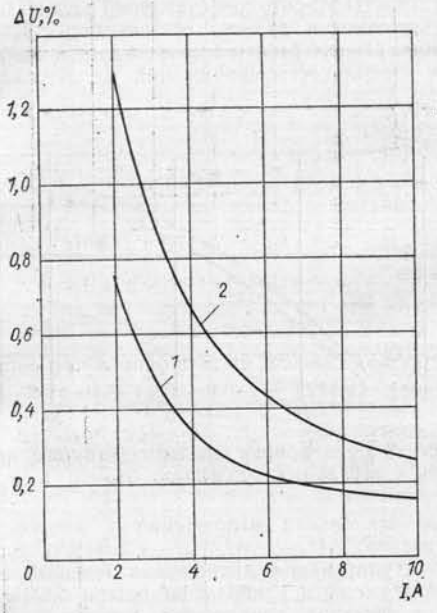



Рис. 2.5.7. Кривые потерь напряжения в автоматических выключателях типа АК50 в сетях с частотой 50 Гц.
*1* — $\cos\varphi = 0{,}9 \div 0{,}65$; $U = 380$ В; *2* — $\cos\varphi = 0{,}9 \div 0{,}65$; $U = 220$ В

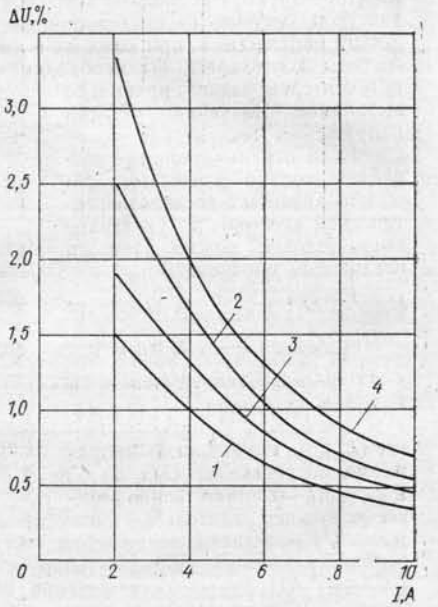



Рис. 2.5.8. Кривые потерь напряжения в автоматических выключателях типа АК50 в сетях с частотой 400 Гц.
*1* — $\cos\varphi = 0{,}9$; $U = 380$ В; *2* — $\cos\varphi = 0{,}9$; $U = 220$ В; *3* — $\cos\varphi = 0{,}65$; $U = 380$ В; *4* — $\cos\varphi = 0{,}65$; $U = 220$ В

системы до наиболее удаленного от генератора потребителя, а наименьшие потери напряжения должны быть определены в режиме минимальной загрузки системы до ближайшего к генератору потребителя. При предварительных расчетах наименьшее значение потери напряжения можно принимать равным нулю. При наличии нескольких ($k$) групп потребителей с одинаковыми допустимыми отклонениями напряжения для потребителей внутри каждой группы выражение типа (2.5.44) должно быть записано для каждой группы, а уставка напряжения генератора определена как решение системы неравенств типа (2.5.44).

Если левую часть выражения (2.5.44) обозначить $A$, а правую $B$, то

$$\begin{aligned} A_1 &\geqslant U_y \geqslant B_1; \\ A_2 &\geqslant U_y \geqslant B_2; \\ &\cdots\cdots\cdots \\ A_n &\geqslant U_y \geqslant B_n. \end{aligned} \qquad (2.5.46)$$



Решение этой системы

$$A_{\min} \geqslant U_y \geqslant B_{\max}, \qquad (2.5.47)$$

где $A_{\min}$ — наименьшее из всех значений $A$; $B_{\max}$ — наибольшее из всех значений $B$.

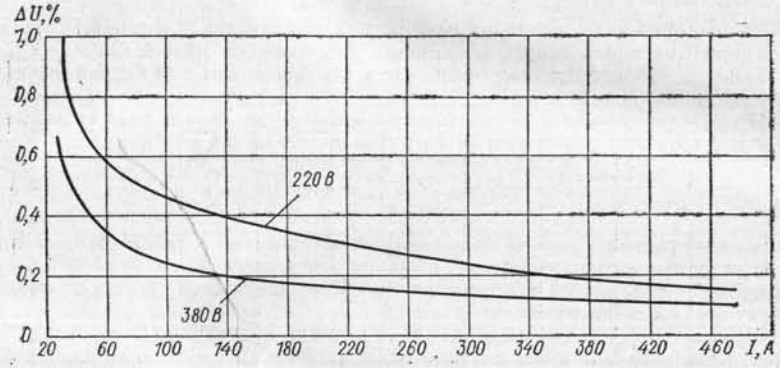



Рис. 2.5.9. Кривые потерь напряжения в автоматических выключателях в сетях с частотой 400 Гц при токах до 450 А.

Из изложенного видно, что допустимость тех или иных потерь напряжения в сети можно оценить только рассматривая систему в целом с учетом возможных режимов ее работы.

С помощью приведенных формул можно решать ряд разнообразных задач, таких, например, как расчет необходимой уставки напряжения генератора, допустимых пределов изменения нагрузки, допустимых потерь напряжения в сети и связанного с этим необходимого сечения кабеля, и др.

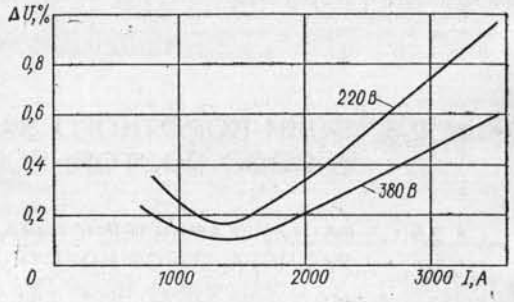



Рис. 2.5.10. Кривые потерь напряжения в автоматических выключателях в сетях с частотой 400 Гц при токах 800—3500 А.

Очевидно, что для выполнения указанных выше расчетов необходимо знать потерю напряжения во всех элементах цепи генератор — потребитель. Кроме кабельных трасс, расчет потерь напряжения в которых изложен выше, имеют значение потери напряжения в трансформаторах и автоматических выключателях. Приведем некоторые данные, необходимые для оценки потерь напряжения в указанных элементах.

Для автоматов типа АК50 с расцепителями на токи 2—10 А величину потери напряжения при токе, равном номинальному току расцепителя $I$, можно оценить по кривым рис. 2.5.7 и 2.5.8. При номинальных токах расцепителей от 10 до 50 А для предварительных оценок можно принять следующие усредненные значения потерь напряжения:

при частоте 50 Гц — 0,1%;
при частоте 400 Гц — 0,25%.

Усреднение значений потерь напряжения произведено в диапазоне напряжений сети 220—380 В и при $\cos\varphi = 0{,}65 \div 0{,}9$. С достаточной точностью приведенные данные можно использовать и для автоматов АК63.

При частоте 50 Гц потерями напряжения в других типах автоматов на токи больше 50 А можно пренебрегать. Как правило, значение их не будет превышать 0,1%.

При частоте 400 Гц о потерях напряжения в автоматах при токах более 50 А можно ориентировочно судить по кривым, приведенным на рис. 2.5.9 и 2.5.10. Все данные о потерях напряжения в автоматах приведены для случая активно-индуктивной нагрузки.

Потеря напряжения в однофазном трансформаторе или в фазе трехфазного трансформатора при симметричной нагрузке определяется по формуле

$$\Delta U\% = \alpha\,(e_{к.\,а}\cos\varphi_2 + e_{к.\,р}\sin\varphi_2), \qquad (2.5.48)$$

где $\alpha$ — коэффициент, равный отношению тока нагрузки к номинальному току; $e_{к.\,а}$ — активная составляющая напряжения короткого замыкания, %; $e_{к.\,р}$ — реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %; $\cos\varphi_2$ — коэффициент мощности нагрузки.

Формула (2.5.48) справедлива при активно-индуктивном характере нагрузки. Если нагрузка имеет активно-емкостный характер, то знак плюс в формуле следует заменить на минус.

Составляющие напряжения короткого замыкания вычисляются по формулам

$$e_{к.\,а} = \frac{P_к}{10S_{ном}}; \qquad (2.5.49)$$

$$e_{к.\,р} = \sqrt{e_к^2 - e_{к.\,а}^2}, \qquad (2.5.50)$$

где $P_к$ — потери мощности в опыте короткого замыкания, Вт; $S_{ном}$ — номинальная мощность трансформатора, кВ·А; $e_к$ — напряжение короткого замыкания, %.

# Глава 2.6. ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЭЭС ПОСТОЯННОГО ТОКА

## § 2.6.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ПОРЯДОК РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Короткие замыкания (к. з.) могут быть как глухими (металлическими), при которых переходное сопротивление и, следовательно, напряжение в местах к. з. практически равны нулю, так и неглухими (через электрическую дугу), при которых напряжение в местах к. з. может быть весьма значительным.

Ниже рассматриваются только глухие к. з.

Примерный процесс изменения тока к. з. генератора без автоматического регулятора напряжения изображен кривой на рис. 2.6.1.

При к. з. ток генератора сначала резко возрастает и за время, приблизительно равное 0,02—0,04 с, достигает максимального значения.

При к. з. на зажимах генератора это значение обычно в 8—12 раз превышает значение номинального тока (если к. з. происходит во внешней цепи, то сопротивление источника питания до места к. з. уменьшает как максимальное значение тока к. з., так и время достижения этого максимума).



Резко увеличившаяся при к. з. реакция якоря уменьшает потокосцепление контура обмотки возбуждения, но ток, возникающий в этом контуре, согласно закону электромагнитной индукции стремится сохранить его потокосцепление неизменным. Поэтому одновременно с ростом тока якоря увеличивается и ток возбуждения, достигая максимального значения, в 2—3 раза превышающего ток возбуждения до момента к. з. Достигнув максимума практически одновременно с током якоря, ток возбуждения начинает затем уменьшаться и через несколько десятых долей секунды после возникновения к. з. снижается до установившейся величины (в частности, при глухом к. з. на зажимах генератора с параллельным или смешанным возбуждением эта величина будет близка к нулю; при к. з. генератора с независимым возбуждением она равна току возбуждения до к. з.).

Одновременно с током возбуждения снижаются ЭДС и ток якоря. Установившаяся величина последнего зависит от способа возбуждения, параметров генератора, сопротивления до точки к. з. и обычно в несколько раз превышает номинальный ток генератора.

Электродвигатели при к. з. практически мгновенно переходят в генераторный режим и служат дополнительными источниками питания места к. з. К моменту, когда ток к. з. достигает максимума, частота вращения двигателя не успевает значительно измениться, поэтому максимальный ток к. з., если измерять его в долях номинального тока двигателя, как и время $t_{max}$, оказывается одного порядка с соответствующими значениями генераторов.

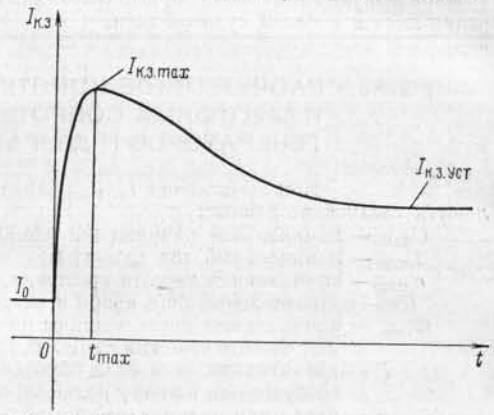



Рис. 2.6.1. Кривая изменения тока якоря генератора постоянного тока при коротком замыкании.

$I_0$ — ток до к. з.; $I_{к.\,з\,max}$, $I_{к.\,з\,уст}$ — соответственно максимальное и установившееся значение тока к. з.; $t_{max}$ — время наступления максимального значения тока к. з.

Однако после достижения максимума ток якоря электродвигателя снижается значительно быстрее, так как электромагнитный момент, возникающий при к. з., действуя совместно с моментом на валу, активно тормозит машину и соответственно уменьшает ее ЭДС.

Для проверки электрооборудования и выбора аппаратов защиты определяются следующие величины: $I_{к.\,з\,max}$, $I_{к.з}$ в момент $t$ срабатывания защиты и интеграл $\int_0^t I_{к.\,з}^2\,d\tau$ за время от начала к. з. до момента $t$.

Расчет производится в следующем порядке:

1) составляют однолинейную расчетную принципиальную схему электроэнергетической системы;

2) выбирают расчетную точку к. з.;

3) вычисляют $I_{к.\,з\,max}$ при глухом к. з. на зажимах генераторов и наиболее мощных двигателей (в последнем случае условно предполагается, что частота вращения двигателей в течение к. з. не меняется);

4) находят фиктивные сопротивления генераторов и двигателей при глухих к. з. на их зажимах;

5) составляют расчетную схему замещения;

6) вычисляют полное расчетное сопротивление, максимальный ток в точке к. з. и максимальные точки к. з. в отдельных ветвях системы.

Однолинейную и расчетную принципиальную схемы составляют в соответствии с одним из основных режимов работы судна, наиболее тяжелым по условиям к. з.

На схеме следует выделить генераторы и те электродвигатели, номинальная мощность которых соизмерима с мощностями отдельных генераторов. При этом указывают номинальные значения их ЭДС и тока. Остальные, относительно маломощные, потребители учитываются как один эквивалентный, ЭДС которого равна напряжению на шинах ГРЩ, а ток — суммарному номинальному току этих электродвигателей в рассматриваемом режиме.

Кроме этого, при составлении расчетной принципиальной схемы указывают установленную коммутационно-защитную аппаратуру, а также количество и сечения шин и кабелей судовой сети.

## § 2.6.2. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И ФИКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ГЕНЕРАТОРОВ И ДВИГАТЕЛЕЙ

При вычислении $I_{к.\,з\,max}$ аналитическим методом исходными являются следующие данные:

$U_{ном}$ — номинальное напряжение машины, В;
$I_{ном}$ — номинальный ток якоря, А;
$n_{ном}$ — номинальная частота вращения, об/мин;
$R_a$ — сопротивление цепи якоря в нагретом состоянии, Ом;
$\Phi_{ном}$ — номинальный поток машины на полюс, создающий при номинальной частоте вращения ЭДС $E_{ном}$, Вб;
$F$ — магнитодвижущая сила обмотки независимого или параллельного возбуждения на пару полюсов, создающая поток $\Phi_{ном}$, А;
$p$ — число пар полюсов машины;
$a$ — число пар параллельных ветвей обмотки якоря;
$\gamma$ — число коллекторных пластин, перекрываемых щеткой;
$e_р$ — реактивная ЭДС секции в номинальном режиме, В;
$w_{н.\,в}$, $a_{н.\,в}$ — число витков на полюс и число параллельных ветвей обмотки параллельного или независимого возбуждения;
$w_{п.\,в}$, $a_{п.\,в}$ — то же обмотки последовательного возбуждения;
$b_к$ — ширина коммутационной зоны, см;
$AS$ — номинальная линейная нагрузка якоря, А/см;
$F_q$ — магнитодвижущая сила, равная размагничивающему действию поперечной реакции якоря в номинальном режиме работы на пару полюсов, А;
$U_в$ — напряжение возбуждения (при параллельном возбуждении $U_в = U_{ном}$), В.

Включение последовательной обмотки возбуждения — согласное или встречное.

Предварительно находят:

а) сопротивления в относительных единицах:
сопротивление обмотки якоря

$$\rho_a = \frac{R_a I_{ном}}{U_{ном}};$$

переходное сопротивление в щеточном контакте при крайне замедленной коммутации

$$\rho_щ = k_к \frac{p}{a} \frac{\gamma e_р}{U_{ном}},$$

где $k_к$ — коэффициент, характеризующий величину магнитного поля в коммутационной зоне (для машин без компенсационной обмотки $k_к = 1$, а с компенсационной обмоткой $k_к = 0{,}8$);



б) постоянную времени (в секундах) цепи обмотки параллельного или независимого возбуждения, обусловленную ее полезным потоком,

$$T_в = 2{,}26 \frac{w_{н.\,в}}{a_{н.\,в}} p \frac{\Phi_{ном}}{U_{ном}};$$

в) отношение магнитодвижущей силы, равной размагничивающему действию реакции якоря при крайне замедленной коммутации, к магнитодвижущей силе $F$

$$k_{р.\,я} = \frac{F_q + b_к AS \pm 2 \frac{w_{п.\,в}}{a_{п.\,в}} I_{ном}}{F};$$

здесь знак плюс перед слагаемым $2 \frac{w_{п.\,в}}{a_{п.\,в}} I_{ном}$ ставится при расчете генератора со встречно, а двигателя — с согласно включенной обмоткой последовательного возбуждения; знак минус — при расчете генератора с согласно, а двигателя — со встречно включенной обмоткой.

После этого находят:

а) вспомогательные величины $A$, $B$, $C$ (соответственно в $с^{-1}$, $с^{-2}$, $с^{-1}$)

$$A = \frac{1}{T_в} + C(\rho_a + \rho_щ + 0{,}11 k_{р.\,я});$$

$$B = \frac{C}{T_в}(\rho_a + \rho_щ + k_{р.\,я});$$

$$C = 0{,}4 p n_{ном};$$

б) декременты затухания цепи якоря $p_a$ и цепи обмотки независимого или параллельного возбуждения $p_в$ (в $с^{-1}$)

$$p_a = \frac{A}{2} + \sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)^2 - B};$$

$$p_в = \frac{A}{2} - \sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)^2 - B};$$

в) переходный ток к. з. в относительных единицах

$$i' = \frac{C}{p_a - p_в};$$

г) расчетный установившийся ток к. з.:
для машин с параллельным возбуждением

$$i_{р.\,уст} = 0;$$

для машин с независимым возбуждением (в относительных единицах)

$$i_{р.\,уст} = \frac{1}{\rho_a + \rho_щ + k_{р.\,я}}.$$

Ток к. з. генератора, работавшего до к. з. в режиме холостого хода, определяется в относительных единицах из выражения

$$i_{к.\,з\,max} = i_{р.\,уст} - i' e^{-p_a t_{max}} + (i' - i_{р.\,уст}) e^{-p_в t_{max}}, \qquad (2.6.1)$$

где $t_{max}$ в секундах определяется по формуле

$$t_{max} = \frac{2{,}3}{p_a - p_в} \lg\left(\frac{p_a}{p_в} \frac{i'}{i' - i_{р.\,уст}}\right).$$

Для получения результата в амперах значение полученного максимального тока $I_{к.\,з\,max}$ в относительных единицах умножается на $I_{ном}$.

Если до к. з. по якорю машины протекал ток $I_0$, то максимальный ток в амперах равен:

для генератора $I_{к.\,з\,max} + I_0$;

для двигателя $I_{к.\,з\,max} - I_0$.

Значение $I_{к.з\,max}$ генератора или двигателя с параллельным или смешанным возбуждением, работавшего до к. з. в режиме холостого хода, можно определять также, пользуясь предварительно рассчитанными вспомогательными кривыми.

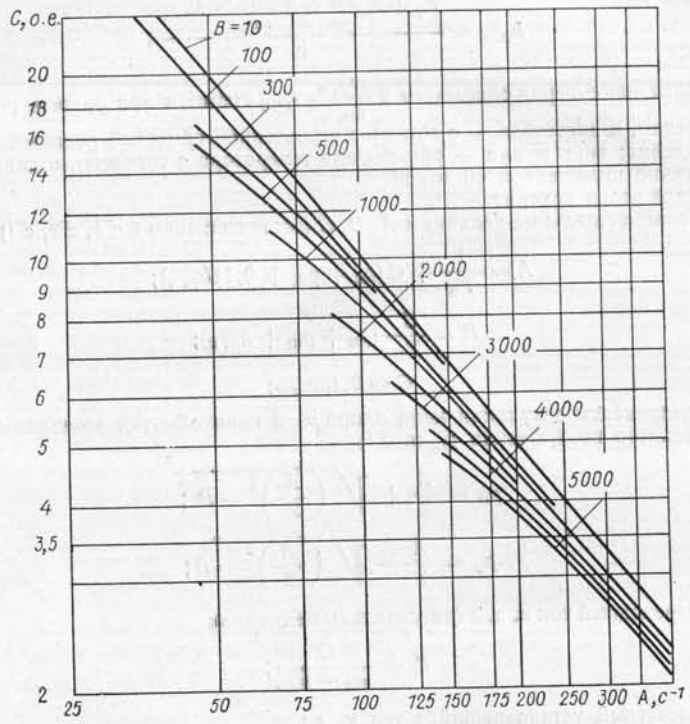



Рис. 2.6.2. Вспомогательные кривые для определения максимального тока к. з. машины с основным параллельным возбуждением.

Зная значения $A$, $B$ по кривым, приведенным на рис. 2.6.2, сначала находят промежуточную величину $I$, после чего вычисляют в относительных единицах

$$I_{к.\,з\,max} = CI \cdot 10^{-3}.$$

Методом вспомогательных кривых можно также пользоваться при определении максимального тока к. з. низковольтных машин (до 320 В) с независимым возбуждением.

При расчете максимального тока к. з. в сети каждый генератор и соизмеримый с ним по мощности электродвигатель заменяют источником ЭДС, которая равна $E_{ном}$ данной машины, с фиктивным внутренним сопротивлением в омах

$$R_ф = \frac{E_{ном}}{I_{к.\,з\,max}}$$



(где ЭДС $E_{ном}$ равна $U_{ном} + I_{ном}R_a + 2$ В для генератора и $U_{ном} - I_{ном}R_a - 2$ В для двигателя), а маломощные двигатели изображают в виде одного эквивалентного источника ЭДС с фиктивным внутренним сопротивлением в омах

$$R_{ф.\,д} = \frac{U_{ном}}{5\sum I_{ном.\,д}},$$

где $\sum I_{ном.\,д}$ — суммарный номинальный ток маломощных двигателей, А.

## § 2.6.3. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЭЭС

Для расчета составляют расчетную схему замещения. На ней генераторы и двигатели замещают эквивалентными источниками ЭДС и фиктивными внутренними сопротивлениями, а остальные элементы электрической сети (кабели, шины, автоматические выключатели и пр.) и переходные сопротивления контактов — эквивалентными сопротивлениями.

При расчете максимальных токов к. з. в судовой сети каждые $n$ ветвей, сходящиеся на расчетной схеме замещения в один узел и имеющие источники ЭДС $E_1$, $E_2$, ..., $E_n$ и сопротивления $R_1$, $R_2$, ..., $R_n$, заменяют одной эквивалентной ветвью с ЭДС и сопротивлением, соответственно равными в вольтах и омах

$$E_{экв} = \frac{\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} + \cdots + \frac{E_n}{R_n}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}}; \qquad (2.6.2)$$

$$R_{экв} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}}, \qquad (2.6.3)$$

С помощью этих формул всю сложную электрическую сеть последовательно приводят к одной эквивалентной ЭДС $E_{экв}$ и полному расчетному сопротивлению $R_{экв}$, после чего максимальный ток в расчетной точке к. з. в амперах находят из выражения

$$I_{к.\,з\,max} = \frac{E_{экв}}{R_{экв}}.$$

Расчет токов к. з. в отдельных ветвях расчетной схемы производится в обратном порядке: сначала определяют напряжение в узле, ближайшем к точке к. з.; через эту величину находят точки в ветвях, сходящиеся в этом узле; затем вычисляют напряжение в следующем узле и т. д.

Ток к. з. генератора, работавшего до короткого замыкания в режиме холостого хода, в момент $t$ срабатывания защиты определяют (в относительных единицах) по формуле

$$i_{к.\,з} = (i' - i_{к.\,з.\,уст})\, e^{-p_в t} + i_{к.\,з.\,уст}; \qquad (2.6.4)$$

при расчете генератора с параллельным возбуждением установившийся ток к. з. $i_{к.\,з.\,уст}$ считается равным $\frac{1}{6\rho_a}$ о. е., если последовательная обмотка возбуждения включена согласно с параллельной, и равным нулю, если эта обмотка включена встречно; при расчете генератора с независимым возбуждением

$$i_{к.\,з.\,уст} = \frac{1}{\rho_a + k_{р.\,я.\,уст}},$$

где

$$k_{р.\,я.\,уст} = \frac{F_q \pm 2\frac{w_{п.\,в}}{a_{п.\,в}} I_{ном}}{F};$$

Знак перед слагаемым $2\frac{w_{п.в}}{a_{п.в}} I_{ном}$ выбирается по правилу, применявшемуся при нахождении $k_{р.я}$ (см. § 2.6.2).

Если до короткого замыкания по якорю протекал ток $I_0$, то ток к. з. в амперах в момент времени $t$ равен $i_{к.з} I_{ном} + I_0$.

Проверку селективных автоматических выключателей и фидеров на термическую стойкость производят по условию

$$\int_0^t I^2_{к.з}\, d\tau \leqslant (I^2 t)_{доп}, \qquad (2.6.5)$$

где $(I^2t)_{доп}$ — допустимая величина термической стойкости, принимаемая по заводским данным, $А^2 \cdot с$; $t$ — время срабатывания защиты, с.

Для упрощения проверки рекомендуется сначала принять левую часть выражения (2.6.5) равной $I^2_{к.з\,max} t$, так как часто и при таком завышенном значении аппаратура удовлетворяет требованиям в отношении термической стойкости. Если неравенство (2.6.5) при этом не выполняется, интеграл вычисляют по приближенной формуле

$$\int_0^t I^2_{к.з}\, d\tau = I^2_{ном} i^2_{к.з.уст} t \left[1 + \left(\frac{i'}{i_{к.з.уст}} - 1\right) k_t\right]. \qquad (2.6.6)$$

Коэффициент $k_t$ находят из выражения

$$k_t = 2\frac{1 - e^{-p_в t}}{p_в t}.$$

Если по рассматриваемому участку сети в режиме к. з. протекает ток от нескольких источников питания, то $I_{к.з}$ в момент времени $t$ и интеграл $\int_0^t I^2_{к.з}\, d\tau$ определяют с помощью (2.6.4) и (2.6.5). При этом величины $i'$ и $i_{к.з.уст}$ находят с помощью формул (2.6.2) и (2.6.3), используя вместо фиктивных внутренних сопротивлений генераторов $R_ф$ величины (в омах)

$$R'_ф = \frac{E_{ном}}{i' I_{ном}}$$

и

$$R_{ф.уст} = \frac{E_{ном}}{i_{к.з.уст} I_{ном}}$$

соответственно.

Если генераторы имеют разные значения декремента затухания $p_в$, то в формулы (2.6.4) и (2.6.5) подставляется минимальное из них.

**Пример 1.** Рассчитать максимальный ток к. з. на зажимах генератора.

Исходные данные: $U_{ном} = 400$ В; $I_{ном} = 1560$ А; $n_{ном} = 810$ об/мин; $R_a = 0{,}006\,52$ Ом; $Ф_{ном} = 2{,}48 \cdot 10^{-2}$ Вб; $F = 14\,800$ А; $p = 4$; $a = 4$; $\gamma = 4{,}35$; $e_р = 3{,}6$ В; $w_{н.в} = 410$; $a_{н.в} = 1$; $w_{п.в} = 1$; $a_{п.в} = 8$; $b_к = 6{,}1$ см; $AS = 440$ А/см; $F'_д = 1600$ А; $U_в = 220$ В.

В генераторе обмотка последовательного возбуждения включена встречно по отношению к обмотке независимого возбуждения.

Расчет:

$$\rho_a = \frac{6{,}52 \cdot 10^3 \cdot 1{,}56 \cdot 10^{-3}}{400} = 0{,}025\,4 \text{ о. е.};$$

$$\rho_щ = 1\frac{4}{4}\frac{4{,}35 \cdot 3{,}6}{400} = 0{,}039\,1 \text{ о. е.};$$

$$T_в = 2{,}26\frac{410}{1}\,4\,\frac{2{,}48 \cdot 10^{-2}}{400} = 0{,}418 \text{ с};$$



$$k_{р.я} = \frac{1600 + 6{,}1 \cdot 440 + 2 \cdot \frac{1}{8} \cdot 1560}{14\,800} = 0{,}315;$$

$$C = 0{,}4 \cdot 4 \cdot 810 = 1300 \text{ с}^{-1};$$

$$A = \frac{1}{0{,}418} + 1300\,(0{,}025\,4 + 0{,}039\,1 + 0{,}11 \cdot 0{,}315) = 131 \text{ с}^{-1};$$

$$B = \frac{1300}{0{,}418}\,(0{,}025\,4 + 0{,}039\,1 + 0{,}315) = 1180 \text{ с}^{-2};$$

$$p_a = 65{,}5 + \sqrt{65{,}5^2 - 1180} = 121 \text{ с}^{-1};$$

$$p_b = 65{,}5 - \sqrt{65{,}5^2 - 1180} = 9{,}7 \text{ с}^{-1};$$

$$i' = \frac{1300}{121 - 9{,}7} = 11{,}6 \text{ о. е.};$$

$$i_{р.уст} = \frac{1}{0{,}0254 + 0{,}0391 + 0{,}315} = 2{,}63 \text{ о. е.};$$

$$t_{max} = \frac{2{,}3}{121 - 9{,}7} \lg\left(\frac{121}{9{,}7} \cdot \frac{11{,}6}{11{,}6 - 2{,}63}\right) = 0{,}025 \text{ с};$$

$$i_{к.з\,max} = 2{,}63 - 11{,}6e^{-121 \cdot 0{,}025} + (11{,}6 - 2{,}63)\, e^{-9{,}7 \cdot 0{,}025} = 9{,}1 \text{ о. е.}$$

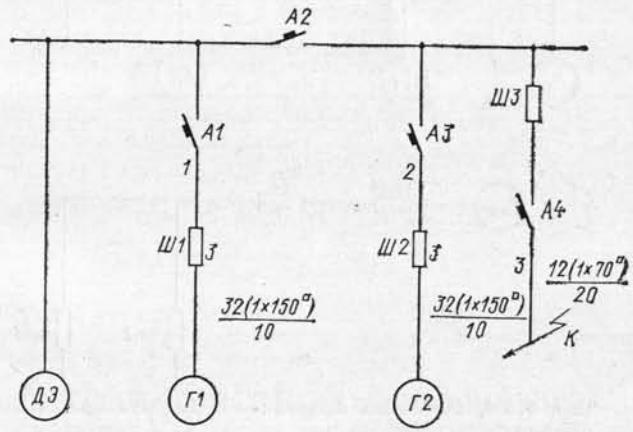



Рис. 2.6.3. Расчетная принципиальная схема электроэнергетической системы.

**Пример 2.** Рассчитать максимальный ток к. з. в судовой сети постоянного тока.

Расчетная принципиальная схема электроэнергетической системы приведена на рис. 2.6.3. На этой схеме:

*Г1, Г2* — генераторы типа ГПМ5 ($E_{ном} = 239$ В, $I_{ном} = 2180$ А, $R_ф = 7{,}7$ мОм);

*ДЭ* — эквивалентный двигатель ($U_{ном} = 220$ В; $\sum I_{ном.д} = 3300$ А, $R_ф = 13{,}3$ мОм);

*А1, А2, А3* — автоматические выключатели типа АМ25 ($R_{А1} = R_{А2} = R_{А3} = 0{,}03$ мОм);

$A4$ — автоматический выключатель типа А3340 ($R_{A4} = 0{,}192$ мОм);

$Ш1$, $Ш2$ — шунты типа 75ШСМ3000 ($R_{Ш1} = R_{Ш2} = 0{,}025$ мОм);

$Ш3$ — шунт типа 75ШСМ750 ($R_{Ш3} = 0{,}1$ мОм).

Кабельная трасса на участках *1* и *2* состоит из 16 одножильных кабелей на полюс сечением 150 мм² и длиной 10 м. Кабельная трасса на участке *3* состоит из шести одножильных кабелей на полюс сечением 70 мм² и длиной 20 м. Сопротивление 1 м кабельной линии на один полюс составляет: для участков *1* и *2* $\rho = 0{,}009$ мОм; для участка *3* $\rho = 0{,}0515$ мОм. Сопротивления кабельных участков на два полюса равны

$$R_{каб\,1} = R_{каб\,2} = 2\rho l = 2 \cdot 0{,}009\ 10 = 0{,}18 \text{ мОм};$$

$$R_{каб\,3} = 2 \cdot 0{,}515 \cdot 20 = 2{,}06 \text{ мОм}.$$

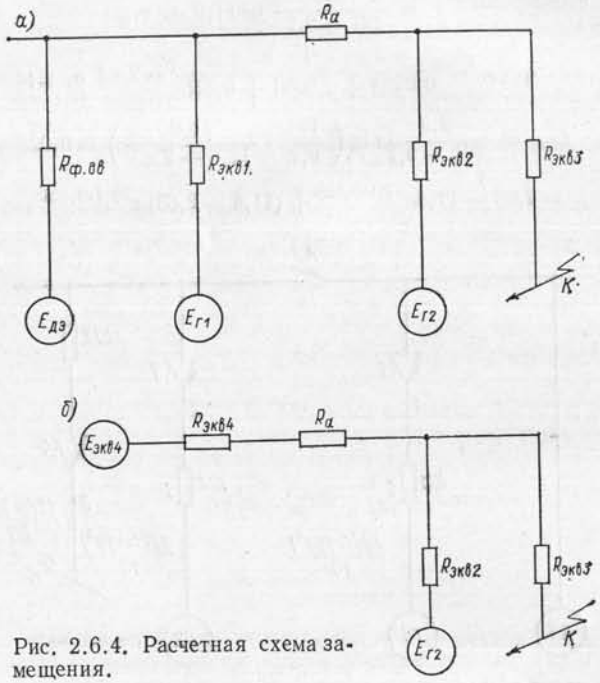



Рис. 2.6.4. Расчетная схема замещения.

Переходные сопротивления (кабель — кабель, кабель — шина и др.) определяются путем подсчета общего количества контактных соединений на данном участке, а общее переходное сопротивление участка находится как сумма всех переходных сопротивлений.

Пусть на участках *1—3* имеется по 12 соединений на два полюса. Для кабеля сечением 150 мм² переходное сопротивление одного контакта равно 0,064 мОм, для кабеля сечением 70 мм — 0,11 мОм. Суммарные переходные сопротивления контактов на участках *1—3*:

$$R_{пер\,1} = R_{пер\,2} = \frac{0{,}064 \cdot 12}{16} = 0{,}048 \text{ мОм};$$

$$R_{пер\,3} = \frac{0{,}11 \cdot 12}{6} = 0{,}22 \text{ мОм}.$$



С учетом всех указанных выше значений сопротивлений расчетная схема электроэнергетической системы (см. рис. 2.6.3) может быть изображена в виде, приведенном на рис. 2.6.4, *а*, где

$$R_{экв\,1} = R_{экв\,2} = R_{A1} + R_{Ш1} + R_{пер\,1} + R_{каб\,1} + R_{ф1} =$$

$$= 0{,}03 + 0{,}025 + 0{,}048 + 0{,}18 + 7{,}7 = 7{,}98 \text{ мОм};$$

$$R_{экв\,3} = R_{Ш3} + R_{A3} + R_{пер\,3} + R_{каб\,3} = 0{,}1 + 0{,}192 + 0{,}22 + 2{,}06 = 2{,}57 \text{ мОм}.$$

Ветви с источниками ЭДС $E_{Г1}$ и $E_{Дэ}$ замещаются одной эквивалентной ветвью (рис. 2.6.4, *б*) с источником ЭДС

$$E_{экв\,4} = \frac{E_{Г1}R_{ф.д} + E_{Дэ}R_{экв\,1}}{R_{ф.д} + R_{экв\,1}} = \frac{239 \cdot 13{,}3 + 220 \cdot 7{,}98}{13{,}3 + 7{,}98} = 232 \text{ В}$$

и эквивалентным сопротивлением

$$R_{экв\,4} = \frac{R_{ф.д}R_{экв\,1}}{R_{ф.д} + R_{экв\,1}} = \frac{13{,}3 \cdot 7{,}98}{13{,}3 + 7{,}98} = 4{,}98 \text{ мОм}.$$

В свою очередь ветви с источниками $E_{экв4}$ и $E_{экв2}$ замещаются эквивалентным источником ЭДС

$$F_{экв} = \frac{E_{экв\,4}R_{экв\,2} + E_{Г2}(R_{экв\,4} + R_a)}{R_{экв\,2} + R_{экв\,4} + R_a} =$$

$$= \frac{232 \cdot 7{,}98 + 239\,(4{,}98 + 0{,}03)}{7{,}98 + 4{,}98 + 0{,}03} = 235 \text{ В}.$$

Общее эквивалентное сопротивление цепи к. з. составляет

$$R_{экв} = \frac{R_{экв\,2}(R_{экв\,4} + R_a)}{R_{экв\,2} + R_{экв\,4} + R_a} + R_{экв\,3} =$$

$$= \frac{7{,}98\,(4{,}98 + 0{,}03)}{7{,}98 + 4{,}98 + 0{,}03} + 2{,}57 = 5{,}65 \text{ мОм}.$$

Максимальный ток к. з. в точке $K$ равен

$$I_{к.\,з\,max} = \frac{E_{экв}}{R_{экв}} = \frac{235}{5{,}65 \cdot 10^{-3}} = 41\,600 \text{ А}.$$

## Глава 2.7. ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЭЭС ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В данной главе рассматриваются методы расчета максимальных токов короткого замыкания (к. з.) для проверки электрооборудования на их воздействие.

Процесс к. з. в СЭЭС — сложное явление, которое ввиду малых длин электрических связей в судовых системах воздействует на значительную часть оборудования судна. Длительность к. з. мала и обычно не превышает 1 с. Однако к. з. могут вызывать такие опасные для элементов и для всей системы последствия, как:

— разрушение электрооборудования и даже пожар в месте к. з. из-за воздействия электрической дуги;

— повреждение электрооборудования (электрических машин, аппаратов, кабелей, распределительных устройств) в результате электродинамического (механического) и теплового действия токов в цепи к. з.;

— разрушение электрических аппаратов, отключающих токи к. з., из-за недостаточной предельной коммутационной способности;
— ложные срабатывания защитных устройств;
— появление в месте к. з. относительно устойчивой электрической дуги, ограничивающей токи до малых величин, при которых не срабатывает защита;
— сильное снижение напряжения, нарушение устойчивости параллельной работы генераторов, устойчивости нагрузки и т. д.

Для оценки и исключения возможных опасных воздействий токов на электрические системы, а также для разработки мероприятий по обеспечению правильной работы электрической защиты необходимо при проектировании системы и ее элементов определять различные величины, характеризующие токи к. з.

Благодаря правильному расчету и соответствующему учету токов при проектировании и эксплуатации электроэнергетических систем достигается повышение их надежности. Ошибки в оценке возможных токов приводят к тяжелым авариям или неоправданно высоким затратам, завышенным габаритам и увеличению массы оборудования.

Знание возможных токов к. з. обеспечивает решение таких ответственных задач проектирования и эксплуатации СЭЭС, как:
— выбор номинального напряжения;
— выбор системы генерирования и распределения электроэнергии;
— определение максимально допустимой суммарной мощности генераторов, работающих параллельно в длительном режиме, исходя из коммутационной способности имеющихся автоматических выключателей;
— проверка и выбор электрических аппаратов и других элементов системы по коммутационной способности, динамической и термической устойчивости;
— расчет электродинамических сил, действующих на токоведущие части;
— выбор токоограничивающих устройств;
— разработка системы защиты;
— выбор режимов использования системы, настройка защиты и т. д.

Расчеты токов к. з. необходимы также для решения задач синтеза СЭЭС, связанных с выявлением и согласованием параметров генераторов, автоматических выключателей и других элементов, обеспечивающих повышение эффективности создания и функционирования СЭЭС.

Для исследования процессов к. з. в СЭЭС находят применение как методы, благодаря которым достаточно подробно учитывается влияние ее основных элементов и структуры и достигается повышенная точность расчетов, так и методы, обеспечивающие обобщенный учет состава СЭЭС и упрощенный расчет процесса к. з. Исследование процессов к. з. путем использования точных аналитических методов и расчетов на ЦВМ с применением сложных математических моделей СЭЭС не всегда целесообразно и возможно. В практических расчетах на определенных стадиях разработок СЭЭС часто нет необходимости или возможности учитывать все факторы, заметно влияющие на процесс. В этом случае прибегают к различным приближенным инженерным методам расчета. Оптимальный результат дает применение тех или иных методов в зависимости от задач и условий расчетов.

К основным особенностям судовых систем, оказывающим существенное влияние на процесс к. з., необходимо отнести:

1) относительно низкие номинальные напряжения, большие мощности генераторов и использование параллельной работы. Следствием этого являются большие номинальные токи в системе и большие абсолютные величины токов к. з.;

2) малые сопротивления цепей к.з. при малых длинах кабелей больших сечений и отсутствии трансформаторов. Это приводит к большим кратностям токов к. з. по отношению к номинальным токам цепей;

3) преимущественно асинхронная нагрузка и близость асинхронной нагрузки к ГРЩ. Это вызывает сильное увеличение токов к. з. под влиянием подпитки от асинхронных двигателей;

4) большие активные сопротивления кабельных линий. Активные сопротивления оказывают значительное влияние на величину полного сопротивления цепей и на постоянные времени процесса к. з., а через них и на значения токов;



5) относительно малые постоянные времени электромагнитных процессов генераторов и возможность относительно большого затухания периодической составляющей тока генераторов уже к моменту наступления ударного тока.

Методы расчета токов береговых электроэнергетических систем, основанные на пренебрежении активными сопротивлениями и затуханием периодической составляющей тока, оказываются неприемлемыми для судовых систем;

6) большие изменения суммарной номинальной мощности генераторных установок и асинхронной нагрузки в различных режимах и соответственно значительные изменения тока к. з. в зависимости от номинальной мощности генераторов и двигателей в начальном режиме. Чрезмерно большие токи к. з. в отдельных режимах могут служить препятствием к их использованию.

Для СЭЭС опасны как чрезмерно большие токи к. з., так и малые токи к. з., при которых может не срабатывать защита;

7) возможность больших различий постоянных времени обмоток возбуждения генераторов, работающих параллельно;

8) близость в некоторых случаях максимальных токов к. з. к предельно допустимым для электрических аппаратов. Это может приводить к необходимости использования для СЭЭС уточненных методов расчета токов к. з.;

9) увеличение индуктивного сопротивления кабелей под влиянием стальных переборок, большой нагрев и увеличение активного сопротивления кабелей при к. з. и т. д.

Указанные особенности судовых систем необходимо учитывать при расчете токов к. з.

Наиболее тяжелыми в отношении электродинамического и теплового воздействия на СЭЭС являются симметричные трехфазные металлические к. з. Поскольку нейтрали генераторов в отечественных судовых системах обычно не заземляются, к. з. не могут быть однофазными. Двухфазные к. з. на кабелях обычно быстро перерастают в трехфазные. Поэтому при расчетах токов к. з. для проверки электрооборудования учитываются и соответственно в данной главе рассматриваются только трехфазные симметричные металлические к. з., как наиболее тяжелые из возможных в СЭЭС.

Токоограничивающее действие электрической дуги учитывается по специальным нормативам при проверке чувствительности защиты.

## § 2.7.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТОВ И ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

**Расчетный режим.** Проверка электрооборудования производится по наиболее тяжелому (максимальному) в отношении токов к. з. режиму СЭЭС при работе собственных генераторов. Наиболее тяжелому режиму соответствует наибольшая суммарная номинальная мощность генераторов, длительно работающих параллельно, наибольшая суммарная номинальная мощность продолжительно работающей асинхронной нагрузки и наибольшая начальная нагрузка генераторов. Кратковременные режимы параллельной работы генераторов при переводе нагрузки не учитываются.

**Расчетная схема (принципиальная расчетная схема).** Это упрощенная однолинейная принципиальная схема расчетного режима СЭЭС. В расчетную схему включают:
— источники питания, работающие параллельно в рассматриваемом режиме;
— асинхронную нагрузку в виде одного или нескольких эквивалентных двигателей и отдельных двигателей большой мощности;
— токопроводы, аппараты, трансформаторы и реакторы, связывающие источники питания и асинхронную нагрузку с местом к. з. и между собой.

На расчетной схеме рекомендуется указывать тип, номинальную мощность и напряжение источников питания; тип и номинальный ток коммутационных аппаратов; тип, число, сечения и длины токопроводов, основные технические данные эквивалентных двигателей и других элементов.

Общая номинальная мощность на валу эквивалентных двигателей $P_{дв}$ принимается равной сумме номинальных мощностей двигателей, длительно работающих в расчетном режиме. При отсутствии данных мощность эквивалентного двигателя на валу $P_{дв}$ считают равной 0,75 суммарной мощности параллельно работающих генераторов $P_{\Sigma г}$. Общий эквивалентный двигатель обычно принимается подключенным к ГРЩ.

**Расчетные точки к. з.** Эти точки выбирают таким образом, чтобы токи, протекающие через проверяемые аппараты и токопроводы, имели наибольшие значения. Так, например, для проверки аппаратов и токопроводов фидеров и перемычек, отходящих от ГРЩ и РЩ, расчетную точку к. з. следует принимать на выходных клеммах их автоматических выключателей. Обычно рассматривают только металлические к. з. без переходных сопротивлений в месте к. з. Однако для судов, поднадзорных Регистру СССР, разрешается учитывать в месте к. з. добавочное сопротивление $R_{доб}$, отражающее токоограничивающее действие электрической дуги. Значения $R_{доб}$ на фазу цепи определяют по сечению кабелей фидера в соответствии с графиками, приведенными на рис. 2.7.1.

В отдельных случаях используют другие нормы. Так, например, для перемычек и фидеров, отходящих от распределительных щитов, расчетную точку при металлическом к. з. иногда допускается принимать в 10 м от щита. Для фидеров отсечных и групповых щитов СЭЭС малой мощности это расстояние уменьшают до 5 м.

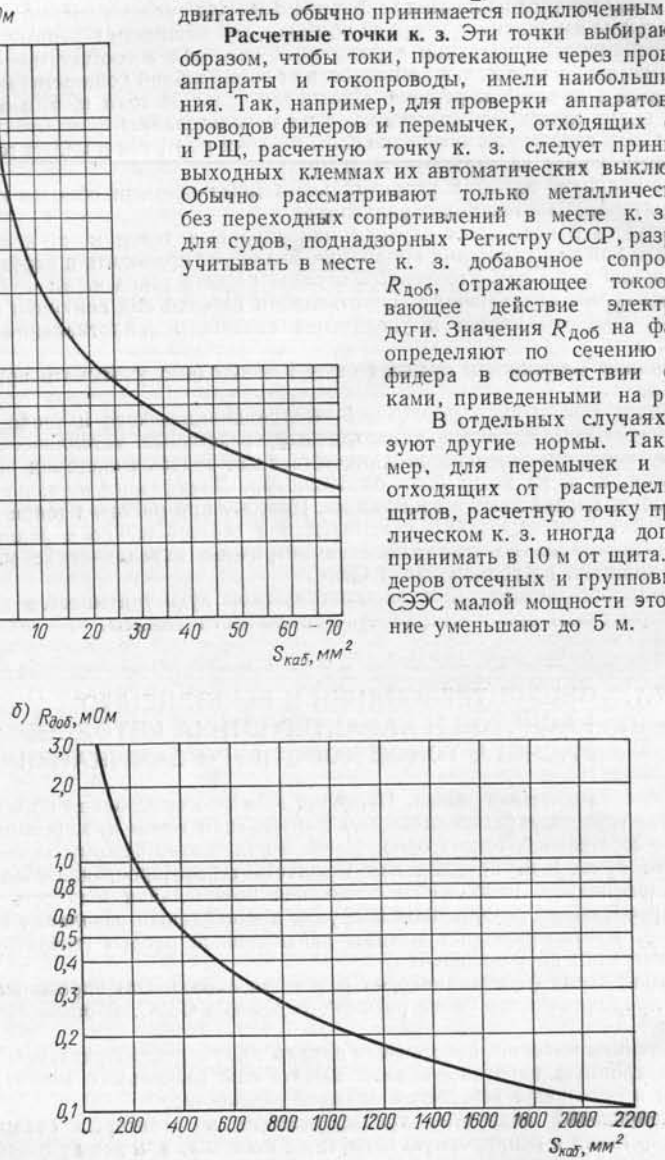



Рис. 2.7.1. Зависимости добавочного сопротивления $R_{доб}$ от суммарного сечения кабелей $S_{каб}$, изменяющегося от 0 до 70 мм² (*а*) и от 70 до 2200 мм² (*б*).



**Схема замещения (расчетная схема замещения).** Схему составляют на основе расчетной схемы и выполняют в однолинейном изображении. В схеме замещения элементы принципиальной расчетной схемы (в общем случае генераторы, кабели, шины, аппараты, их контакты, трансформаторы, реакторы, а также двигатели) замещают источниками ЭДС, активными и индуктивными сопротивлениями на фазу. Расчеты токов к. з. могут вестись как в относительных, так и в физических (именованных) единицах. Для суммирования сопротивлений с целью последующего вычисления полного сопротивления цепей составляющие сопротивлений всех элементов, кроме асинхронных двигателей, должны быть приведены к физическим или общим относительным единицам. При расчете в физических единицах сопротивления элементов, включенных через трансформаторы, должны быть приведены к основному напряжению.

Активные сопротивления генераторов принято задавать при рабочей температуре, а всех других элементов — при 75° С с вычислением их по формуле

$$r_{75} = r_t\,[1 + 0{,}004\,(75 - t)].$$

Сопротивления проверяемых автоматических выключателей, кроме выключателей серий АМ, АД и аналогичных им, в схему не включают. Разрешается пренебрегать сопротивлениями автоматических выключателей на токи более 1000 А, переходными сопротивлениями контактов и сопротивлениями трансформаторов тока. Они могут быть учтены в случае необходимости расчета уточненных значений тока. Участки токопроводов в виде шин имеют относительно большие индуктивные сопротивления, и их при возможности следует учитывать. В расчетах токов на стадии эскизного проектирования учитывают только сопротивления генераторов, двигателей и кабелей. Для каждой из ветвей схемы замещения вычисляют отдельно суммарные активные и индуктивные сопротивления для последующего эквивалентирования.

**Базисные единицы.** При использовании относительных единиц в качестве базисных часто применяют номинальные базисные единицы, которые определяются по номинальным данным фактических и эквивалентных элементов системы. Номинальные базисные единицы, как правило, задают и используют для этих же конкретных элементов. В качестве общих базисных единиц для всей системы могут применяться произвольные единицы. Однако для расчета токов к. з. в качестве таковых обычно используют номинальные базисные единицы эквивалентного генератора, замещающего все генераторы системы, включенные в расчетном режиме на параллельную работу:

базисную мощность в киловольт-амперах, равную суммарной номинальной полной мощности генераторов системы:

$$S_б = \sum_{i=1}^{n} S_{ном\,i};$$

базисное напряжение в вольтах, равное номинальному линейному напряжению генераторов (для I ступени трансформации напряжения):

$$U_б = U_{ном};$$

базисный ток в килоамперах, определяемый базисными мощностью и напряжением:

$$I_б = \frac{S_б}{\sqrt{3}U_б},$$

а при одинаковом номинальном напряжении генераторов — суммой номинальных токов генераторов (для I ступени трансформации напряжения):

$$I_б = \sum_{i=1}^{n} I_{ном\,i};$$

базисное сопротивление в миллиомах

$$Z_б = \frac{U_б}{\sqrt{3} I_б} = \frac{U_б^2}{S_б}.$$

При произвольной системе базисных единиц любыми могут быть заданы только две базисные единицы. При расчетах можно задавать также $S_б$ в вольт-амперах и $U_б$ в вольтах. Тогда соответственно значение $I_б$ выражается в амперах и $Z_б$ — в омах. Следует заметить, что в том и другом случае базисное напряжение выражается в вольтах.

Перевод полного сопротивления из физических единиц в относительные производится по уравнению

$$z = \frac{Z}{Z_б}.$$

Перевод сопротивлений, заданных в процентах при $I_{ном}$ и $U_{ном}$, в общие относительные единицы обеспечивается с помощью уравнения

$$z = \frac{z_{(ном)}\%}{100} \frac{Z_{б\,(ном)}}{Z_б} \text{ или } z = \frac{z_{(ном)}\%}{100} \frac{I_б U_{ном}}{I_{ном} U_б}.$$

Перевод сопротивлений, заданных в номинальных относительных единицах при $S_{ном}$ и $U_{ном}$, в общие относительные единицы осуществляется по уравнению

$$z = z_{(ном)} \frac{S_б U_{ном}^2}{S_{ном} U_б^2}.$$

При $U_{ном} = U_б$ в последнем случае

$$z = z_{(ном)} \frac{S_б}{S_{ном}} \text{ или } z = z_{(ном)} \frac{I_б}{I_{ном}}.$$

С помощью аналогичных уравнений производится перевод активных и индуктивных сопротивлений.

При наличии в цепях ЭЭС трансформаторов для каждой ступени трансформации, на которой находится элемент схемы, подлежащий приведению к общей I ступени напряжения и общим базисным единицам, используются свои базисные напряжения, ток и сопротивление. В этом случае общие базисные единицы, указанные ранее, следует считать заданными для I ступени трансформации. Эти базисные единицы и коэффициенты трансформации однозначно определяют базисные единицы на остальных ступенях схемы.

При составлении схемы замещения может быть использована следующая исходная информация, приведенная в настоящем справочнике:

1) *параметры генераторов* по данным табл. 1.1.2 второго тома;

2) *активные и индуктивные сопротивления кабелей и их разделки* по данным табл. 2.5.10, 2.5.14, 2.5.15;

3) *переходные сопротивления кабельных наконечников и сопротивления аппаратов* по табл. 5.2.23—5.2.25 второго тома,

4) *сопротивления токовых катушек автоматических выключателей* по заводским данным на аппараты;

5) сопротивления трехфазных силовых трансформаторов в их номинальных относительных единицах вычисляются по формулам

$$z_{т\,(ном)} = u_к\%/100; \quad r_{т\,(ном)} = P_к/S_{ном.\,т};$$

$$x_{т\,(ном)} = \sqrt{z_{т\,(ном)}^2 - r_{т\,(ном)}^2},$$

где $u_к\%$ — напряжение короткого замыкания, %; $P_к$ — потери короткого замыкания, Вт; $S_{ном.\,т}$ — номинальная мощность трансформатора, В·А.

При $P_к$ в процентах $r_{т\,(ном)} = P_к\%/100$.



Значения $u_к$ и $P_к$ для судовых трансформаторов определяются по табл. 1.3.4 и 1.3.6 второго тома.

**Эквивалентные схемы замещения.** Обычно для расчета токов к. з. схему замещения с несколькими генераторами, работающими на общую узловую точку, приводят к простейшему виду с одним эквивалентным генератором путем замены нескольких генерирующих ветвей одной эквивалентной. Используется также и другой метод эквивалентирования, при котором система разделяется на несколько эквивалентных подсистем с генераторами, работающими на независимые цепи к. з. Оба метода эквивалентирования изложены в § 2.7.3.

Полное сопротивление $z_\Sigma$ контура к. з., составленного из эквивалентного генератора и цепи к. з. эквивалентной схемы замещения, выраженное в физических или произвольных относительных единицах, называют результирующим сопротивлением. Расчетным сопротивлением $z_{расч}$ называют результирующее полное сопротивление, приведенное к номинальным базисным единицам генератора рассматриваемой эквивалентной схемы замещения.

**Характеристика существующих методов расчета токов к. з.** Метод расчета токов к. з. по дифференциально-алгебраическим уравнениям (см. § 2.7.10) позволяет с необходимой степенью детализировки отображать в математической модели процесса к. з. конкретный состав и структуру СЭЭС, учитывать влияние существенных факторов и, следовательно, обеспечивает наиболее детальное и точное описание процесса к. з. Метод находит широкое применение только при использовании ЦВМ. АВМ используются для приближенного исследования процессов к. з. в системах с простейшими структурами. Для расчетов по данному методу требуется наибольшее количество исходных данных, их тщательное согласование между собой, а также наличие отлаженных алгоритмов и программ или соответствующая их разработка.

Метод используется при исследовании и проектировании ответственных нетипичных СЭЭС с генераторами большой мощности, в системах автоматического проектирования, а также при разработке расчетных кривых и в научных исследованиях.

Метод расчетных кривых (см. § 2.7.8) обеспечивает при большом количестве расчетных точек к. з. заданной ЭЭС значительное упрощение расчетов и уменьшение их трудоемкости. Определение токов к. з. по этому методу производится на основе заранее рассчитанных кривых в виде зависимостей значений токов в заданные моменты времени от сопротивления контура к. з. Сами кривые рассчитываются с помощью ЦВМ на основе дифференциально-алгебраических или алгебраических уравнений процесса к. з. в СЭЭС и используются в виде альбомов кривых или отдельных графиков. Следует различать стандартные и специальные расчетные кривые.

*Стандартные расчетные кривые* разрабатываются применительно к СЭЭС с простейшей типовой эквивалентной структурой, при типовом их составе и усредненных или фактических параметрах элементов. В результате расчеты токов по стандартным кривым требуют минимального количества исходных данных, но оказываются приближенными. Стандартные кривые применяются в основном на стадии технического проектирования при массовых расчетах токов в типовых СЭЭС с серийными генераторами.

*Специальные расчетные кривые* разрабатываются для конкретных СЭЭС с учетом специфики их состава, структуры и параметров. Это обеспечивает значительное повышение точности расчетов по кривым. Высокая эффективность и универсальность использования таких расчетных кривых достигается путем автоматизации их расчета и построения.

Уточненный аналитический метод (см. § 2.7.4—2.7.7) основан на полных алгебраических уравнениях, описывающих процесс к. з. в электрических машинах и электроэнергетических системах; пригоден для расчетов токов к. з. в СЭЭС с относительно простой структурой, которые без большой погрешности приводятся к схеме замещения с одной узловой точкой; обеспечивает уточненный расчет отдельных значений токов и всего процесса изменения токов; позволяет оценивать влияние основных факторов на процесс к. з.

При ручных расчетах уточненный аналитический метод в полном виде достаточно трудоемок, но в связи с широким распространением электронных клавишных машин и ЦВМ он находит все большее применение в основном при отсутствии или недопустимости использования расчетных кривых.

Благодаря алгоритмам и программам, разработанным для ЦВМ на основе данного метода к настоящему времени, можно получать с крайне малой затратой времени достаточно точные специальные расчетные кривые токов к. з. конкретных СЭЭС.

Упрощенный аналитический метод (см. § 2.7.9) основан на ряде допущений, сокращающих и упрощающих расчеты токов по алгебраическим уравнениям при обеспечении приемлемой в большинстве случаев точности расчета. Он широко используется в проектировании при отсутствии или недопустимости использования расчетных кривых для СЭЭС с заданными генераторами, а также в процессе испытаний и лабораторных исследований.

Способы грубой оценки токов к. з. обеспечивают ориентировочное определение максимально возможных значений токов к. з., позволяют быстро оценивать ситуации, связанные с процессами к. з. Они используются при исследованиях процесса к. з. в лабораториях и на натурных установках, при оценке необходимости проведения расчетов токов для конкретной СЭЭС.

Используются следующие способы грубой оценки токов к. з.:

1. В простейшем случае при неизвестных параметрах значения токов при к. з. вблизи ГРЩ можно ориентировочно оценивать по ожидаемой кратности ударных токов от генераторов и двигателей:

а) кратность ударного тока к. з. судовых генераторов достигает примерно 23 от номинального действующего значения тока генератора;

б) кратность ударного тока к. з. судовых эквивалентных двигателей достигает примерно 8 от их номинального действующего значения.

2. При к. з. вблизи ГРЩ токи можно оценивать по простейшим приближенным уравнениям, полученным в предположении к. з. с холостого хода системы и не требующим большой затраты времени.

Ударный ток к. з. эквивалентного генератора определяют по уравнению (см. § 2.7.2, 2.7.9)

$$i_{\text{уд. г}} = p\sqrt{2}\,\frac{1}{x''_d}\,I_{\text{ном. г}}.$$

Для СЭЭС $p \approx 1{,}0 \div 1{,}7$.

Ударный ток к. з. эквивалентного двигателя вычисляют по уравнению (см. § 2.7.6, 2.7.9)

$$i_{\text{уд. дв}} = p_{\text{дв}}\sqrt{2}\,\frac{1}{z''_{\text{дв}}}\,I_{\text{ном. дв}},$$

где $p_{\text{дв}} \approx 1{,}0 \div 1{,}3$.

Ударный ток цепи к. з. примерно равен сумме этих токов

$$i_{\text{уд }\Sigma} \approx i_{\text{уд. г}} + i_{\text{уд. дв}}.$$

3. Для приближенного суждения о максимально возможных значениях токов используются заранее рассчитанные таблицы значений токов для определенных условий к. з. в СЭЭС с различными сочетаниями генераторов, работающих параллельно [56].

## § 2.7.2. ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ТОК КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Мгновенное значение полного тока к. з. $i$ (рис. 2.7.2) в электрической цепи с синусоидальной ЭДС представляет собой сумму мгновенных значений периодической (вынужденной) составляющей тока $i_{\text{п}}$ и апериодической (свободной) составляющей тока $i_{\text{а}}$, т. е. $i = i_{\text{п}} + i_{\text{а}}$ [62].



В физических единицах процесс к. з. для активно-индуктивной цепи при отсутствии начального тока описывается уравнением

$$i = i_{\text{п}} + i_{\text{а}} = \frac{E_m}{Z}\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \frac{E_m}{Z}\sin(\alpha - \varphi)\exp\left(-\frac{t}{T_{\text{а}}}\right), \quad (2.7.1)$$

где $E_m$ — амплитуда ЭДС $e = E_m \sin(\omega t + \alpha)$; $\alpha$ — начальная фаза ЭДС; $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ — полное сопротивление цепи; $\varphi = \operatorname{arctg}\frac{X}{R}$ — фазовый угол цепи; $X = \omega L$ — индуктивное сопротивление цепи; $R$ — активное сопротивление цепи;

$$\exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) = e^{-\frac{t}{T_a}}.$$

Амплитуда ЭДС по уравнению (2.7.1) принята незатухающей. В общем же случае амплитуда ЭДС $E_m$ может изменяться во времени. При этом амплитуда периодической составляющей тока изменяется в соответствии с изменением амплитуды ЭДС. Апериодическая составляющая тока затухает с постоянной времени $T_{\text{а}} = L/R$ с. В результате наличия апериодической составляющей мгновенный ток в некоторые моменты времени превосходит амплитуду периодической составляющей тока (см. рис. 2.7.2). Апериодическая составляющая тока для цепи к. з., в которой преобладает индуктивное сопротивление, имеет наибольшее начальное значение при $\alpha \approx 0$ или $\alpha \approx \pi$, т. е. при нуле напряжения и амплитуде периодической составляющей тока на момент включения. Апериодическая составляющая затухает за 0,05—0,15 с.

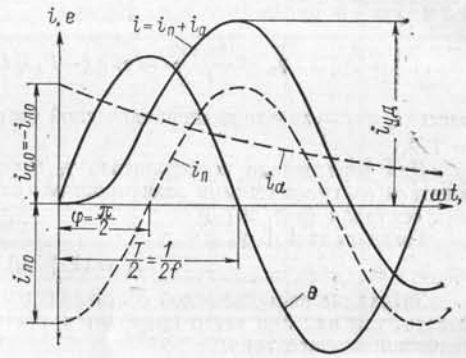



Рис. 2.7.2. График изменения тока к. з. при $\varphi = \pi/2$, $\alpha = 0$, $i_{\text{нач}} = 0$, $E_m = \text{const}$.

Значение апериодической составляющей тока $i_{\text{а0}}$ на момент времени $t = 0$ зависит от мгновенного значения начального тока на первый момент к. з. ($i_{\text{нач}} = i_{\text{п0}} + i_{\text{а0}}$). Начальная нагрузка в судовых системах обычно невелика по отношению к току к. з. и носит активно-индуктивный характер. Под ее влиянием начальное значение апериодической составляющей тока может немного уменьшаться. Поэтому при определении начального значения апериодической составляющей начальная нагрузка СЭЭС обычно не учитывается.

В трехфазной симметричной системе периодические составляющие фазных токов имеют сдвиг по времени на $^1/_3$ периода (120 эл. град). В связи с этим апериодические составляющие фазных токов различны. Их начальные значения определяются начальными значениями соответствующих фазных ЭДС.

Ударный ток к. з. $i_{\text{уд}}$ — наибольшее мгновенное значение тока к. з. По времени он соответствует примерно концу первого полупериода ($t \approx T/2 = \pi/\omega$).

При неучете затухания периодической составляющей тока из уравнения (2.7.1) следует

$$i_{\text{уд}} = I_{m0}[1 + \exp(-R/2fL)]$$

или

$$i_{\text{уд}} = I_{m0}[1 + \exp(-\pi R/X)],$$

где $I_{m0} = E_m/Z$ — амплитуда периодической составляющей тока к. з., равная ее начальному значению.

Ударный коэффициент $p = i_{уд}/I_{m0}$ при неучете затухания периодической составляющей тока определяется выражением

$$p_1 = 1 + \exp(-R/2fL) \text{ или } p_1 = 1 + \exp(-\pi R/X),$$

откуда

$$i_{уд} = p_1 I_{m0} = p_1 \sqrt{2} I_{п0}, \qquad (2.7.2а)$$

где $I_{п0}$ — действующее значение периодической составляющей тока, равное ее начальному значению.

Коэффициент затухания апериодической составляющей определяется по формуле

$$\gamma_a = \frac{i_{a\,T/2}}{I_{m0}} = \exp(-R/2fL) = \exp(-\pi R/X).$$

Здесь $i_{a\,T/2}$ — значение апериодической составляющей на момент времени $t = T/2$.

Для определения коэффициента $\gamma_a$ и соответствующего $\cos\varphi$ можно пользоваться их графическими зависимостями от отношения $X/R = \omega T_a$ в синхронных секундах (рис. 2.7.3).

Тогда $p_1 = 1 + \gamma_a$ и

$$i_{уд} = (1 + \gamma_a)\sqrt{2} I_{п0}. \qquad (2.7.2б)$$

Затухание периодической составляющей тока к. з. в СЭЭС необходимо учитывать, так как оно часто приводит к значительному уменьшению мгновенных значений полного тока.

Коэффициент затухания периодической составляющей определяется как

$$\gamma = \frac{I_{mT/2}}{I_{m0}} = \frac{I_{п\,T/2}}{I_{п0}},$$

где $I_{mT/2}$ — значение амплитуды периодической составляющей тока в момент времени $t = T/2$.

Методы определения коэффициента $\gamma$ для СЭЭС изложены в § 2.7.9.

При учете затухания периодической составляющей ударный ток определяется уравнениями

$$i_{уд} = p I_{m0} = p\sqrt{2} I_{п0} \qquad (2.7.3)$$

при $p = \gamma + \gamma_a$, т. е.

$$i_{уд} = (\gamma + \gamma_a)\sqrt{2} I_{п0}. \qquad (2.7.4)$$

Действующее значение полного тока к. з. определяет тепловое действие тока к. з. на элементы ЭЭС за заданный интервал времени.

Действующее значение полного тока к. з. за период $I_t$ в заданный момент времени условно определяется как среднеквадратичное значение тока за период, в середине которого находится заданный момент времени. Вычисление производится по уравнению

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{t-T/2}^{t+T/2} i^2\,dt} \qquad (2.7.5а)$$

в предположении, что составляющие тока неизменны и равны их значениям на момент времени $t$.

Все отмеченное имеет смысл при $t \geqslant T/2$.

При оговоренных выше условиях приближенно

$$I_t = \sqrt{I_{пt}^2 + i_{at}^2}, \qquad (2.7.5б)$$



где $I_{пt}$ — действующее значение периодической составляющей тока в заданный момент времени $t$; $i_{at} = I_{at} = I_{m0}\exp(-t/T_a)$ — мгновенное (действующее) значение апериодической составляющей в заданный момент времени $t$.

Действующее значение ударного тока $I_{уд}$ обычно рассматривается как действующее значение полного тока за первый период. Оно определяется в соответствии с уравнениями (2.7.5). Это наибольшее действующее

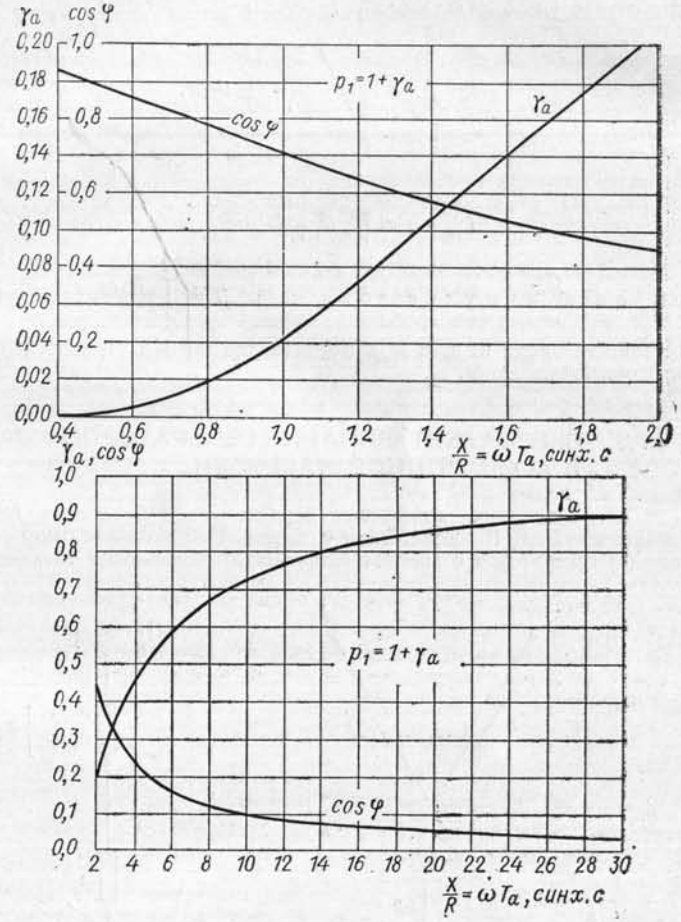



Рис. 2.7.3. Зависимости коэффициента $\gamma_a$ и $\cos\varphi$ от отношения $X/R$.

значение тока за целый период в течение процесса к. з. При неучете затухания периодической составляющей

$$I_{уд} = I_{п0}\sqrt{1 + 2\gamma_a^2}; \qquad (2.7.6)$$

при учете затухания

$$I_{уд} = I_{п0}\sqrt{\gamma^2 + 2\gamma_a^2}. \qquad (2.7.7)$$

В качестве действующего значения ударного тока часто используется также действующее значение полного тока к. з. за первый

полупериод. Фактическое тепловое воздействие тока к. з. на аппараты с продолжительностью срабатывания $\leqslant T/2$ определяется в большей степени действующим значением тока за первый полупериод. Действующее значение полного тока за первый полупериод по причине затухания составляющих тока превышает действующее значение тока за первый период и часто называется наибольшим действующим значением тока к. з. В общем случае оно определяется уравнением

$$I_{\text{уд}\,T/4} = \sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{T/2} i^2\,dt}.$$

В простейших условиях приближенно

$$I_{\text{уд}\,T/4} = \sqrt{I^2_{\text{п}\,T/4} + i^2_{\text{а}\,T/4}}.$$

Тепловой импульс тока к. з. $B = \int_0^t i^2\,dt$ определяет тепловое действие тока за время к. з. и используется для оценки термической устойчивости электрооборудования.

## § 2.7.3. ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ И АСИНХРОННОЙ НАГРУЗКИ

**Замещение нескольких параллельно работающих генераторов одним эквивалентным.** В соответствии с теоремой об эквивалентном генераторе несколько ($n$) генераторов с эквипотенциальными начальными точками, работающих параллельно на общий узел (рис. 2.7.4, *а*), могут быть заменены одним эквивалентным генератором с ЭДС $\dot{e}_{\text{экв}}$ и сопротивлением до узла $z_{\text{экв}}$ (рис. 2.7.4, *б*). Перед эквивалентированием сопротивления генераторов $x''_{di}$, $x''_{qi}$, $x'_{di}$, $x_{di}$, $x_{qi}$ и $r_{ai}$ в собственных номинальных относительных единицах при

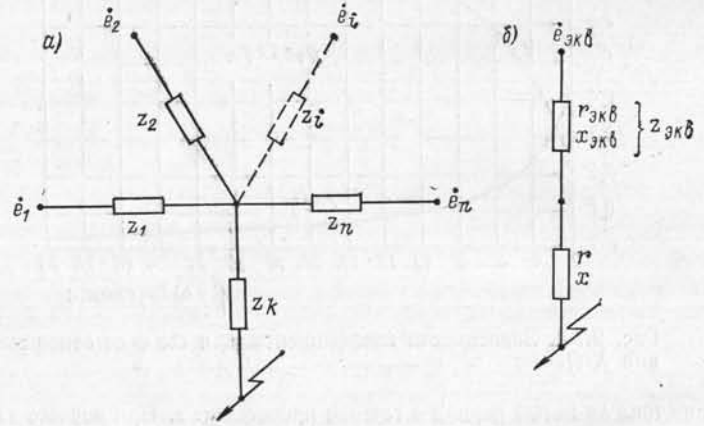



Рис. 2.7.4. Расчетная схема замещения с несколькими источниками питания (*а*) и эквивалентная схема замещения (*б*).



$Z_{6i}$ приводятся к общей базисной единице сопротивления $Z_6$ [9]. Перевод в общие базисные единицы осуществляется по формуле

$$c_i = \frac{c_{*i} Z_{6i}}{Z_6},$$

где $c_i$ — значение одного из указанных сопротивлений, приведенное к общим базисным условиям, о. е.; $c_{*i}$ — то же сопротивление при базисной единице $Z_{6i}$, о. е.

Сопротивления линий генераторов в физических единицах также переводятся в общие относительные единицы. Другие величины в рассматриваемом случае к общим базисным условиям не приводятся. Различные индуктивные сопротивления эквивалентного генератора $x''_{d\,\text{экв}}$, $x''_{q\,\text{экв}}$, $x'_{d\,\text{экв}}$, $x_{d\,\text{экв}}$, $x_{q\,\text{экв}}$ с учетом сопротивления линии в общем случае определяются поочередно для сверхпереходного, переходного и установившегося режимов и отдельно по каждой из осей на основании соответствующей схемы замещения как мнимая часть комплексного сопротивления $z_{\text{экв}}$ из формулы

$$\frac{1}{z_{\text{экв}}} = \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \cdots + \frac{1}{z_i} + \cdots + \frac{1}{z_n}, \qquad (2.7.8)$$

где $z_{\text{экв}}$ — комплексное сопротивление эквивалентного генератора, о. е.;

$$z_i = r_i + jx_i = (r_{ai} + r_{\text{л}i}) + j\,(x_{\text{г}i} + x_{\text{л}i}); \qquad (2.7.9)$$

$r_{ai}$, $x_{\text{г}i}$ — активные и одноименные индуктивные сопротивления генераторов, о. е.; $r_{\text{л}i}$, $x_{\text{л}i}$ — сопротивления линий, которые относятся к сопротивлениям генераторов, о. е.

Здесь и далее комплексные сопротивления в относительных единицах обозначаются через z, а полные сопротивления — через $z$.

Эквивалентное активное сопротивление $r_{a\,\text{экв}}$ принимается равным вещественной части сопротивления $z_{\text{экв}} = z''_{\text{экв}}$ для сверхпереходного режима, т. е. при $x_{\text{г}i} = x''_{di}$. Это обеспечивает наибольшую точность по влиянию этого сопротивления на сверхпереходный ток и на затухание апериодической составляющей тока.

При параллельной работе двух генераторов эквивалентные сопротивления в относительных единицах определяются как

$$z_{\text{экв}} = \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2}; \quad r_{a\,\text{экв}} = \frac{r_2\left(r_1^2 + x_1''^2\right) + r_1\left(r_2^2 + x_2''^2\right)}{\left(r_1 + r_2\right)^2 + \left(x_1'' + x_2''\right)^2}; \qquad (2.7.10\text{а})$$

$$x''_{d\,\text{экв}} = \frac{x_2''\left(r_1^2 + x_1''^2\right) + x_1''\left(r_2^2 + x_2''^2\right)}{\left(r_1 + r_2\right)^2 + \left(x_1'' + x_2''\right)^2}, \qquad (2.7.10\text{б})$$

где

$$r_1 = r_{a1} + r_{\text{л}1}; \quad r_2 = r_{a2} + r_{\text{л}2};$$
$$x_1'' = x''_{d1} + x_{\text{л}1}; \quad x_2'' = x''_{d2} + x_{\text{л}2}.$$

Аналогично по формулам (2.7.8), (2.7.9), (2.7.10а), (2.7.10б) путем замены $x''_{di}$, например, на $x''_{qi}$, $x'_{di}$, $x_{di}$, $x_{qi}$ могут быть вычислены и другие индуктивные сопротивления эквивалентного генератора.

Упрощенное приближенное вычисление активного $r_{\text{экв}}$ и индуктивного $x_{\text{экв}}$ сопротивлений эквивалентной генераторной цепи в случае, когда отношения $x/r$ отдельных генераторных цепей примерно равны между собой, можно производить по формулам

$$\frac{1}{r_{\text{экв}}} \approx \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \cdots + \frac{1}{r_i} + \cdots + \frac{1}{r_n}; \qquad (2.7.11)$$

$$\frac{1}{x_{\text{экв}}} \approx \frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \cdots + \frac{1}{x_i} + \cdots + \frac{1}{x_n}. \qquad (2.7.12)$$

Для двух генераторов при значительном отличии отношений $x/r$ отдельных генераторных цепей индуктивное сопротивление можно определить по формуле (2.7.12), а приближенное значение активного сопротивления рекомендуется вычислять по формуле

$$r_{\text{экв}} \approx \frac{r_1 x_2^2 + r_2 x_1^2}{(x_1 + x_2)^2}. \qquad (2.7.13)$$

При нескольких параллельных цепях вычисление $r_{\text{экв}}$ по этой формуле можно производить поочередным попарным свертыванием.

При параллельной работе нескольких одинаковых генераторов с одинаковыми сопротивлениями линий параметры эквивалентного генератора в его номинальных о. е. равны параметрам отдельных генераторов (при соответствующем учете линий) в их номинальных о. е.

Постоянные времени эквивалентного генератора $T_{d0\,\text{экв}}$, $T_{rd\,\text{экв}}$, $T_{rq\,\text{экв}}$, $T''_{d\,\text{экв}}$, $T'_{d\,\text{экв}}$, а также параметры $x_{s\,\text{экв}}$, $k_{\delta\,\text{экв}}$ и некоторые другие определяются как средневзвешенные значения по соотношению

$$a_{\text{экв}} = \frac{a_1 S_{\text{ном}\,1} + a_2 S_{\text{ном}\,2} + \cdots + a_i S_{\text{ном}\,i} + \cdots + a_n S_{\text{ном}\,n}}{S_{\text{ном}\,1} + S_{\text{ном}\,2} + \cdots + S_{\text{ном}\,i} + \cdots + S_{\text{ном}\,n}}, \qquad (2.7.14)$$

где $a_{\text{экв}}$ — значение параметра эквивалентного генератора в его номинальных о. е. или секундах; $a_i$ — значения одноименных параметров отдельных генераторов в их номинальных о. е. или секундах; $S_{\text{ном}\,i}$ — мощности отдельных генераторов, кВ·А.

Начальные и установившиеся ЭДС эквивалентного генератора $\dot{e}_{\text{экв}}$ могут определяться по формуле

$$\dot{e}_{\text{экв}} = \frac{\frac{\dot{e}_1}{z_1} + \frac{\dot{e}_2}{z_2} + \cdots + \frac{\dot{e}_i}{z_i} + \cdots + \frac{\dot{e}_n}{z_n}}{\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \cdots + \frac{1}{z_i} + \cdots + \frac{1}{z_n}}, \qquad (2.7.15)$$

где $\dot{e}_i$ и $z_i$ берутся по одноименным схемам замещения генераторов.

Для двух генераторов

$$\dot{e}_{\text{экв}} = \frac{\dot{e}_1 z_2 + \dot{e}_2 z_1}{z_1 + z_2}.$$

Начальные ЭДС могут определяться также путем расчета начального режима эквивалентного генератора.

Установившееся значение ЭДС по спрямленной характеристике холостого хода при потолочном токе возбуждения может определяться приближенно без учета различия фаз ЭДС $e_{af\infty}$ как вещественная часть комплексного выражения (мнимая часть мала и ею пренебрегают):

$$\dot{e}_{af\infty\,\text{экв}} = \frac{\frac{e_{af\infty 1}}{z_1} + \frac{e_{af\infty 2}}{z_2} + \cdots + \frac{e_{af\infty i}}{z_i} + \cdots + \frac{e_{af\infty n}}{z_n}}{\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \cdots + \frac{1}{z_i} + \cdots + \frac{1}{z_n}}, \qquad (2.7.16)$$

где $e_{af\infty i} = k_{\delta i} u_{f\,\text{пот}\,i}$, о. е.; $k_{\delta i} = x_{di}$ ОКЗ$_i$ (ОКЗ — отношение короткого замыкания); $u_{f\,\text{пот}\,i}$ — потолочные напряжения возбуждения соответствующих генераторов, о. е.; $z_i$ — комплексные сопротивления, замещающие генераторные линии и генераторы в установившемся режиме (последние замещаются через $r_{ai}$ и $x_{di}$), о. е.

Отдельные параметры генератора при необходимости могут определяться расчетным путем по уже вычисленным значениям эквивалентных параметров



из отношений, свойственных электрическим машинам. Так, например, можно вычислить в относительных единицах

$$u_{f\,\text{пот. экв}} = \frac{e_{af\infty\,\text{экв}}}{k_{\delta\,\text{экв}}}.$$

Эквивалентирование с вычислением совокупности различных параметров эквивалентного генератора требуется только при расчетах на ЦВМ и по уточненному аналитическому методу. В методе расчетных кривых используется эквивалентирование генераторов только по схеме замещения через сверхпереходные реактивности $x''_d$, а в упрощенном аналитическом методе — еще и по сверхпереходным постоянным времени $T''_d$ при замкнутом накоротко статоре.

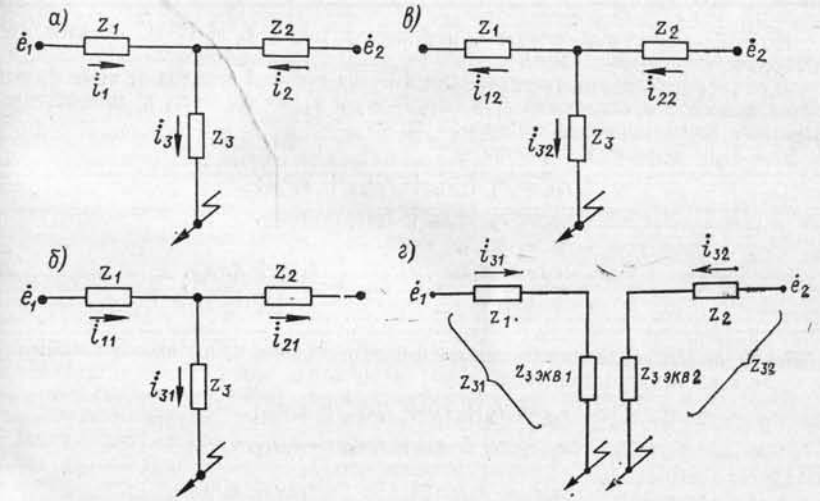



Рис. 2.7.5. Схемы к эквивалентированию двух источников питания.

**Замещение системы с несколькими параллельно работающими генераторами эквивалентной системой с генераторами, работающими на независимые цепи к. з.** Для периодических составляющих токов и напряжений при постоянных значениях сопротивлений режим короткого замыкания, соответствующий схеме, приведенной на рис. 2.7.5, *а*, по принципу наложения можно представить в виде суммы двух режимов в соответствии с рис. 2.7.5, *б* и *в*.

Ток $\dot{i}_{1i}$ при этом определяется ЭДС $\dot{e}_1$ и собственным сопротивлением $z_{1i}$ по выражению

$$\dot{i}_{1i} = \frac{\dot{e}_1}{z_{1i}} \quad \text{при } z_{1i} = z_1 + \frac{z_2 z_3}{z_2 + z_3},$$

где $z_1$, $z_2$, $z_3$ — соответствующие комплексные сопротивления.

Ток $\dot{i}_{2i}$ определяется ЭДС $\dot{e}_1$ и взаимным сопротивлением $z_2$

$$\dot{i}_{2i} = \frac{\dot{e}_1}{z_{2i}} \quad \text{при } z_{2i} = z_2 + z_1 + z_2 z_1 \frac{1}{z_3}.$$

Аналогично

$$\dot{i}_{3i} = \frac{\dot{e}_1}{z_{3i}} \quad \text{при } z_{3i} = z_3 + z_1 + z_3 z_1 \frac{1}{z_2}. \qquad (2.7.17)$$

Таким образом,

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_{31} + \dot{I}_{32} = \frac{\dot{e}_1}{z_{31}} + \frac{\dot{e}_2}{z_{32}}.$$

В результате для расчета периодической составляющей тока к. з. схему на рис. 2.7.5, *а* можно представить в виде схемы на рис. 2.7.5, *г* с двумя генераторами, работающими на независимые цепи к. з. при результирующих сопротивлениях цепей $z_{31}$ и $z_{32}$ с суммированием токов в точке к. з. Такое замещение позволяет при известных ЭДС и сопротивлениях $z_{31}$ и $z_{32}$ вести расчет индивидуального изменения токов, т. е. вычислять независимые токи к. з. $\dot{I}_{31}$ и $\dot{I}_{32}$ от каждого из генераторов, а затем определять суммарный ток цепи к. з. как $\dot{I} = \dot{I}_3 = \dot{I}_{31} + \dot{I}_{32}$.

По последнему выражению при расчетах токов к. з. СЭЭС производится алгебраическое суммирование.

Для системы с двумя генераторами имеется простой переход от комплексной формы записи сопротивлений $z_{1k} = z_{13} = z_{31}$ и $z_{2k} = z_{23} = z_{32}$ к вещественной форме для их составляющих в виде:

для цепи первого генератора

$$r_{1k} = r_1 + r_k + r_2 a_{11} + x_2 a_{21};$$
$$x_{1k} = x_1 + x_k + r_2 a_{21} - x_2 a_{11},$$

где

$$a_{11} = \frac{r_1 r_k - x_1 x_k}{r_2^2 + x_2^2}; \quad a_{21} = \frac{r_1 x_k + x_1 r_k}{r_2^2 + x_2^2};$$

индекс $k$ придается сопротивлениям $k$-й ветви (цепи к. з.) схемы замещения;

для цепи второго генератора

$$r_{2k} = r_2 + r_k + r_1 a_{12} + x_1 a_{22};$$
$$x_{2k} = x_2 + x_k + r_1 a_{22} - x_1 a_{12},$$

где

$$a_{12} = \frac{r_2 r_k - x_2 x_k}{r_1^2 + x_1^2}; \quad a_{22} = \frac{r_2 x_k + x_2 r_k}{r_1^2 + x_1^2}.$$

Отсюда (см. рис. 2.7.5, *г*)

$$z_{3\,\text{экв}1} = z_3 + z_3 \frac{z_1}{z_2}; \quad z_{3\,\text{экв}2} = z_3 + z_3 \frac{z_2}{z_1}.$$

При наличии трех и более источников питания (см. рис. 2.7.4, *а*) в расчете взаимного сопротивления $z_{ik}$ для $i$-й и $k$-й ветвей схемы замещения остальные генерирующие ветви можно объединить в одну с эквивалентной проводимостью

$$\frac{1}{z_{\Sigma\,\text{экв}}} = \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \cdots + \frac{1}{z_{i-1}} + \frac{1}{z_{i+1}} + \cdots + \frac{1}{z_n}.$$

Таким образом, этот случай приводится к уже рассмотренному случаю трехлучевой звезды. Проводимость $\frac{1}{z_{\Sigma\,\text{экв}}}$ имеет смысл проводимости $\frac{1}{z_2}$ в формуле (2.7.17), и взаимное сопротивление для ветвей $i$ и $k$ определяется выражением

$$z_{ik} = z_i + z_k + z_i z_k \left( \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \cdots + \frac{1}{z_{i-1}} + \frac{1}{z_{i+1}} + \cdots + \frac{1}{z_n} \right). \quad (2.7.18)$$

Из этого выражения следует, что $z_{ik} = z_{ki}$.

В результате любая $(n+1)$-лучевая звезда вида, изображенного на рис. 2.7.4, *а*, может быть приведена к $n$-лучевой звезде вида, изображенного на рис. 2.7.5, *г*, с генераторами, работающими на независимые цепи к. з.



**Замещение нескольких асинхронных двигателей одним эквивалентным.** Для расчетов токов к. з. требуется определять параметры эквивалентного двигателя $r_1$, $x_1$, $r'_2$, $x'_2$, $x_0$ к его схеме замещения. Параметры определяются для заданного скольжения с учетом сопротивления линий до ГРЩ. Номинальная мощность эквивалентного двигателя принимается равной сумме номинальных мощностей отдельных двигателей, т. е.




Рис. 2.7.6. Зависимости параметров эквивалентного асинхронного двигателя с учетом линий от усредненной мощности двигателя при $f = 50$ Гц: *а* — сопротивления $r_1$, $r'_2$; *б* — сопротивления $x_0$.

$$P_{\text{ном. экв}} = \sum_{i=1}^{n} P_{\text{ном}\,i}.$$

Двигатели мощностью до 25 кВт ввиду их многочисленности предварительно эквивалентируются одним двигателем. Параметры этого двигателя для номинального скольжения обычно определяются по кривым, приведенным на рис. 2.7.6 и по табл. 2.7.1, в зависимости от усредненной номинальной мощности одного двигателя $P_{\text{у. дв}}$, под которой понимают

$$P_{\text{у. дв}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} P_{\text{дв. м}\,i},$$

где $P_{\text{дв. м}\,i}$ — номинальная мощность отдельного двигателя малой мощности; $n$ — число таких двигателей.

*Таблица 2.7.1*

**Средние значения параметров асинхронных двигателей, о. е.**

| $P_{\text{у. дв}}$, кВт | $x_1$ | $x'_2$ |
|---|---|---|
| До 8 | 0,085 | 0,085 |
| 8 и более | 0,090 | 0,100 |

Такой подход эффективен при относительно небольшом диапазоне мощностей эквивалентируемых двигателей. В общем случае выбор параметров эквивалентного двигателя может производиться с высокой достоверностью по номинальной типовой мощности двигателей для эквивалентируемой группы, которая определяется в соответствии с уравнением

$$P_{\text{ном. тип}} = \left( \sum_{i=1}^{n} P_i^2 \right) \Big/ \sum_{i=1}^{n} P_i. \quad (2.7.19)$$

Число типовых двигателей

$$n_{\text{тип}} \approx \sum_{i=1}^{n} P_i / P_{\text{ном. тип}}.$$

Номинальная типовая мощность двигателей близка к мощности тех двигателей из группы двигателей, заменяемых одним эквивалентным, параметры которых преимущественно определяют совокупный процесс к. з. двигателей. Параметры эквивалентного двигателя в этом случае находятся по тем же кривым на

рис. 2.7.6 и по табл. 2.7.1 в соответствии со значением $P_{\text{ном. тип}}$ вместо $P_{\text{у. дв}}$.

Базисное сопротивление эквивалентного двигателя (в миллиомах) вычисляется по номинальным напряжению и току эквивалентного двигателя (см. § 2.7.9) как

$$Z_{\text{б. м}} = \frac{U_{\text{ном. дв}}}{\sqrt{3} I_{\text{б. дв. м. экв}}} \quad \text{при } I_{\text{б. дв. м. экв}} = I_{\text{ном. дв. м. экв}}.$$

Для двигателей мощностью более 25 кВт параметры, необходимые для эквивалентирования, берутся по справочным данным или непосредственно по данным заводов-изготовителей.

Различные параметры (в миллиомах) общего эквивалентного электродвигателя, замещающего двигатели до 25 кВт и более, определяются поочередно по приближенной формуле

$$\frac{1}{A_{\text{экв}}} = \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} + \cdots + \frac{1}{A_i} + \cdots + \frac{1}{A_k}, \qquad (2.7.20)$$

где $A_i$ — значение одноименных параметров каждого из двигателей мощностью более 25 кВт и отдельного эквивалентного двигателя, замещающего двигатели мощностью до 25 кВт. После этого параметры общего эквивалентного двигателя приводятся к нужным базисным единицам.

Быструю приближенную оценку параметров общего эквивалентного двигателя можно производить на основе общей типовой мощности двигателей всей асинхронной нагрузки СЭЭС. Последняя определяется по уравнению (2.7.19) исходя из конкретных значений мощностей двигателей мощностью более 25 кВт и нескольких ($n_{\text{тип}}$) типовых двигателей мощностью $P_{\text{ном. тип}}$, замещающих двигатели мощностью до 25 кВт.

## § 2.7.4. ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ

### РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ТОКА ПРИ НЕУЧЕТЕ НАСЫЩЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА И АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕПИ

**Расчет тока к. з. по ненасыщенному значению синхронной реактивности по продольной оси** $x_d$. При коротких замыканиях на зажимах генератора насыщение генератора и активное сопротивление статора оказывают незначительное влияние на величину установившегося тока к. з. и их можно не учитывать.

Установившийся ток короткого замыкания $i_\infty$ при к. з. на зажимах машины в относительных единицах ($I_\text{б} = I_{\text{ном}}$) определяется как

$$i_\infty = \frac{e_{af}}{x_d},$$

где $e_{af}$ — ЭДС, определяемая по спрямленной начальной части характеристики холостого хода (х. х. х.), приведенной на рис. 2.7.7; $x_d$ — ненасыщенное значение синхронной реактивности.

Если за базисную единицу тока возбуждения принять ток $I_{f\text{б}} = I_{f0}$ (см. рис. 2.7.7), соответствующий $E_{af} = U_{\text{ном}}$ и $u_{\text{ном}} = 1$ по спрямленной характеристике холостого хода, то в относительных единицах $e_{af} = i_f$ и ток короткого замыкания определяется током возбуждения по формуле

$$i_\infty = \frac{i_f}{x_d}.$$

При данной базисной единице ток возбуждения, соответствующий единичному установившемуся току к. з. ($i_\infty = 1$) в случае короткого замыкания на зажимах машины, равен $x_d$.



**Расчет тока к. з. по отношению короткого замыкания.** Отношение короткого замыкания (ОКЗ) представляет собой отношение установившегося тока к. з. $I'_{\infty 0}$ к номинальному току при коротком замыкании на зажимах генератора с током возбуждения $I'_{f0}$ (см. рис. 2.7.7), соответствующим номинальному напряжению $u_{\text{ном}} = 1$ при холостом ходе по реальной характеристике холостого хода (х. х. х.). На рис. 2.7.7 значения токов установившегося к. з. задаются характеристикой короткого замыкания (х. к. з.). При спрямлении характеристики холостого хода по касательной к ее начальной части (линии $OA$)

$$x_d\text{ОКЗ} = k_\delta,$$

где $k_\delta = \dfrac{U'_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} = \dfrac{I'_f}{I_{f0}}$ — соотношение напряжений (ЭДС) или токов, соответствующих холостому ходу, по спрямленной и реальной характеристикам.

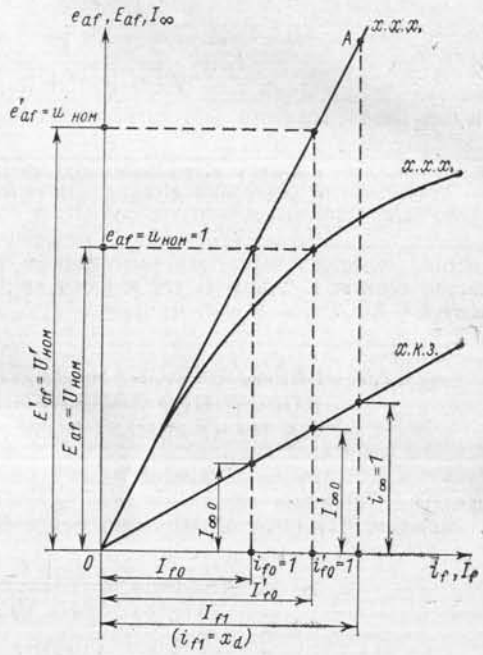



Рис. 2.7.7. Характеристики холостого хода (х. х. х.) и короткого замыкания (х. к. з.) синхронного генератора.

Если насыщение при холостом ходе машины отсутствует, то $x_d$ ОКЗ = 1. Аналогично, если спрямление х. х. х. производить по точке с $U_{\text{ном}}$ реальной характеристики холостого хода, то $x_{d\text{н}}$ОКЗ = 1. В последнем случае $x_{d\text{н}}$ — соответствующее насыщенное значение реактивности.

При расчетах с использованием ОКЗ за базисную единицу тока возбуждения принимается ток $I_{f\text{б}} = I'_{f0}$ (см. рис. 2.7.7), соответствующий номинальному напряжению по реальной характеристике холостого хода. В этом случае установившийся ток к. з. определяется как $i_\infty = \text{ОКЗ}\, i'_f$, где $i'_f$ — ток возбуждения в указанных относительных единицах.

Токи возбуждения при разных базисных единицах $I_{f\text{б}} = I_{f0}$ и $I_{f\text{б}} = I'_{f0}$ находятся в соотношении $i_f = i'_f k_\delta$. Для случая короткого замыкания через индуктивное сопротивление $x$ рассмотренные формулы принимают вид

$$i_\infty = \frac{i_f}{x_d + x}; \quad i_\infty = \frac{x_d}{x_d + x}\ \text{ОКЗ}\, i'_f.$$

### РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ЧЕРЕЗ СОПРОТИВЛЕНИЕ $z = r + jx$ ПРИ НЕУЧЕТЕ НАСЫЩЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА

В этом случае расчетные формулы имеют вид

$$i_\infty = \frac{\sqrt{(x_q + x)^2 + (r_a + r)^2}}{(x_d + x)(x_q + x) + (r_a + r)^2}\, i_f \qquad (2.7.21)$$

или

$$i_\infty = \frac{\sqrt{(x_q + x)^2 + (r_a + r)^2}}{(x_d + x)(x_q + x) + (r_a + r)^2}\, k_\delta i'_f, \qquad (2.7.22)$$

где $k_\delta = x_d\text{ОКЗ}$.

При пренебрежении явнополюсностью генераторов ($x_q = x_d$) из (2.7.21) и (2.7.22) получаются соотношения

$$i_\infty = \frac{1}{\sqrt{(x_d + x)^2 + (r_a + r)^2}} i_f \qquad (2.7.23)$$

и

$$i_\infty = \frac{1}{\sqrt{(x_d + x)^2 + (r_a + r)^2}} k_\delta i'_f. \qquad (2.7.24)$$

Неучет явнополюсности дает погрешность примерно до 5%.

### РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ТОКА С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА

Расчет производится методом Касьянова по заданным характеристике холостого хода, току возбуждения $i_f$, параметрам генератора и параметрам цепи к. з. Сущность его аналогична расчету тока генератора, изложенному в § 4.3.2.

## § 2.7.5. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ

*При отсутствии демпферных обмоток* у синхронного генератора начальные значения продольной и поперечной составляющих тока короткого замыкания [62] (переходного тока) в относительных единицах определяются выражениями

$$i'_{d0} = \frac{x_q + x}{(x'_d + x)(x_q + x) + (r_a + r)^2} e'_{d0}; \qquad (2.7.25)$$

$$i'_{q0} = \frac{r_a + r}{(x'_d + x)(x_q + x) + (r_a + r)^2} e'_{d0}. \qquad (2.7.26)$$

Отношение продольной и поперечной составляющих переходного тока

$$\frac{i'_{d0}}{i'_{q0}} = \operatorname{tg} \psi' = \frac{x_q + x}{r_a + r}$$

имеет то же значение, что и для установившегося тока. Полная величина периодической составляющей переходного тока в начальный момент времени равна $i'_0 = \sqrt{i'^2_{d0} + i'^2_{q0}}$, что дает

$$i'_0 = \frac{\sqrt{(x_q + x)^2 + (r_a + r)^2}}{(x'_d + x)(x_q + x) + (r_a + r)^2} e'_{d0}. \qquad (2.7.27)$$

Электродвижущая сила $e'_{d0}$ на начальный момент короткого замыкания определяется по начальному режиму как

$$e'_{d0} = e'_{d\ нач} = i_{d\ нач}(x'_d + x_{нач}) + i_{q\ нач}(r_a + r_{нач}),$$

где

$$i_{d\ нач} = i_{нач} \sin \psi_{нач}, \quad i_{q\ нач} = i_{нач} \cos \psi_{нач}$$

при

$$\operatorname{tg} \psi_{нач} = \frac{x_q + x_{нач}}{r_a + r_{нач}}.$$



Электродвижущую силу $e'_{d0}$ можно определять также по приближенным выражениям

$$e'_{d0} \approx \sqrt{(u_{нач} \cos \varphi_{нач} + i_{нач} r_a)^2 + (u_{нач} \sin \varphi_{нач} + i_{нач} x'_d)^2}; \qquad (2.7.28)$$

$$e'_{d0} \approx u_{нач} + i_{нач} x'_d \sin \varphi_{нач} + i_{нач} r_a \cos \varphi_{нач} \qquad (2.7.29)$$

или при малых $r_a$ даже как

$$e'_{d0} \approx u_{нач} + i_{нач} x'_d \sin \varphi_{нач}. \qquad (2.7.30)$$

Значения ЭДС $e'_{d0}$ обычно лежат в пределах 1,0—1,12.

*При наличии демпферных обмоток* у синхронного генератора начальные значения продольной и поперечной составляющих тока (сверхпереходного тока) определяются выражениями

$$i''_{d0} = \frac{e''_{d0}(x''_q + x) + e''_{q0}(r_a + r)}{(x''_d + x)(x''_q + x) + (r_a + r)^2}; \qquad (2.7.31)$$

$$i''_{q0} = \frac{e''_{d0}(r_a + r) - e''_{q0}(x''_d + x)}{(x''_d + x)(x''_q + x) + (r_a + r)^2}. \qquad (2.7.32)$$

В этом случае отношение продольной и поперечной составляющих токов несколько отличается от их отношений в переходном и установившемся режимах.

Электродвижущая сила $e''_{q0}$ обычно невелика, и если в уравнениях (2.7.31), (2.7.32) пренебречь членами с $e''_{q0}$, то получаются приближенные выражения

$$i''_{d0} = \frac{x''_q + x}{(x''_d + x)(x''_q + x) + (r_a + r)^2} e''_{d0};$$

$$i''_{q0} = \frac{r_a + r}{(x''_d + x)(x''_q + x) + (r_a + r)^2} e''_{d0}.$$

При этом условии полная величина сверхпереходного тока на начальный момент времени может быть определена по следующему выражению, аналогичному (2.7.27):

$$i''_0 = \frac{\sqrt{(x''_q + x)^2 + (r_a + r)^2}}{(x''_d + x)(x''_q + x) + (r_a + r)^2} e''_{d0}. \qquad (2.7.33)$$

Значения соответствующих составляющих ЭДС вычисляют по выражениям

$$e''_{d0} = e''_{d\ нач} = i_{d\ нач}(x''_d + x_{нач}) + i_{q\ нач}(r_a + r_{нач});$$

$$e''_{q0} = e''_{q\ нач} = i_{d\ нач}(r_a + r_{нач}) - i_{q\ нач}(x''_q + x_{нач}).$$

Приближенное значение ЭДС $e''_{d0}$ может определяться по следующим выражениям, аналогичным (2.7.28)—(2.7.30):

$$e''_{d0} \approx \sqrt{(u_{нач} \cos \varphi_{нач} + i_{нач} r_a)^2 + (u_{нач} \sin \varphi_{нач} + i_{нач} x''_d)^2}; \qquad (2.7.34)$$

$$e''_{d0} \approx u_{нач} + i_{нач} x''_d \sin \varphi_{нач} + i_{нач} r_a \cos \varphi_{нач} \qquad (2.7.35)$$

или при малых $r_a$ как

$$e''_{d0} \approx u_{нач} + i_{нач} x''_d \sin \varphi_{нач}. \qquad (2.7.36)$$

При неучете влияния явнополюсности в приближенных расчетах начальных токов короткого замыкания можно использовать выражения

$$i'_0 = \frac{e'_{d0}}{\sqrt{(x'_d + x)^2 + (r_a + r)^2}}; \qquad (2.7.37)$$

$$i''_0 = \frac{e''_{d0}}{\sqrt{(x''_d + x)^2 + (r_a + r)^2}}. \qquad (2.7.38)$$

Влияние начальной нагрузки на начальные значения ЭДС $e'_d$ и $e''_d$ и начальные значения тока к. з. невелико и обычно не превышает 5—10%. При холостом ходе $e''_{d0} = e'_{d0} = u = 1$. При нагрузке с $i_{нач} = 0{,}75$ $e''_{d0} \approx 1{,}05 \div 1{,}09$, а $e'_{d0} \approx 1{,}06 \div 1{,}12$.

## § 2.7.6. ТОКИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ОТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

При внезапном коротком замыкании в цепи статора работающий асинхронный двигатель переходит в генераторный режим. Ток двигателя меняется по фазе примерно на 180°. Магнитный поток ротора двигателя и ЭДС статора постепенно затухают от их начальных значений и обеспечивают в течение некоторого времени создание тока в цепи к. з. Полный ток к. з. двигателя может быть представлен в виде периодической $i_п$ и апериодической $i_a$ составляющих (рис. 2.7.8).

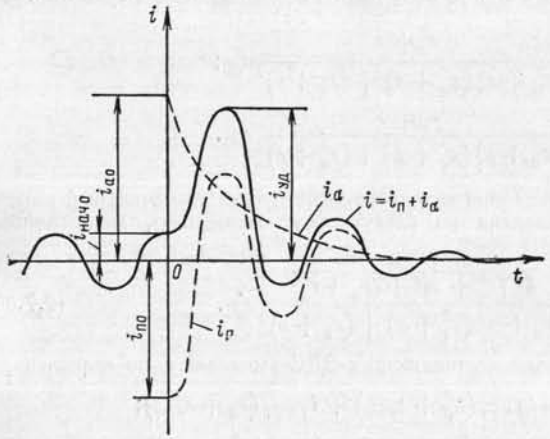



Рис. 2.7.8. График изменения тока к. з. асинхронного двигателя.

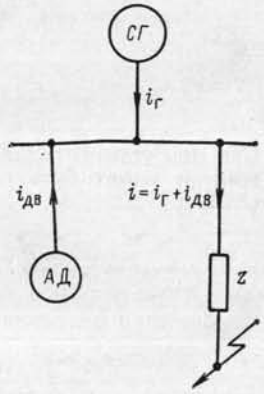



Рис. 2.7.9. Схема простейшей энергосистемы.

При достаточно малом сопротивлении $z$ цепи к. з. по фидеру от ГРЩ (рис. 2.7.9) двигатель *АД* практически отделяется от остальной части системы и с затуханием ЭДС его ток в течение нескольких периодов затухает до нуля. В цепи к. з. ток $i_{дв}$ от двигателя суммируется с током $i_г$ от генератора *СГ* и поэтому называется током подпитки. В аналитических расчетах делается допущение о совпадении фаз токов двигателей и генераторов. Увеличение ударного тока цепи к. з. под влиянием подпитки от двигателей в СЭЭС может достигать 20—30% ударного тока эквивалентного генератора, а иногда и более.



В связи с ростом мощности СЭЭС возникает необходимость использовать наряду с приближенными также и уточненные расчеты токов к. з. двигателей.

При существующих уровнях развития методов расчета токов к. з. в СЭЭС и учета в них асинхронных двигателей достоверность расчета суммарных токов к. з. в основном определяется моделью асинхронной нагрузки и, в частности, выбором мест подключения и заданием параметров эквивалентных асинхронных двигателей.

Влияние асинхронной нагрузки на ток к. з. в системе распределения СЭЭС проявляется особенно сильно при к. з. вблизи мест подключения электродвигателей большой мощности.

Процесс к. з. асинхронного двигателя (эквивалентного асинхронного двигателя) характеризуют:

$i''_{дв.0}$ — начальное действующее значение периодической составляющей тока или начальный сверхпереходный ток двигателя;

$i_{п.дв}$ — действующее значение периодической составляющей тока в заданный момент времени;

$i_{а.дв}$ — апериодическая составляющая тока в заданный момент времени;

$i_{уд.дв}$ — ударный ток двигателя.

Начальный сверхпереходный ток двигателя в его относительных единицах при к. з. на фидере ГРЩ (см. рис. 2.7.9) приближенно определяется уравнением

$$i''_{дв0} = \frac{e''_{дв0} - u_0}{z''_{дв}}, \qquad (2.7.39)$$

где $u_0$ — остаточное напряжение на шинах ГРЩ; $z''_{дв}$ — сверхпереходное полное сопротивление двигателя с учетом сопротивления его линии до ГРЩ.

Начальное значение сверхпереходной ЭДС двигателя $e''_{дв\,0}$ определяется по его начальному режиму как

$$e''_{дв0} \approx \sqrt{(u_{нач}\cos\varphi_{нач} - i_{нач}r_{дв})^2 + (u_{нач}\sin\varphi_{нач} - i_{нач}x''_{дв})^2} \qquad (2.7.40)$$

или

$$e''_{дв0} \approx u_{нач} - i_{нач}x''_{дв}\sin\varphi_{нач} - i_{нач}r_{дв}\cos\varphi_{нач}, \qquad (2.7.41)$$

а при малых $r_{дв}$ как

$$e''_{дв0} \approx u_{нач} - i_{нач}x''_{дв}\sin\varphi_{нач}. \qquad (2.7.42)$$

Обычно значения ЭДС $e''_{дв\,0}$ лежат в пределах 0,87—0,93. При снижении начальной нагрузки двигателя до холостого хода ЭДС $e''_{дв\,0}$ увеличивается примерно до единицы, что приводит к увеличению тока к. з. двигателя. Однако при этом одновременное снижение нагрузки генераторов оказывает обратное влияние на их ЭДС $e''_{d0}$, что вызывает уменьшение тока к. з. генераторов.

Сверхпереходное полное сопротивление двигателя с линией $z''_{дв} = \sqrt{(x''_{дв} + x)^2 + (r_{дв} + r)^2}$ определяется на основе справочных данных или каталогов на двигатели. Здесь $r$ и $x$ — сопротивления цепи от двигателя до ГРЩ. Сопротивление $z''_{дв}$ практически равно пусковому сопротивлению асинхронного двигателя. При отсутствии данных по параметрам двигателя для к. з. с холостого хода принимают $i''_{дв\,0} = i_{пуск}$. Тогда сверхпереходное сопротивление двигателя без учета линии равно $z''_{да} = 1/i_{пуск}$. Только для отдельных типов двигателей принимают $i''_{дв\,0} = ki_{пуск}$ при $k = 1{,}0 \div 1{,}2$.

Для эквивалентного асинхронного двигателя отечественных СЭЭС с учетом его линий до ГРЩ действующими нормами задается комплексное сопротивление $z''_{дв} = 0{,}08 + j0{,}161$ в номинальных о. е. двигателя, что соответствует $z''_{дв} = 0{,}18$. При этом базисное напряжение двигателя принято равным номинальному напряжению генераторов.

Остаточное напряжение на шинах $u_о$, равное напряжению на короткозамкнутом фидере (на ГРЩ), определяется уравнениями

$$u_о \approx I_{уд\,\Sigma} z;$$

$$I_{уд\,\Sigma} = \sqrt{\left(i''_0\gamma + i''_{дв0\,(б)}\gamma_{п.\,дв}\right)^2 + 2\left(i''_0\gamma_a + i''_{дв0\,(б)}\gamma_{а.\,дв}\right)^2}, \quad (2.7.43)$$

где $I_{уд\,\Sigma}$ — действующее значение суммарного ударного тока цепи к. з. за первый период с учетом периодических и апериодических составляющих токов генератора и двигателя, общие о. е.; $z$ — полное сопротивление цепи от ГРЩ до точки к. з., общие о. е.; $i''_{дв0\,(б)} = i''_{дв0} I_{ном.\,дв}/I_б$ — начальный сверхпереходный ток двигателя, приведенный к общему базисному току $I_б$; $\gamma_{п.\,дв}$, $\gamma_{а.\,дв}$ — коэффициенты затухания периодической и апериодической составляющих тока двигателя. Определение этих коэффициентов приводится ниже.

Напряжение $u_о$ зависит от тока подпитки. Поэтому расчет тока $i''_{дв\,0}$ по уравнению (2.7.39) часто производится методом итераций. В первом приближении $u_о$ определяется с учетом только тока генератора. Возможно и безытеративное решение уравнений (см. § 2.7.9).

Для судовых асинхронных двигателей не выделяют переходный ток к. з., и процесс изменения действующего значения периодической составляющей тока двигателя описывается уравнением

$$i_{п.\,дв} = i''_{дв0} \exp\left(-t/T'_{расч}\right),$$

где $T'_{расч} = (x''_{дв} + x)/\omega r'_2$—расчетная постоянная времени периодической составляющей тока двигателя, с; $r'_2$ — активное сопротивление ротора при номинальном скольжении, приведенное к статору; $x$ — индуктивное сопротивление линии.

Если индуктивное сопротивление линии от двигателя до ГРЩ отнесено к сопротивлению $x''_{дв}$, то под $x$ здесь следует понимать только сопротивление линии от ГРЩ до точки к. з. С удалением точки к. з. от двигателя к ГРЩ и далее по фидеру от ГРЩ постоянная времени $T'_{расч}$ обычно увеличивается в небольшой степени.

Изменение апериодической составляющей тока двигателя при наибольшем ее начальном значении описывается уравнением

$$i_{а.\,дв} = \sqrt{2} i''_{дв0} \exp\left(-t/T_а\right),$$

где $T_а = (x''_{дв} + x)/\omega(r_1 + r)$ — постоянная времени апериодической составляющей тока, с; $r_1$ — активное сопротивление статора; $r$ — активное сопротивление линии.

Если сопротивление линии от двигателя до ГРЩ отнесено к сопротивлениям двигателя $x''_{дв}$ и $r_1$, то в этом случае под $x$ и $r$ следует понимать только сопротивления линии от ГРЩ до точки к. з.

Постоянная времени $T_а$ с удалением точки к. з. от двигателя уменьшается значительно быстрее, чем нарастает постоянная времени $T'_{расч}$. При $T_а \leqslant 2$ мс апериодическую составляющую тока обычно можно не учитывать. Для к. з. вблизи зажимов двигателя постоянные времени $T'_{расч}$ и $T_а$ близки по величине и имеют значения порядка 5—20 мс для двигателей мощностью $P_{ном} = 1 \div 25$ кВт и 20—60 мс для двигателей мощностью $P_{ном} = 25 \div 100$ кВт.

При расчетах постоянных времени двигателей в качестве сопротивлений линии могут учитываться как сопротивление от двигателя до ГРЩ, так и сопротивление от ГРЩ до точки к. з. Иногда учитывают только сопротивление между двигателем и ГРЩ. В последнем случае имеет место несколько большее завышение значения ударного коэффициента по отношению к фактическому, чем в первом случае.

Процесс изменения огибающей максимальных мгновенных значений полного тока двигателя описывается уравнением

$$i_{дв} = \sqrt{2}\, i_{п.\,дв} + i_{а.\,дв}.$$



Ударный ток двигателя наступает в конце первого полупериода тока при $t \approx \pi/\omega$ с, что для 50 Гц ($\omega$=314 рад/с) составляет 0,01 с. Для $t$, $T'_{расч}$ и $T_а$ в секундах

$$i_{уд.\,дв} = \sqrt{2} i''_{дв0}\left[\exp\left(-\pi/\omega T'_{расч}\right) + \exp\left(-\pi/\omega T_а\right)\right]. \quad (2.7.44)$$

Ударный коэффициент двигателя учитывает затухание обеих составляющих тока и определяется уравнением

$$p_{дв} = \gamma_{п.\,дв} + \gamma_{а.\,дв},$$

где $\gamma_{п.\,дв}$ и $\gamma_{а.\,дв}$ — коэффициенты затухания периодической и апериодической составляющих тока двигателя:

$$\gamma_{п.\,дв} = \exp\left(-\pi/\omega T'_{расч}\right) = \exp\left[-\pi r'_2/\left(x''_{дв} + x\right)\right]; \quad (2.7.45)$$

$$\gamma_{а.\,дв} = \exp\left(-\pi/\omega T_а\right) = \exp\left[-\pi\left(r_1 + r\right)/\left(x''_{дв} + x\right)\right]. \quad (2.7.46)$$

Коэффициенты $\gamma_{п.\,дв}$ и $\gamma_{а.\,дв}$ могут определяться по кривым рис. 2.7.3 при использовании в качестве аргумента соответственно отношений $X/R = (x''_{дв} + x)/r'_2$ и $X/R = (x''_{дв} + x)/(r_1 + r)$. В относительных единицах

$$i_{уд.\,дв} = p_{дв}\sqrt{2} i''_{дв\,0}.$$

Ударный коэффициент $p_{дв}$ уменьшается с удалением точки к. з. от двигателя.

Для уточненных расчетов параметры эквивалентных асинхронных двигателей должны рассчитываться специально для каждой конкретной СЭЭС в соответствии с § 2.7.3. Для СЭЭС малой мощности с типовой мощностью эквивалентного АД около 20 кВт можно использовать значения $r_1 = 0{,}037$; $r'_2 = 0{,}037$; $x''_{дв} = 0{,}19$.

С увеличением мощности асинхронных двигателей наблюдается увеличение ударного коэффициента. Однако, учитывая это увеличение при оценке токов к. з., одновременно следует иметь в виду наблюдающиеся часто при этом увеличения $x''_{дв}$ для двигателей большой мощности.

Для эквивалентного двигателя определение ударного коэффициента следует производить по его параметрам.

При приближенных расчетах для эквивалентного двигателя СЭЭС допускается принимать $p_{дв} = 1$ и полагать ударный ток двигателя равным начальной амплитуде периодической составляющей тока:

в относительных единицах

$$i_{уд.\,дв} \approx \sqrt{2} i''_{дв0}$$

или в амперах

$$i_{уд.\,дв} \approx \sqrt{2} i''_{дв0} I_{ном.\,дв}.$$

Уравнение (2.7.43) при этом допущении используют в форме

$$I_{уд\,\Sigma} = \sqrt{\left(i''_0\gamma + i''_{дв0\,(б)}\right)^2 + 2 i''^2_0 \gamma_а^2}. \quad (2.7.47)$$

Такое допущение достаточно обосновано для СЭЭС малой и средней мощности. С ростом мощности СЭЭС при таком подходе может иметь место недооценка величины ударного тока двигателей.

## § 2.7.7. РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ УТОЧНЕННЫМ АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

При аналитическом методе расчета токов к. з. СЭЭС их синхронные генераторы, работающие параллельно, заменяются одним эквивалентным или система с параллельно работающими генераторами эквивалентируется подсистемами с одиночными генераторами, работающими на независимые эквивалентные

цепи к. з. Аналогично асинхронная нагрузка обычно эквивалентируется в каждом из указанных случаев одним эквивалентным двигателем (см. § 2.7.3). Поэтому уточненный аналитический метод расчета рассматривается далее применительно к СЭЭС с одним генератором (эквивалентным генератором) и одним двигателем (эквивалентным двигателем) в соответствии с рис. 2.7.9. Для упрощения аналитического описания процесса изменения тока к. з. синхронного генератора с автоматическим регулятором напряжения (АРН) вначале рассмотрим процесс к. з. генератора без АРН.

Процесс изменения периодической составляющей тока к. з. генератора в относительных единицах при принятой базисной единице тока $I_б$ удобно описывать как изменение действующих значений периодической составляющей тока к. з. $i$.

*При отсутствии АРН* периодическая составляющая тока к. з. синхронного генератора $i$ в любой момент времени представляется в виде суммы трех составляющих (рис. 2.7.10): установившегося тока $i_\infty$, свободного переходного тока $\Delta i'$ и свободного сверхпереходного тока $\Delta i''$.

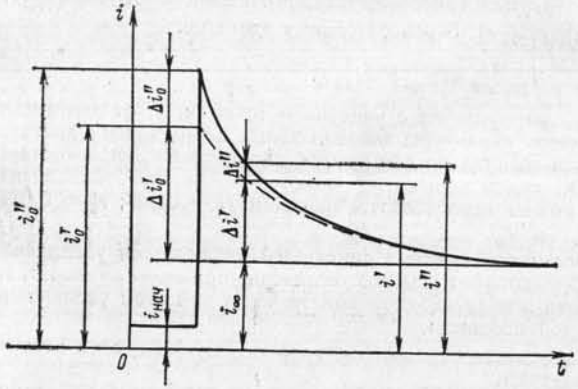



Рис. 2.7.10. График изменения составляющих периодического тока к. з. генератора без АРН.
$i_{нач}$ — ток начального режима.

Сумма установившегося и свободного переходного токов $i' = i_\infty + \Delta i'$ называется переходным током. Сумма переходного и свободного сверхпереходного токов $i'' = i' + \Delta i''$ называется сверхпереходным током. В целом $i = i_\infty + \Delta i' + \Delta i''$.

Свободный переходный ток, его продольная и поперечная составляющие затухают с постоянной времени

$$T'_d = T_{d0}\frac{(x'_d + x)(x_q + x) + (r_a + r)^2}{(x_d + x)(x_q + x) + (r_a + r)^2}, \qquad (2.7.48)$$

где $T_{d0}$ — постоянная времени контура обмотки возбуждения синхронного генератора при разомкнутом статоре.

Затухание продольной составляющей свободного сверхпереходного тока определяется постоянной времени $T''_d$, а поперечной составляющей — постоянной времени $T''_q$. В связи с малостью и относительно небольшим различием этих постоянных времени по величине в большинстве практических расчетов можно считать, что $T''_q = T''_d$ и что оба процесса затухают с постоянной времени

$$T''_d = T''_{d0}\frac{(x''_d + x)(x''_q + x) + (r_a + r)^2}{(x'_d + x)(x''_q + x) + (r_a + r)^2}. \qquad (2.7.49)$$



Здесь сопротивления линии генератора могут быть отнесены к сопротивлениям генератора или к сопротивлениям цепи к. з. $r$ и $x$;

$$T''_{d0} = T''_{dг}\frac{x'_d}{x''_d},$$

где $T''_{dг}$ — постоянная времени затухания сверхпереходного процесса при к. з. на зажимах СГ, а $x''_d$ и $x'_d$ — без учета сопротивления линии.

Изменение действующего значения периодической составляющей тока к. з. генератора во времени описывается уравнением

$$i = i_\infty + \Delta i'_0 \exp\left(-t/T'_d\right) + \Delta i''_0 \exp\left(-t/T''_d\right), \qquad (2.7.50)$$

где $\Delta i'_0 = i'_0 - i_\infty$; $\Delta i''_0 = i''_0 - i'_0$.

Начальные значения свободного переходного $\Delta i'_0$ и сверхпереходного $\Delta i''_0$ токов определяются после расчета начальных значений переходного и сверхпереходного токов по уравнениям (2.7.27), (2.7.33) и установившегося тока по уравнению (2.7.21) или в соответствии с § 4.3.2. Следует заметить при этом, что расчет установившегося тока с учетом насыщения и использование в расчетах насыщенного значения индуктивного сопротивления $x''_d$ обеспечивают приближенный учет насыщения генератора.

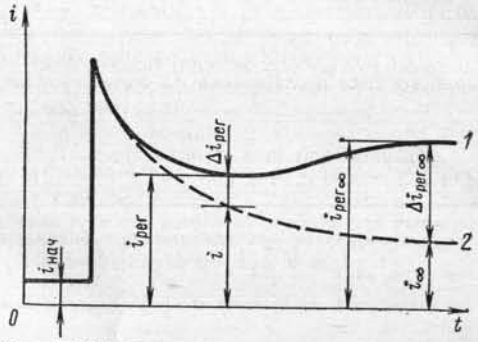



Рис. 2.7.11. График изменения периодической составляющей тока к. з. генератора с АРН (кривая *1*) и без АРН (кривая *2*).
$i$ — ток при отсутствии АРН; $\Delta i_{рег}$ — составляющая тока, возникающая под действием АРН.

*При наличии АРН* периодическая составляющая тока в любой момент времени может быть представлена в виде суммы $i_{рег} = i + \Delta i_{рег}$, что для общего случая АРН иллюстрируется рис. 2.7.11. Соответственно в установившемся режиме $i_{рег\infty} = i_\infty + \Delta i_{рег\infty}$.

Составляющую $\Delta i_{рег}$ можно выразить в виде $\Delta i_{рег} = \Delta i_{рег\infty} f(t)$, где $\Delta i_{рег\infty} = i_{рег\infty} - i_\infty$. Функция $f(t)$ определяет изменение составляющей тока возбуждения, возникающей под действием АРН [13].

Для генераторов с самовозбуждением в предположении, что при коротком замыкании происходит скачкообразное изменение напряжения возбуждения $u_f$ по единичной функции,

$$f(t) = 1 - \exp\left(-t/T'_d\right) \text{ и } \Delta i_{рег} = \Delta i_{рег\infty}\left[1 - \exp\left(-t/T'_d\right)\right].$$

В результате

$$i_{рег} = i + \Delta i_{рег} = i_{рег\infty} + \Delta i'_{рег0}\exp\left(-t/T'_d\right) + \Delta i''_0 \exp\left(-t/T''_d\right), \qquad (2.7.51)$$

где $\Delta i'_{рег0} = i'_0 - i_{рег\infty}$; $\Delta i''_0 = i''_0 - i'_0$.

В итоге это уравнение свелось к уравнению (2.7.50) при использовании соответствующего значения установившегося тока. Индекс «рег» далее опускается.

Установившийся ток при наличии АРН определяется по потолочному току возбуждения $i_{f\,пот}$. В случае ССГ ток к. з. изменяется монотонно до $i_{рег\infty}$ подобно процессу при отсутствии АРН по рис. 2.7.10.

Изменение апериодической составляющей тока генератора описывается уравнением

$$i_a = \sqrt{2} i''_0 \exp\left(-t/T_a\right), \qquad (2.7.52)$$

при

$$T_a = \frac{\left(x''_d + x\right) + \left(x''_q + x\right)}{\omega \cdot 2\left(r_a + r\right)} \text{ или } T_a \approx \frac{x''_d + x}{\omega\left(r_a + r\right)} = \frac{x_\Sigma}{\omega r_\Sigma}. \qquad (2.7.53)$$

Здесь $T_a$ — постоянная времени апериодической составляющей тока генератора, с; $r$ и $x$ — сопротивления цепи к. з. (если сопротивления линии от генератора до ГРЩ отнесены к $x''_d$ и $r_a$); $r_\Sigma$ и $x_\Sigma$ — составляющие результирующего сопротивления контура к. з.

Для генератора изменение огибающей максимальных мгновенных значений полного тока описывается на основе уравнений (2.7.50)—(2.7.52) как

$$i_г = \sqrt{2} i + i_a.$$

Ударный ток к. з. генератора наступает в конце первого полупериода при $t \approx T/2 = \pi/\omega$ с, что при 50 Гц ($\omega = 314$ рад/с) составляет 0,01 с. Для времени $t$ и постоянных времени в секундах ударный ток к. з. генератора в относительных единицах к $I_б$ определится уравнением

$$i_{уд.\,г} = \sqrt{2}\left[i_\infty + \Delta i'_0 \exp\left(-\pi/\omega T'_d\right) + \Delta i''_0 \exp\left(-\pi/\omega T''_d\right)\right] + \\ + \sqrt{2} i''_0 \exp\left(-\pi/\omega T_a\right), \qquad (2.7.54)$$

У генераторов $T'_d \gg T''_d$. В связи с этим в течение нескольких первых полупериодов периодическая составляющая тока генератора при приближенных расчетах может определяться исходя из пренебрежения затуханием переходного тока, т. е. в предположении $i_\infty = i'_0$, что дает

$$i \approx i'_0 + \Delta i''_0 \exp\left(-t/T''_d\right). \qquad (2.7.55)$$

В этом случае соответственно изменяется и уравнение для определения ударного тока.

Расчет тока к. з. эквивалентного асинхронного двигателя производится в соответствии с § 2.7.6 и 2.7.9. В результате изменение действующего значения периодической составляющей тока двигателя в общих относительных единицах, обозначенных индексом (б), описывается уравнением

$$i_{п.\,дв\,(б)} = i_{дв0\,(б)} \exp\left[-t\omega r'_2/\left(x''_{дв} + x\right)\right],$$

а апериодической составляющей — уравнением

$$i_{а.\,дв\,(б)} = \sqrt{2} i''_{дв0\,(б)} \exp\left[-t\omega\left(r_1 + r\right)/\left(x''_{дв} + x\right)\right].$$

Ударный ток к. з. эквивалентного асинхронного двигателя выражается на основе этих уравнений подобно ударному току генератора при $t\omega = \pi$.

Ударный ток цепи к. з. при общих базисных единицах рассчитывается как сумма ударного тока генератора и ударного тока двигателя:

$$i_{уд\,\Sigma} = i_{уд.\,г} + i_{уд.\,дв\,(б)}.$$

Периодическая составляющая тока цепи к. з. в любой момент времени равна сумме периодических составляющих тока генератора и двигателя: $i_{п\Sigma} = i_{п.\,г} + i_{п.\,дв\,(б)}$. Апериодическая составляющая тока цепи к. з. определяется суммой их апериодических составляющих: $i_{а\Sigma} = i_{а.\,г} + i_{а.\,дв\,(б)}$.

Действующее значение полного тока цепи к. з. за период в любой заданный момент времени $I_t$ вычисляется в относительных единицах при общем базисном токе $I_б$ или в физических единицах на основе суммарной периодической составляющей токов генератора и двигателя $i_{п\Sigma}$ и суммарной апериодической составляющей их токов $i_{а\Sigma}$ в заданные моменты по уравнению (2.7.43). При этом действующее значение ударного тока определяется при $t = T/2 = \pi/\omega$ с.

Тепловой импульс тока цепи к. з. удобно определять по действующим значениям полного тока за период на заданные моменты времени, соответствующие концу нечетных полупериодов тока. Для этого величина $B$ представляется в виде суммы

$$B = \int_0^t i^2\,dt \approx \sum_{j=1}^{n} \int_{(j-1)\,T/2}^{(j+1)\,T/2} i^2\,dt = \sum_{j=1}^{n} I^2_{jT/2} T, \qquad (2.7.56)$$

где $j = 1, 3, 5, \ldots, n$.

Для вычисления суммарного теплового импульса предварительно рассчитывают действующие значения полного тока цепи к. з. в заданные моменты времени. Тепловой импульс за первый период вычисляют по действующему значению ударного тока за период ($t = T/2$). При ручных расчетах последующие интервалы времени для $t > T/2$ можно и целесообразно увеличивать.

Косинус $\varphi$ контура к. з. определяется уравнением

$$\cos\varphi_{к.\,з} = \frac{r_a + r}{\sqrt{\left[\left(x''_d + x''_q\right)/2 + x\right]^2 + \left(r_a + r\right)^2}} \qquad (2.7.57)$$

или

$$\cos\varphi_{к.\,з} \approx \frac{r_a + r}{\sqrt{\left(x''_d + x\right)^2 + \left(r_a + r\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(x_\Sigma/r_\Sigma\right)^2 + 1}}, \qquad (2.7.58)$$

Форсировка возбуждения до $i_{f\,пот}$ обеспечивается только при $u < 1$. Поэтому для удаленных к. з. необходим контроль результатов расчета по условию $u = I_{уд\,\Sigma} z < 1$. В случае $u \gg 1$ действующее значение периодической составляющей тока к. з. следует рассчитывать как $i = 1/z$ или в физических единицах $I = U_{ном}/\sqrt{3}\,Z$.

Опыт работы показывает, что уточненный аналитический метод оказывается особенно эффективным при использовании отлаженных алгоритмов и программ для расчетов на ЦВМ.

## § 2.7.8. МЕТОД РАСЧЕТНЫХ КРИВЫХ ПОЛНОГО ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

**Общие сведения.** По методу расчетных кривых полного тока короткого замыкания определяются максимальные токи к. з. и тепловой импульс тока для проверки электрооборудования на их воздействие. Сущность метода состоит в том, что для ЭЭС с типовыми структурами и определенными генераторами при наиболее тяжелом (максимальном) в отношении токов к. з. длительном режиме рассчитываются зависимости различных значений токов и теплового импульса тока от времени при различных сопротивлениях контура к. з. Для удобства использования эти зависимости преобразуются в зависимости токов и теплового импульса от модуля полного сопротивления контура к. з. в общих относительных единицах системы. Последние и задаются в виде кривых на заданные моменты времени, а для начальных моментов времени, когда влияние апериодической составляющей тока значительно, еще и для различных отношений $x/r$ цепи. В технических материалах эти зависимости приводятся как стандартные расчетные кривые для определения токов к. з. в СЭЭС типового состава и структуры.

В практике береговых ЭЭС используются только расчетные кривые периодической составляющей тока к. з. Ранее для СЭЭС использовались подобные расчетные кривые, разработанные в разных вариантах кандидатами технических наук К. П. Иоржем и Г. С. Яковлевым.

Общим преимуществом метода расчетных кривых, особенно расчетных кривых полного тока, являются простота, малые время и трудоемкость расчетов,

Основной недостаток использования стандартных расчетных кривых для СЭЭС, у которых параметры несколько отличаются от типовых, — невысокая точность расчетов токов.

Расчетные кривые полного тока к. з. впервые для СЭЭС теоретически и методологически обоснованы д-ром техн. наук Л. П. Веретенниковым в 1964 г. Применение ЦВМ позволило при разработке проводить уточненные расчеты кривых по математическим моделям на основе полных дифференциальных уравнений и создать многочисленные разновидности расчетных кривых в форме альбомов.

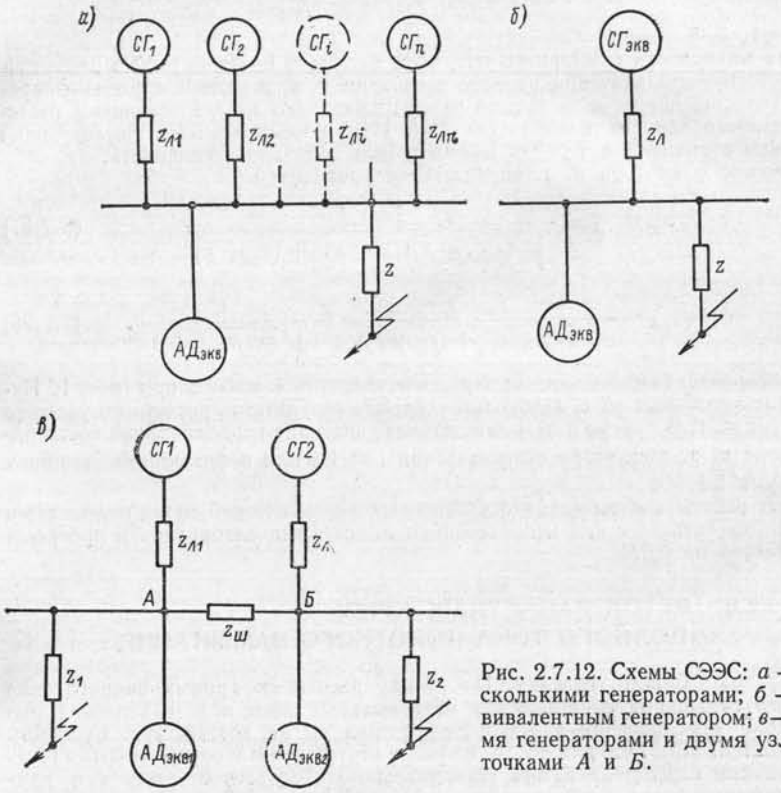



Рис. 2.7.12. Схемы СЭЭС: *а* — с несколькими генераторами; *б* — с эквивалентным генератором; *в* — с двумя генераторами и двумя узловыми точками *А* и *Б*.

Разработанные к настоящему времени алгоритмы и программы расчета токов к. з. обеспечивают оперативное получение расчетных кривых на ЦВМ непосредственно в виде таблиц и графиков. В связи с этим появилась возможность получать с помощью ЦВМ при малой затрате общего времени и использовать в процессе проектирования специальные расчетные кривые, учитывающие специфичный состав, необходимую деталировку по структуре и параметры элементов СЭЭС конкретных проектов. При этом для цепей к. з., примыкающих к различным узловым точкам систем, например к точкам *А* и *Б* (рис. 2.7.12, *в*), могут оформляться различные варианты специальных расчетных кривых.

Точность расчетов при использовании специальных расчетных кривых значительно повышается и определяется в основном точностью исходных данных, эквивалентирования и математической модели.

Стандартные расчетные кривые полного тока созданы в различных вариантах как применительно к упрощенной типовой эквивалентной структуре СЭЭС с однотипными генераторами (рис. 2.7.12, *б*), так и для систем с определенными типовыми сочетаниями различных генераторов, работающих параллельно на общую узловую точку (рис. 2.7.12, *а*).



При разработке стандартных расчетных кривых длина кабельной линии генератора принята равной 10 м. Их не следует использовать при наличии в главных цепях ЭЭС реакторов или кабелей длиной более 50 м, когда сопротивление генераторной цепи заметно отличается от принятого при расчетах кривых.

Номинальная мощность на валу эквивалентного двигателя $P_{дв}$ принята равной 0,75 от суммарной номинальной активной мощности параллельно работающих генераторов.

В каждом из вариантов задаются три вида кривых: ударных токов, действующих токов и теплового импульса тока. Расчетные кривые токов к. з. и теплового импульса тока приводятся в функции расчетного сопротивления $z_{расч}$ и отношения $x/r$ цепи от ГРЩ до точки к. з. Под расчетным сопротивлением понимается полное сопротивление контура к. з., вычисленное при замещении генераторов через сверхпереходное индуктивное сопротивление $x''_d$, а для генераторов без демпферных обмоток — через сопротивление $x'_d$. Расчетные сопротивления, как и токи к. з., задаются в номинальных относительных единицах того эквивалентного или автономного генератора, при использовании которого производится обращение к расчетным кривым.

Стандартные кривые рассчитывались и используются в основном при учете в линии генератора и цепи к. з. только сопротивлений кабелей. При учете в линиях сопротивлений шинных участков и при к. з. вблизи ГРЩ отношение $x/r$ следует брать для цепи от зажимов генератора до точки к. з.

На рис. 2.7.13—2.7.15 в качестве примера приведены расчетные кривые полного тока СЭЭС с генераторами МСК1875-1500 и МСК1560-1500.

Расчетные кривые ударных токов к. з. (см. рис. 2.7.13) даются в виде зависимости $i = f_1(z_{расч})$ для различных отношений $x/r$ цепи от ГРЩ до точки к. з. Здесь $i$ — ударный ток к. з. в общих о. е.

Расчетные кривые действующих значений токов к. з. (см. рис. 2.7.14) задают зависимости $I = f_2(z_{расч})$ для различных значений времени, а при $t = 0{,}01$ с и $t = 0{,}03$ с — еще и для различных отношений $x/r$ цепи от ГРЩ до точки к. з.

Расчетные кривые теплового импульса тока к. з. (см. рис. 2.7.15) определяют значения $B = \int_0^t i^2 dt = f_3(z_{расч})$ для различных моментов времени от 0,1 до 1,0 с. Для таких значений времени влияние отношения $x/r$ незначительно и его можно не учитывать.

В расчетных кривых токи даются в относительных единицах к $I_б = S_б/\sqrt{3}U_б$ эквивалентного генератора.

**Определение токов по расчетным кривым.** Для каждой точки к. з. составляют расчетную схему замещения (рис. 2.7.16, *а*) без учета эквивалентного двигателя. ЭДС генераторов при этом методе не рассчитывают. Вычисление сопротивлений в начальной части расчета ведется обычно в физических единицах. При этом методе для расчета токов могут использоваться два подхода.

Расчет по общему изменению тока генераторов ведется в том случае, когда различие в удалении генераторов от ГРЩ и в их постоянных времени невелико или отсутствует совсем. Стандартные расчетные кривые для СЭЭС с параллельно работающими генераторами, имеющими близкие постоянные времени, разработаны на основе замены генераторов одним эквивалентным со средневзвешенной постоянной времени, определяемой по формуле (2.7.14). При отсутствии стандартных расчетных кривых для СЭЭС с параллельной работой генераторов разного типа расчетные кривые токов могут строиться как приближенные, усредненные применительно к $x''_{d\,экв}$ на основе кривых для СЭЭС с индивидуальными генераторами. Значение теплового импульса тока цепи к. з. во всех случаях можно определять по кривым, соответствующим тому генератору, для которого получаются большие величины импульса.

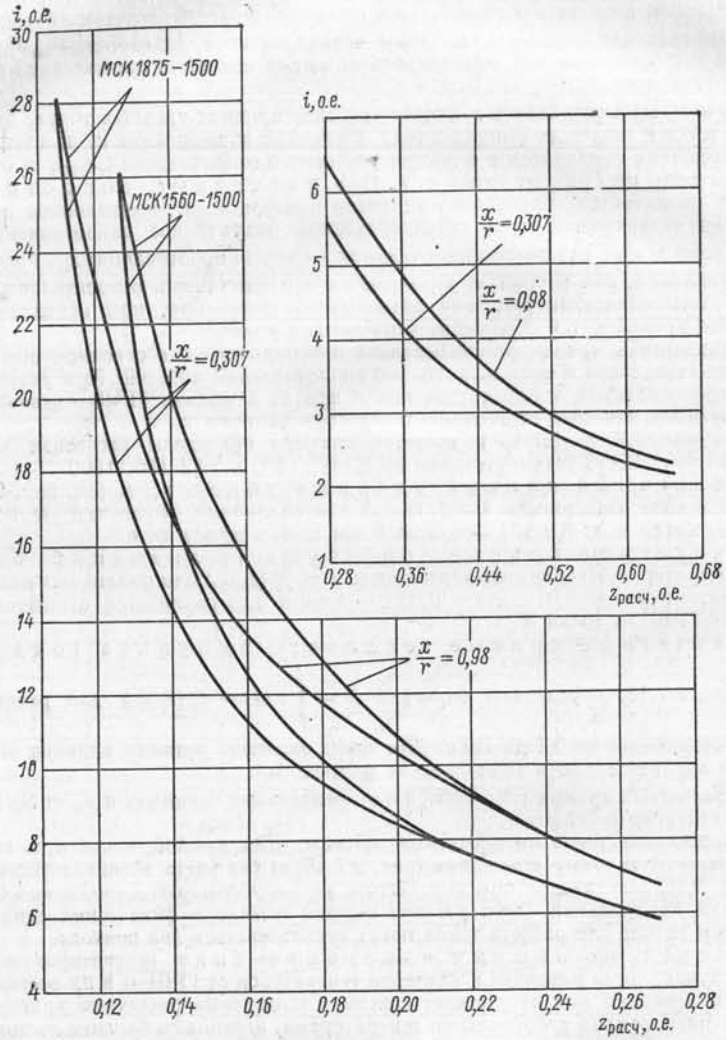



Рис. 2.7.13. Расчетные кривые ударных токов к. з. генераторов МСК1875-1500 и МСК1560-1500.



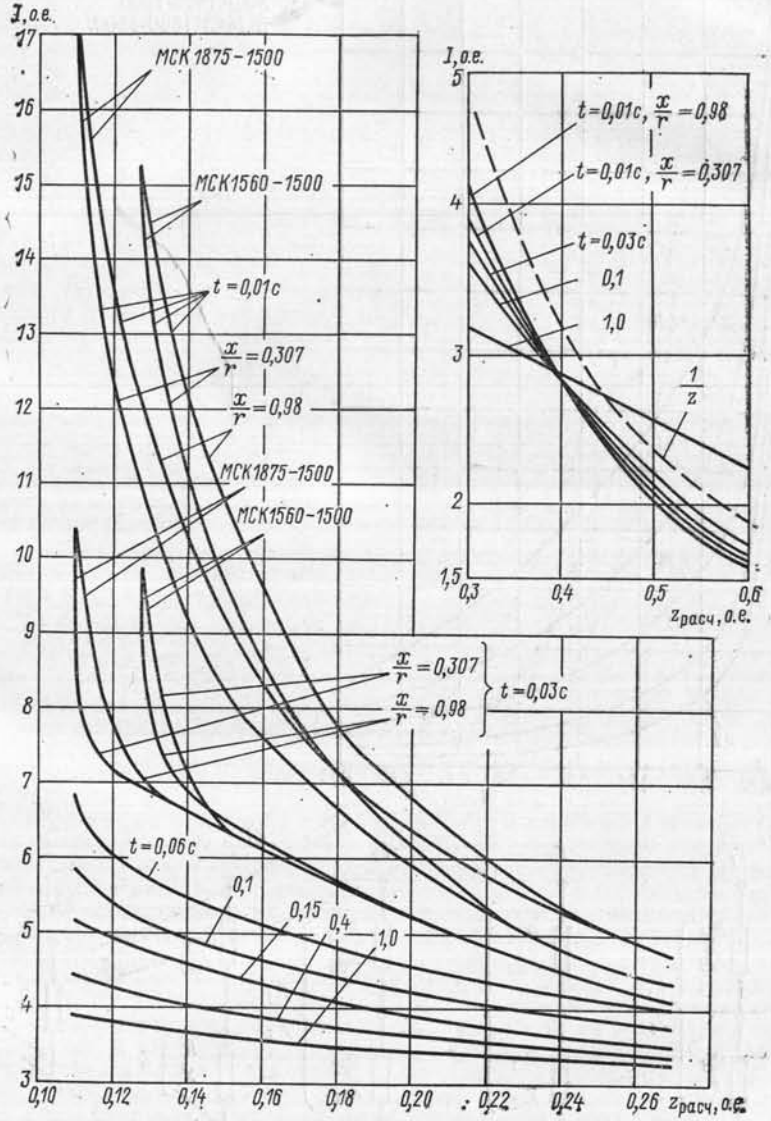



Рис. 2.7.14. Расчетные кривые действующих значений токов к. з. генераторов МСК1875-1500 и МСК1560-1500.

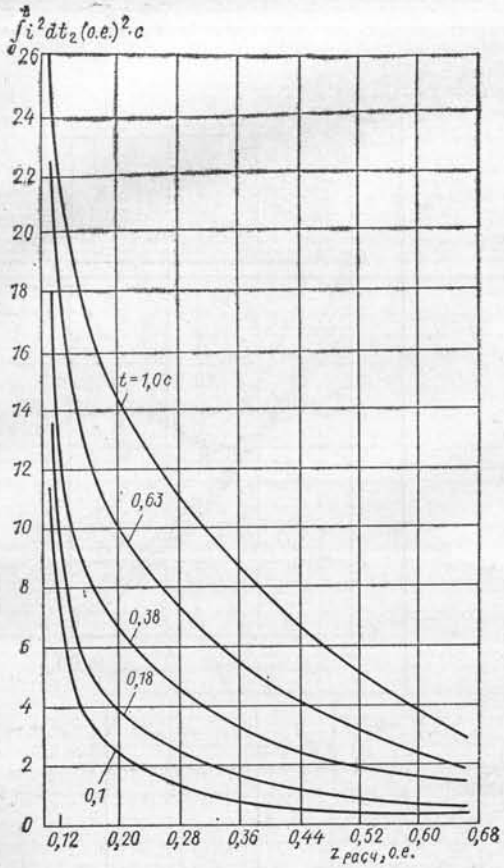



Рис. 2.7.15. Расчетные кривые теплового импульса тока для генераторов МСК1875-1500 и МСК1560-1500.

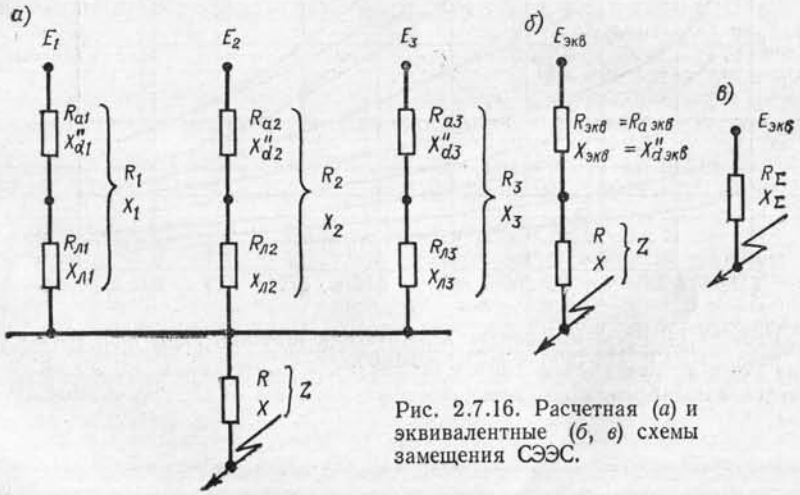



Рис. 2.7.16. Расчетная (*а*) и эквивалентные (*б*, *в*) схемы замещения СЭЭС.



При таком расчете генераторы замещают одним эквивалентным, преобразуя расчетную схему замещения (см. рис. 2.7.16, *а*) в эквивалентную схему замещения с одним генератором (рис. 2.7.16, *б*) в соответствии с формулами (2.7.8)—(2.7.13).

Эквивалентную схему замещения (см. рис. 2.7.16, *б*) приводят к простейшему виду (рис. 2.7.16, *в*) и вычисляют составляющие результирующего сопротивления

$$R_\Sigma = R_{экв} + R; \quad X_\Sigma = X_{экв} + X$$

и результирующее полное сопротивление

$$Z_\Sigma = \sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}. \qquad (2.7.59)$$

При необходимости определяют приближенные значения составляющих сопротивления линии эквивалентного генератора на основе уравнения

$$\frac{1}{Z_{л.\,экв.\,г}} \approx \frac{1}{Z_{л.\,г1}} + \frac{1}{Z_{л.\,г2}} + \cdots + \frac{1}{Z_{л.\,г\,i}} + \cdots + \frac{1}{Z_{л.\,г\,n}},$$

где $Z_{л.\,г\,i}$ — комплексные сопротивления линий отдельных генераторов.

Составляющие суммарного сопротивления линии эквивалентного генератора и цепи к. з. определяют как

$$R_{л\Sigma} = R_{л.\,экв.\,г} + R;$$
$$X_{л\Sigma} = X_{л.\,экв.\,г} + X.$$

Далее вычисляют нужное отношение $x/r$ цепи от ГРЩ до точки к. з. или от генератора до точки к. з.

Вычисление $\cos\varphi_{к.\,з}$ производится по уравнению (2.7.58).

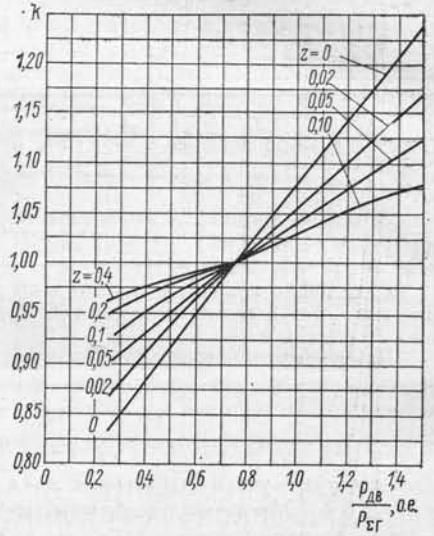



Рис. 2.7.17. Кривые для определения значений поправочного коэффициента к расчетам ударных токов систем с $f = 50$ Гц и генераторами мощностью более 1250 кВт.

Расчет по индивидуальному изменению токов отдельных генераторов используется тогда, когда имеется значительное различие в удалении генераторов от ГРЩ или в их постоянных времени. Замещение генераторов одним эквивалентным в этом случае может дать заметную погрешность, хотя для случаев, встречающихся на практике, она обычно не превышает 10%.

Систему с параллельно работающими генераторами в этом варианте расчета замещают несколькими эквивалентными подсистемами с генераторами, работающими на независимые эквивалентные цепи к. з. (см. § 2.7.2). Асинхронную нагрузку принимают распределенной между подсистемами пропорционально мощности генераторов.

Расчет по индивидуальному изменению может быть использован только для определения ударных токов цепи к. з., которые вычисляются путем суммирования ударных токов цепей к. з. эквивалентных подсистем.

После того или иного эквивалентирования определяют базисные единицы эквивалентной системы (подсистемы) и вычисляют модуль полного результирующего сопротивления при номинальных базисных единицах того генератора, для которого будет производиться обращение к расчетным кривым. Это сопротивление в относительных единицах называется расчетным и определяется как

$$z_{расч} = Z_\Sigma / Z_б.$$

Далее по соответствующим кривым для необходимого $x/r$ находят значения токов и теплового импульса тока.

Если отношение $x/r \leqslant 0{,}307$, то определение токов производят по кривым $x/r = 0{,}307$. При значениях отношения $0{,}307 < x/r < 0{,}98$ токи определяют линейной интерполяцией в соответствии с формулой

$$i = i_1 + \frac{i_2 - i_1}{x_2/r_2 - x_1/r_1}(x/r - x_1/r_1), \qquad (2.7.60)$$

где $i_1$ — значение тока для заданного $z_{\text{расч}}$ по кривой при $x_1/r_1$ меньшем, чем $x/r$; $i_2$ — то же при отношении $x_2/r_2$ большем, чем $x/r$. При $x/r > 0{,}98$ кривые можно использовать только для грубой оценки токов к. з., полагая $x/r = 0{,}98$.

Значения токов в физических единицах вычисляют как ($i$ о. е.)$I_{\text{Б}}$ кА и ($I$ о. е.)$I_{\text{Б}}$ кА, а значение $B = \int_0^t i^2 dt$ в физических единицах — как $I_{\text{Б}}^2 \int_0^t i^2 dt$ кА$^2$·с.

В случае, когда $z_{\text{расч}}$ превышает величины, указанные на графиках, значение ударного тока к. з. находят как $i_{\text{уд}} \approx \sqrt{2}/z$ о. е., а действующее значение тока — как $I \approx 1/z$ о. е.

Если точка кривой, определяющая действующее значение полного тока $I$ (см. рис. 2.7.14), лежит выше кривой $1/z$, то ток также определяется по уравнению $I \approx 1/z$ о. е.

При существенном отличии фактического отношения $P_{\text{дв}}/P_{\Sigma\text{г}}$ от 0,75 находят значение поправочного коэффициента $k$ по кривым на рис. 2.7.17 и уточняют значение ударного тока как $i_{\text{уд. ут}} = i_{\text{уд}}k$.

## § 2.7.9. УПРОЩЕННЫЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

### РАСЧЕТ ЗНАЧЕНИЙ УДАРНОГО ТОКА ЦЕПИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Эквивалентная схема замещения при данном расчете получается на основе расчетной схемы замещения так же, как и в методе расчетных кривых, однако в этом случае в соответствии с рис. 2.7.12 в схеме замещения сохраняется эквивалентный асинхронный двигатель. Расчет эквивалентных и результирующих сопротивлений цепей производится в соответствии с § 2.7.3 и 2.7.8.

Токи к. з. от эквивалентного генератора определяются по упрощенным уравнениям с учетом рекомендаций, приведенных в § 2.7.3—2.7.8.

Начальное действующее значение периодической составляющей тока в относительных единицах рассчитывается без учета явнополюсности по уравнению

$$i''_0 = \frac{e''_{d0}}{z_\Sigma}$$

при

$$z_\Sigma = \sqrt{(x''_{d\ \text{экв}} + x)^2 + (r_{a\ \text{экв}} + r)^2}, \qquad (2.7.61)$$

где $z_\Sigma$ — результирующее сопротивление, о. е.

При одинаковых базисных единицах $z_\Sigma = z_{\text{расч}}$. Сопротивления линии генератора здесь и далее отнесены к сопротивлениям генератора.

Начальное значение сверхпереходной ЭДС в относительных единицах определяется по формуле (2.7.36)

$$e''_{d0} = u_{\text{нач}} + i_{\text{нач}} x''_{d\ \text{экв}} \sin \varphi_{\text{нач}}.$$



Ударный ток к. з. эквивалентного генератора в килоамперах находится по формуле (2.7.4) $i_{\text{уд. г}} = (\gamma + \gamma_{\text{а}})\sqrt{2} i''_0 I_{\text{б}}$.

При этом коэффициент $\gamma_{\text{а}}$ определяется по кривым рис. 2.7.3 в зависимости от отношения $X_\Sigma/R_\Sigma$ для всего контура к. з.

Коэффициент затухания периодической составляющей тока генератора $\gamma$ на конец первого полупериода тока для судовых систем частотой 50 Гц с серийными генераторами (см. табл. 1.1.2 второго тома) определяется приближенно по кривым, приведенным на рис. 2.7.18, в зависимости от сопротивления $z_{\text{расч}}$ и эквивалентной постоянной времени $T''_{d\ \text{экв}}$ при трехфазном к. з. на зажимах СГ.

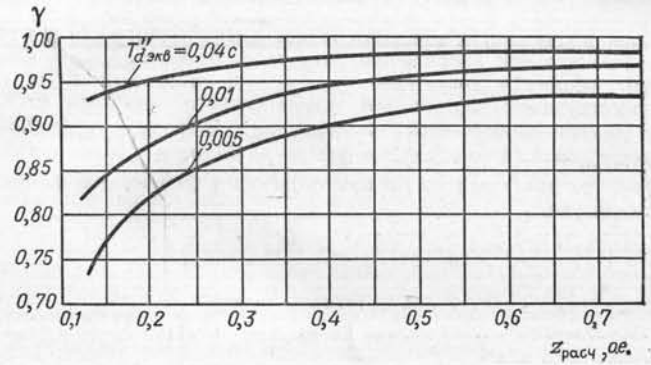



Рис. 2.7.18. Зависимости коэффициента затухания $\gamma$ на $t = 0{,}01$ с от величин $z_{\text{расч}}$ и $T''_{d\ \text{экв}}$.

Постоянная времени задается как средневзвешенная в соответствии с формулой (2.7.14).

Определение cos φ цепи к. з. производится по уравнению (2.7.58).

Коэффициент $\gamma$ при условии пренебрежения затуханием переходного тока и в предположении $e'_{d0} \approx e''_{d0}$ в общем случае может приближенно определяться по уравнению

$$\gamma = \frac{z_\Sigma}{z'_\Sigma} + \left(1 - \frac{z_\Sigma}{z'_\Sigma}\right) \exp\left(-\frac{t}{T''_{d\ \text{экв}}}\right), \qquad (2.7.62)$$

где $z'_\Sigma = \sqrt{(x'_{d\ \text{экв}} + x)^2 + (r_a + r)^2}$, $z_\Sigma$ вычисляется по уравнению (2.7.61), $T''_{d\ \text{экв}}$ — по (2.7.49) и $t = T/2$.

По уравнению (2.7.62) могут рассчитываться зависимости $\gamma = f(z_{\text{расч}}, T''_{d\ \text{экв}})$ как для конкретных СЭЭС, так и для СЭЭС с типовыми эквивалентными генераторами, аналогичные зависимостям, приведенным на рис. 2.7.18—2.7.21.

Расчет ударного тока цепи к. з. с учетом подпитки от эквивалентного двигателя * может производиться двумя способами.

**Способ итераций.** В первом приближении ($j = 1$) действующее значение суммарного ударного тока цепи к. з. в общих относительных единицах вычисляется в предположении $i''_{\text{дв}(j-1)} = 0$ по уравнению (2.7.43)

$$I_{\text{уд}\,j} = \sqrt{(i''_0\gamma + i''_{\text{дв (б)}\,j}\gamma_{\text{п. дв}})^2 + 2(i''_0\gamma_{\text{а}} + i''_{\text{дв (б)}\,j}\gamma_{\text{а. дв}})^2}, \qquad (2.7.63)$$

где $i''_{\text{дв (б)}\,j} = i''_{\text{дв}\,(j-1)} I_{\text{ном. дв}}/I_{\text{б}}$.

Остаточное напряжение на шинах в относительных единицах определяется как падение напряжения на цепи к. з. $u_j = I_{\text{уд}\,j} z$.

---

* Индексы «экв» и 0, характеризующие величины, относящиеся к эквивалентному двигателю, здесь опускаются.

Начальное значение сверхпереходного тока двигателя в относительных единицах к номинальному току двигателя $I_{\text{ном. дв}}$ (при $e''_{\text{дв}0} > u_j$)

$$i''_{\text{дв}\,j} = \frac{e''_{\text{дв}0} - u_j}{z''_{\text{дв}}}. \qquad (2.7.64)$$

Номинальный ток двигателя в килоамперах

$$I_{\text{ном. дв}} = \frac{P_{\text{ном. дв}}}{\sqrt{3}\,U_{\text{ном. дв}} \cos\varphi_{\text{ном. дв}} \eta_{\text{ном. дв}}}, \qquad (2.7.65)$$

где $P_{\text{ном. дв}}$ — номинальная мощность эквивалентного двигателя (на валу), кВт; $U_{\text{ном. дв}}$ — номинальное напряжение двигателя, В; $\cos\varphi_{\text{ном. дв}}$ — номинальный коэффициент мощности двигателя; $\eta_{\text{ном. дв}}$ — номинальный КПД двигателя.

По существующим нормам для эквивалентного двигателя СЭЭС средней мощности обычно принимается: $\cos\varphi_{\text{ном. дв}} = 0{,}8$; $\eta_{\text{ном. дв}} = 0{,}85$; $e''_{\text{дв}\,0} \approx$ $\approx 0{,}9$ о. е.; $z''_{\text{дв}} = 0{,}18$ о. е.; $z''_{\text{дв}} = 0{,}08 + j0{,}161$ о. е.

Ударный ток двигателя на $j$-м приближении в физических единицах вычисляется по формуле

$$i_{\text{уд. дв}\,j} = p_{\text{дв}} \sqrt{2} i''_{\text{дв}\,j} I_{\text{ном. дв}}$$

при

$$p_{\text{дв}} = \gamma_{\text{п. дв}} + \gamma_{\text{а. дв}};$$

$$\gamma_{\text{п. дв}} = \exp\left[-\pi r'_2/(x''_{\text{дв}} + x)\right];$$

$$\gamma_{\text{а. дв}} = \exp\left[-\pi (r_1 + r)/(x''_{\text{дв}} + x)\right].$$

Коэффициенты $\gamma_{\text{п. дв}}$ и $\gamma_{\text{а. дв}}$ можно найти по графическим зависимостям $\gamma = f(X/R)$ (см. рис. 2.7.3). Уточненные параметры $r_1$, $r'_2$ и $x''_{\text{дв}}$ в общем случае определяются при эквивалентировании асинхронной нагрузки.

Для асинхронной нагрузки преимущественно малой и средней мощности принимается $p \approx 1$ и ток в физических единицах вычисляется как

$$i_{\text{уд. дв}\,j} \approx \sqrt{2} i''_{\text{дв}\,j} I_{\text{ном. дв}}.$$

В этом случае расчет тока $I_{\text{уд}\,j}$ ведется по (2.7.47) и сверхпереходный ток двигателя $i''_{\text{дв}}$ учитывается приближенно как периодическая составляющая.

Суммарный ток цепи к. з. в физических единицах равен $i_{\text{уд}\,\Sigma\,j} = i_{\text{уд. г}} + i_{\text{уд. дв}\,j}$.

В последующих приближениях расчет тока повторяется начиная с уравнения (2.7.63), которое используется уже в соответствии с известным значением $i_{\text{дв (б)}}$ по предыдущему приближению. Расчет прекращается при достаточно близком совпадении двух последующих результатов.

Недостатком этого метода является наблюдающаяся иногда плохая сходимость итераций.

**Безытеративный способ *.** Основан на совместном решении уравнений (2.7.63)—(2.7.64) относительно $i''_{\text{дв}}$ в общих о. е. По этому методу вычисляются коэффициенты

$$a = z^2\left(\gamma^2_{\text{п. дв}} + \gamma^2_{\text{а. дв}}\right) - z''^2_{\text{дв (б)}}; \qquad (2.7.66)$$

$$b = 2\left[z^2 i''_0\left(\gamma\gamma_{\text{п. дв}} + \gamma_{\text{а}}\gamma_{\text{а. дв}}\right) + e''_{\text{дв}0} z''_{\text{дв (б)}}\right]; \qquad (2.7.67)$$

$$c = z^2 i''^2_0\left(\gamma^2 + 2\gamma^2_{\text{а}}\right) - e''^2_{\text{дв}0} \qquad (2.7.68)$$

* Предложен В. Ф. Кособоковым.



(где при $U_{\text{б. дв}} = U_{\text{б}}$ $z''_{\text{дв (б)}} = z''_{\text{дв}} I_{\text{б}}/I_{\text{ном. дв}}$) и корни квадратного уравнения

$$y_{1,2} = (-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac})/2a.$$

В качестве значения тока $i''_{\text{дв}}$ в общих о. е. выбирается меньший из двух положительных корней. Наличие одного отрицательного корня свидетельствует об отсутствии тока подпитки при $u > e''_{\text{дв}0}$.

## РАСЧЕТ ЗНАЧЕНИЙ ПОЛНОГО ТОКА ЦЕПИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗАДАННЫЕ МОМЕНТЫ ВРЕМЕНИ ПОСЛЕ ПЕРВОГО ПОЛУПЕРИОДА

Максимальное мгновенное и действующее значения полного тока обычно представляют интерес примерно до 0,05—0,08 с. Изменение периодической и апериодической составляющих тока для времени, превышающего один полупериод, можно рассчитывать через коэффициенты затухания $\gamma_t$ и $\gamma_{at}$ аналогично учету их изменения на $t = T/2$ через коэффициенты $\gamma$ и $\gamma_{\text{а}}$ (см. § 2.7.2). Ток эквивалентного двигателя при этом не учитывается.

Коэффициент $\gamma_t$ для судовых систем 50 Гц с имеющимися серийными генераторами можно определять по кривым, приведенным на рис. 2.7.19—2.7.21 в зависимости от сопротивления $z_{\text{расч}}$ и постоянной времени $T''_d$ или $T''_{d\,\text{экв}}$. Для $t \geqslant$ $\geqslant 0{,}06$ с постоянная времени $T''_d$ уже мало влияет на величину коэффициента $\gamma_t$ и по кривой, приведенной на рис. 2.7.21, не учитывается.

В общем же случае коэффициент $\gamma_t$ для нескольких первых полупериодов можно вычислять, так же как и коэффициент $\gamma$, по уравнению (2.7.62).

Коэффициент $\gamma_{at}$ находят по уравнению

$$\gamma_{at} = \exp\left(-\omega t R_\Sigma/X_\Sigma\right).$$

Для моментов времени на конец целого числа полупериодов $n = \omega t/\pi$ при обозначении

$$\frac{X_\Sigma/R_\Sigma}{n} = \frac{X_{\text{расч}\,n}}{R_{\text{расч}\,n}} \qquad (2.7.69)$$

имеет место $\gamma_{at} = \exp\left(-\pi n R_\Sigma/X_\Sigma\right) = \exp\left(-\pi R_{\text{расч}\,n}/X_{\text{расч}\,n}\right)$. В результате значение $\gamma_{at}$ на конец любого числа полупериодов $n$ можно определять по кривым рис. 2.7.3, пользуясь при этом в качестве аргумента величиной $X_{\text{расч}\,n}/R_{\text{расч}\,n}$.

Максимальное мгновенное значение полного тока к. з. (по огибающей кривой) в относительных единицах вычисляют по уравнению

$$i_t = (\gamma_t + \gamma_{at})\sqrt{2} i''_0.$$

Действующее значение полного тока в тех же единицах —

$$I_t = i''_0 \sqrt{\gamma_t^2 + 2\gamma_{at}^2}.$$

Для ориентировочного определения действующего значения полного тока к. з. судовых систем частотой 50 Гц при $t \geqslant 0{,}04$ используются кривые, приведенные на рис. 2.7.22 и 2.7.23. На рис. 2.7.23 под величиной $i_\infty$ необходимо понимать установившийся ток в относительных единицах при условии к. з. на зажимах генератора. Для эквивалентного генератора он может определяться как средневзвешенное значение установившихся токов к. з., взятых в относительных единицах отдельных генераторов.

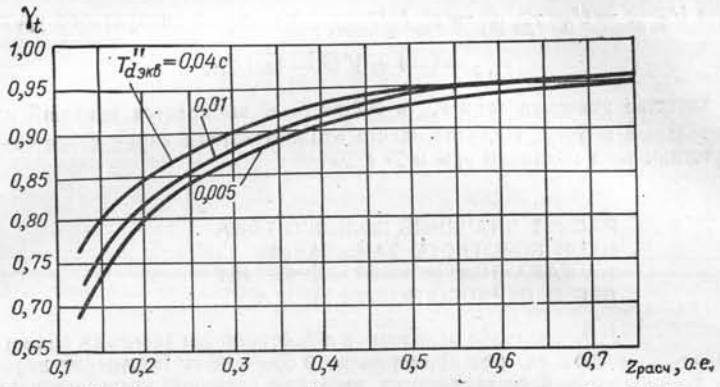



Рис. 2.7.19. Зависимости коэффициента затухания $\gamma_t$ на $t = 0{,}04$ с от величин $z_{расч}$ и $T''_{d\,экв}$.

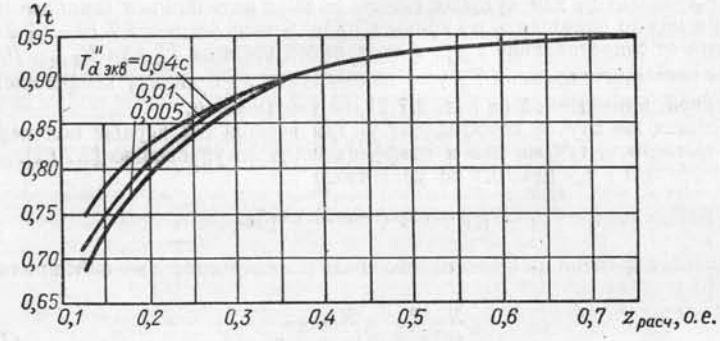



Рис. 2.7.20. Зависимости коэффициента затухания $\gamma_t$ на $t$=0,05 с от величин $z_{расч}$ и $T''_{d\,экв}$.

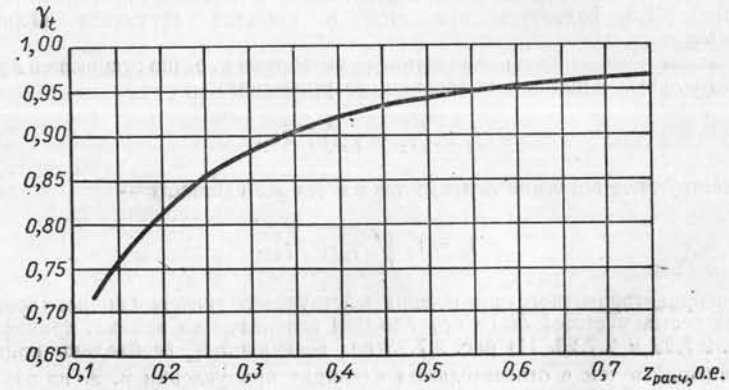



Рис. 2.7.21. Зависимость коэффициента затухания $\gamma_t$ на $t = 0{,}06$ с от величины $z_{расч}$.



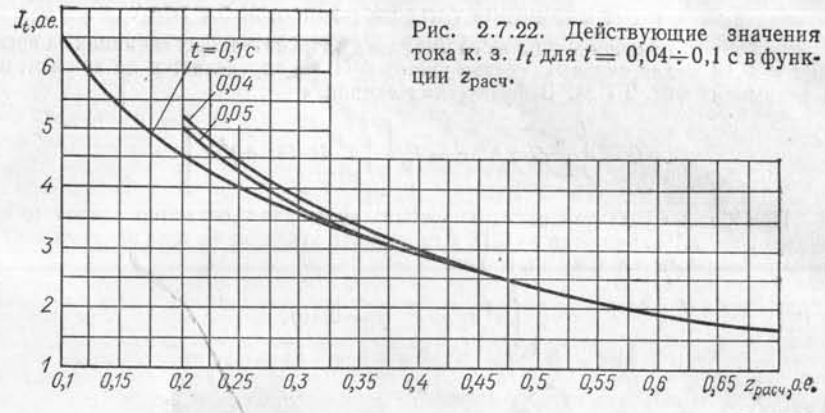



Рис. 2.7.22. Действующие значения тока к. з. $I_t$ для $t = 0{,}04 \div 0{,}1$ с в функции $z_{расч}$.

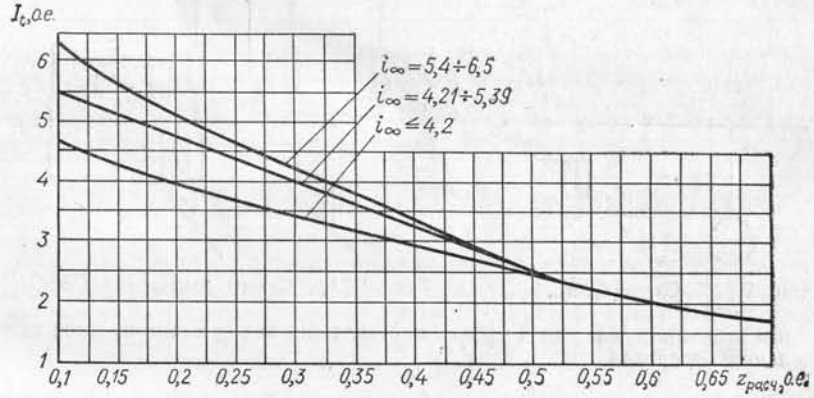



Рис. 2.7.23. Действующие значения тока к. з. $I_t$ для $t \geqslant 0{,}15$ с в функции $z_{расч}$ для генераторов с различными значениями установившегося тока $i_\infty$ при условии к. з. на их зажимах.

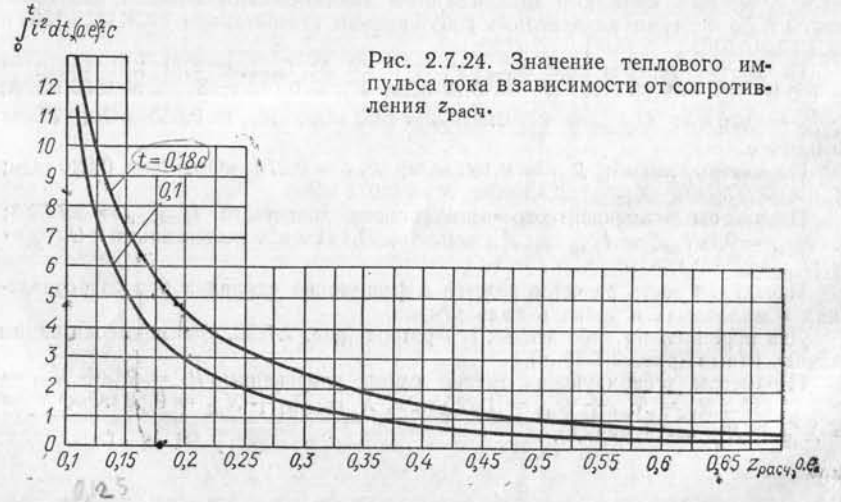



Рис. 2.7.24. Значение теплового импульса тока в зависимости от сопротивления $z_{расч}$.

## РОСТ ВЕЛИЧИНЫ ТЕПЛОВОГО ИМПУЛЬСА ТОКА

Значение теплового импульса в относительных единицах за время до $t = 0{,}18$ с для судовых систем частотой 50 Гц определяется по кривым, показанным на рис. 2.7.24. В физических единицах

$$B = \int_0^t i^2\,dt \ \text{кА}^2\cdot\text{с} = I_б^2\left[\int_0^t i^2\,dt \ \text{(о. е.)}^2\cdot\text{с}\right].$$

При большей длительности короткого замыкания величина теплового импульса в (о. е.)$^2\cdot$с за время от 0,18 с до момента отключения тока рассчитывается по установившемуся току к. з. как

$$\int_{0{,}18}^{t} i^2\,dt = i_\infty^2\,(t - 0{,}18).$$

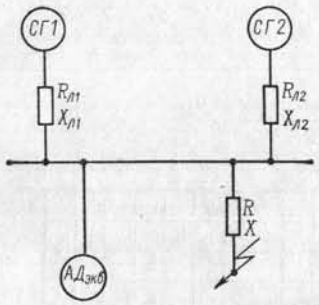



Рис. 2.7.25. Схема СЭЭС.

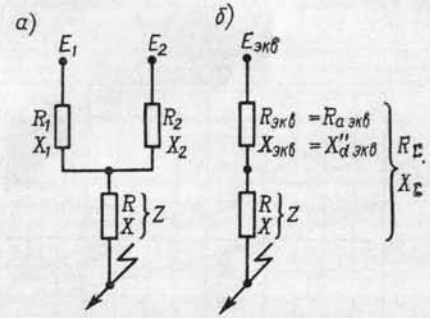



Рис. 2.7.26. Схемы замещения СЭЭС.

Полная величина теплового импульса определяется как сумма импульсов за два отдельных интервала

$$B = \int_0^t i^2\,dt = \int_0^{0{,}18} i^2\,dt + \int_{0{,}18}^{t} i^2\,dt. \qquad (2.7.70)$$

**Пример расчета токов к. з.** Требуется произвести расчет ударного тока методом расчетных кривых и приближенным аналитическим методом для СЭЭС (рис. 2.7.25) с двумя параллельно работающими генераторами МСК1875-1500 и МСК1560-1500.

Параметры генераторов: $S_{ном1} = 1875$ кВ·А; $I_{ном1} = 2{,}71$ кА; $U_{ном1} = 400$ В; $X''_{d1} = 9{,}35$ мОм; $R_{a1} = 0{,}72$ мОм; $T''_{d1} = 0{,}015$ с; $S_{ном2} = 1500$ кВ·А; $I_{ном2} = 2{,}26$ кА; $U_{ном2} = 400$ В; $X''_{d2} = 13{,}0$ мОм; $R_{a2} = 0{,}955$ мОм; $T''_{a2} = 0{,}019$ с.

Параметры линий: $R_{л1} = 0{,}190$ мОм; $R_{л2} = 0{,}270$ мОм; $R = 0{,}220$ мОм; $X_{л1} = 0{,}230$ мОм; $X_{л2} = 0{,}280$ мОм; $X = 0{,}078$ мОм.

Параметры эквивалентного асинхронного двигателя: $I_{ном.\,дв} = 3{,}72$ кА; $\cos\varphi_{ном} = 0{,}8$; $I_{нач} = I_{ном.\,дв}$; $z''_{дв} = 0{,}08 + j0{,}161$ о. е. с учетом линии и $U_{б.\,дв} = U_{ном.\,г}$.

Начальная часть расчетов ведется в физических единицах при сопротивлениях в миллиомах и токах в килоамперах.

Два параллельно работающих генератора (рис. 2.7.26, *а*) заменяются одним эквивалентным (рис. 2.7.26, *б*).

Параметры генерирующих ветвей схемы замещения: $R_1 = R_{a1} + R_{л1} = 0{,}91$ мОм; $R_2 = R_{a2} + R_{л2} = 1{,}225$ мОм; $X_1 = X''_{d1} + X_{л1} = 9{,}58$ мОм; $X_2 = X''_{d2} + X_{л2} = 13{,}28$ мОм.



Комплексное сопротивление эквивалентного генератора с учетом линии

$$Z_{экв} = R_{a\,экв} + jX''_{d\,экв} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}.$$

Из уравнений (2.7.13) и (2.7.12) следует

$$R_{a\,экв} \approx \frac{R_1 X_2^2 + R_2 X_1^2}{(X_1 + X_2)^2} = \frac{0{,}91\cdot 13{,}28^2 + 1{,}225\cdot 9{,}58^2}{(9{,}58 + 13{,}28)^2} = 0{,}522 \text{ мОм};$$

$$X''_{d\,экв} \approx \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2} = \frac{9{,}58\cdot 13{,}28}{9{,}58 + 13{,}28} = 5{,}57 \text{ мОм}.$$

Составляющие результирующего сопротивления контура к. з. (см. рис. 2.7.26, *б*)

$$R_\Sigma = R_{a\,экв} + R = 0{,}522 + 0{,}220 = 0{,}742 \text{ мОм};$$

$$X_\Sigma = X''_{d\,экв} + X = 5{,}57 + 0{,}078 = 5{,}65 \text{ мОм}.$$

Результирующее полное сопротивление

$$Z_\Sigma = \sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2} = \sqrt{0{,}742^2 + 5{,}65^2} = 5{,}69 \text{ мОм}.$$

Полное сопротивление цепи от ГРЩ до точки к. з.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{0{,}22^2 + 0{,}078^2} = 0{,}233 \text{ мОм}.$$

Отношение $x/r$ для цепи от ГРЩ до точки к. з.

$$\frac{x}{r} = \frac{X}{R} = \frac{0{,}078}{0{,}22} = 0{,}354.$$

Общие базисные величины

$$U_б = 400 \text{ В}; \quad I_б = I_{ном1} + I_{ном2} = 2{,}71 + 2{,}26 = 4{,}97 \text{ кА};$$

$$Z_б = \frac{U_б}{\sqrt{3} I_б} = \frac{400}{\sqrt{3}\cdot 4{,}97} = 46{,}6 \text{ мОм}.$$

По известным сопротивлениям $Z_\Sigma$, $Z$ и $Z_б$ определяются сопротивления $z_{расч}$ и $z$ в общих относительных единицах

$$z_{расч} = z_\Sigma = \frac{Z_\Sigma}{Z_б} = \frac{5{,}69}{46{,}6} = 0{,}122 \text{ о. е.};$$

$$z = \frac{Z}{Z_б} = \frac{0{,}233}{46{,}6} = 0{,}005 \text{ о. е.}$$

На этом этапе расчета для определения токов можно воспользоваться расчетными кривыми. Из расчетных кривых, приведенных на рис. 2.7.13 и 2.7.14, путем их соответствующего усреднения для системы с эквивалентным генератором получается

$$i_{уд} = 22{,}9 \text{ о. е.}; \quad I_{уд} = 14{,}1 \text{ о. е.}$$

В физических единицах

$$i_{уд} = 22{,}9\cdot 4{,}97 = 114 \text{ кА}; \quad I_{уд} = 14{,}1\cdot 4{,}97 = 70{,}1 \text{ кА}.$$

По упрощенному аналитическому методу расчет токов к. з. далее производят в следующем порядке (см. § 2.7.9):

1. Определяют начальные ЭДС и начальное значение периодической составляющей тока к. з. генераторов в общих относительных единицах

$$e''_{d0} = u_{нач} + i_{нач} x''_{d\ экв} \sin \varphi_{нач} = 1 + \frac{3,72}{4,97} \cdot \frac{5,57}{46,6} \cdot 0,6 = 1,054 \text{ о. е.};$$

$$i''_0 = \frac{e''_{d0}}{z_\Sigma} = \frac{1,054}{0,122} = 8,65 \text{ о. е.}$$

2. Вычисляют ударный ток к. з. от генераторов. Предварительно определяют

$$T''_{d\ экв} = \frac{T''_{d1} S_{ном1} + T''_{d2} S_{ном2}}{S_{ном1} + S_{ном2}} = \frac{0,015 \cdot 1875 + 0,019 \cdot 1500}{1875 + 1500} \approx 0,017 \text{ с.}$$

По рис. 2.7.18 $\gamma = 0,86$. Для контура к. з.

$$\frac{X_\Sigma}{R_\Sigma} = \frac{5,65}{0,742} = 7,6.$$

По рис. 2.7.3 находят соответствующее значение $\gamma_а = 0,66$. Тогда

$$i_{уд.\ г} = (\gamma + \gamma_а)\sqrt{2} i''_0 = (0,86 + 0,66)\sqrt{2} \cdot 8,65 = 18,5 \text{ о. е.}$$

В физических единицах $i_{уд.\ г} = 18,5 \cdot 4,97 = 92,0$ кА.

3. Ток подпитки от эквивалентного двигателя определим безытеративным методом в соответствии с уравнениями (2.7.66)—(2.7.68) и в предположении, что $i_{уд.\ дв} = \sqrt{2} i''_{дв0}$, $\gamma_{п.\ дв} = 1$, $\gamma_{а.\ дв} = 0$.

Ток двигателя рассчитывают в общих относительных единицах. Сопротивления двигателя в общих относительных единицах

$$z''_{дв\ (б)} = z''_{дв} \frac{I_б}{I_{б.\ дв}} = 0,18 \frac{4,97}{3,72} = 0,240 \text{ о. е.};$$

$$x''_{дв\ (б)} = x''_{дв} \frac{I_б}{I_{б.\ дв}} = 0,161 \frac{4,97}{3,72} = 0,215 \text{ о. е.}$$

Начальная ЭДС двигателя

$$e''_{дв0} = u_{нач} - i_{нач} x''_{дв} \sin \varphi_{нач} = 1 - \frac{3,72}{4,97} \cdot 0,215 \cdot 0,6 = 0,904 \text{ о. е.}$$

В соответствии с уравнениями (2.7.66)—(2.7.68) предварительно вычисляют коэффициенты

$$a = z^2 - z''^2_{дв\ (б)} = 0,005^2 - 0,240^2 = -0,0576;$$

$$b = 2\left(z^2 i''_0 \gamma + e''_{дв0} z''_{дв\ (б)}\right) = 2\left(0,005^2 \cdot 8,65 \cdot 0,86 + 0,904 \cdot 0,24\right) = 0,434;$$

$$c = z^2 i''^2_0 \left(\gamma^2 + 2\gamma_а^2\right) - e''^2_{дв0} = 0,005^2 \cdot 8,65^2 \left(0,86^2 + 2 \cdot 0,66^2\right) - 0,904^2 = -0,814;$$

$$y_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{-0,434 \pm \sqrt{0,434^2 - 4 \cdot 0,0576 \cdot 0,814}}{-2 \cdot 0,0576};$$

$$y_1 = 3,51;\ y_2 = 4,03.$$

В качестве значения тока двигателя принимают меньший положительный корень $i''_{дв} = 3,51$ общих о. е.

При номинальных базисных единицах двигателя $i''_{дв} = 4,69$ о. е., а расчет методом итераций в тех же единицах дает в первом приближении $i''_{дв} = 4,72$ о. е., во втором приближении $i''_{дв} = 4,66$ о. е.



Ударный ток к. з. двигателя при $i''_{дв}$ в общих относительных единицах

$$i_{уд.\ дв} = \sqrt{2} i''_{дв} I_б = \sqrt{2} \cdot 3,51 \cdot 4,97 = 24,6 \text{ кА.}$$

4. Суммарный ударный ток цепи к. з.:
амплитуда тока в физических единицах

$$i_{уд\ \Sigma} = i_{уд.\ г} + i_{уд.\ дв} = 92,0 + 24,6 = 116,6 \text{ кА};$$

действующее значение ударного тока

$$I_{уд\ \Sigma} = \sqrt{\left(i''_0 \gamma + i''_{дв\ (б)}\right)^2 + 2 i''^2_0 \gamma_а^2} =$$

$$= \sqrt{(8,65 \cdot 0,86 + 3,51)^2 + 2 \cdot 8,65^2 \cdot 0,66^2} = 13,6 \text{ о. е.},$$

или в физических единицах

$$I_{уд\ \Sigma} = 13,6 \cdot 4,97 = 67,6 \text{ кА.}$$

## § 2.7.10. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЦВМ

**Общие сведения.** В связи с высокой эффективностью исследования процессов в СЭЭС на ЦВМ наблюдается широкое использование моделирования и ЦВМ для расчетов процессов к. з. На ЦВМ оперативно рассчитываются токи к. з. в СЭЭС как по моделям, основанным на дифференциальных уравнениях, так и по моделям, основанным на алгебраических уравнениях. Математические модели на основе дифференциальных уравнений могут достаточно точно отображать состав и структуру эквивалентной схемы замещения ЭЭС, а также динамику элементов системы и ее структуры. Могут учитываться действия различных регуляторов, механические переходные процессы, насыщения электрических машин и другие важные факторы. С этой точки зрения такие модели могут отражать наибольшее число существенных факторов и могут обеспечивать высокую степень адекватности объекту. Однако расчеты на ЦВМ по дифференциальным уравнениям требуют наибольшего количества исходных данных и даже при наличии отлаженных программ используются только в наиболее ответственных случаях, требующих уточненных расчетов.

По таким алгоритмам с помощью ЦВМ разрабатываются, например, стандартные расчетные кривые токов к. з. в СЭЭС и исследуются процессы в мощных СЭЭС. Расчеты на ЦВМ токов к. з. по алгебраическим уравнениям целесообразны и используются при необходимости выполнения многочисленных расчетов токов в СЭЭС простых структур [59] и особенно при учете воздействия токоограничивающих устройств по их характеристикам.

К сожалению, для обеспечения быстрых и многочисленных расчетов на ЦВМ по наиболее полным моделям на основе дифференциальных уравнений в общем случае требуется большая и длительная предварительная работа по созданию математической модели, алгоритма и программы для эквивалентной ЭЭС заданного состава и структуры. В связи с этим для типовых эквивалентных ЭЭС разрабатывают стандартные программы расчета переходных процессов. Для СЭЭС нетиповых состава и структуры возникает проблема повышения эффективности формирования моделей и алгоритмов с целью дальнейшего повышения общей эффективности исследования процессов.

**Особенности алгоритмизации расчета процессов к. з.** При расчете процессов к. з. в общем случае наибольшую эффективность алгоритмизации и функционирования алгоритма обеспечивает структурный принцип построения модели [9, 65]. Для согласования переменных с уравнениями связи и наглядности расчетов целесообразно использовать уравнения элементов в токах (и их производных) с выражением напряжений элементов через напряжения узловых точек, с которыми они соединены [65]. При экономной последовательности выполнения расчетных операций использование уравнений в токах не приводит к увеличению

объема вычислений. В случае необходимости сокращения объема записи уравнений и алгоритма применяют матричные формы записи [56].

Уравнения СГ целесообразно записывать в собственных осях $d$, $q$, а уравнения других элементов — в общих осях. В качестве общих осей можно использовать оси первого СГ или синхронные оси. В первом случае отсчет положения ротора $k$-го СГ ведется по углу $\theta_{1k}$ в направлении к общей оси — оси первого СГ. При использовании синхронных осей отсчитывается угол $\delta_k$ от общей синхронной оси. Переход от выражений, содержащих угол $\theta_{1k}$, к выражениям с углом $\delta_k$ обеспечивается при подстановке $\theta_{1k} = -\delta_k$.

При расчетах токов к. з. насыщение и механические переходные процессы обычно не учитывают. Принимаются скольжения: $s_г = 0$, $s_{дв} = s_{дв.\,нач} = \text{const}$. Задание состава и структуры СЭЭС может производиться с помощью матрицы узловых соединений $[П]$ и вектора токов системы. Более компактным может быть задание состава и структуры матрицей межузловых отношений $[B_0]$ и матрицей отношений элементов и узлов $[N_N]$ [65].

В качестве уравнений связи целесообразно использовать преобразованные уравнения в виде зависимости напряжений узловых точек от токов системы и напряжений возбуждения СГ или от производных статорных токов при $[u] = 0$ [65].

Для обеспечения возможности использования большого шага численного интегрирования вычисление напряжений в общем случае необходимо производить внутри такта численного интегрирования в процессе вычисления правых частей дифференциальных уравнений.

**Математические модели элементов и СЭЭС для исследования процесса к. з.** Типовыми элементами СЭЭС, определяющими процесс к. з., являются синхронные генераторы (СГ), асинхронные двигатели (АД), статические нагрузки (СН) и перемычки (П). Совокупность уравнений этих элементов и уравнений связи для узловых точек в соответствии со следующим пунктом можно назвать системой основных уравнений. Полная система уравнений СЭЭС компонуется из основных уравнений с добавлением при необходимости уравнений систем самовозбуждения, регуляторов напряжения, регуляторов частоты, уравнений механических переходных процессов и др. [9, 28, 59]. При формировании математической модели основные уравнения должны быть разрешены относительно производных от координат и напряжений узловых точек. В случае структурного принципа формирования модели СЭЭС разрешение относительно производных от токов производится преобразованием систем уравнений каждого СГ и АД отдельно.

Процесс к. з. в СЭЭС характеризуется в первую очередь ударным током. В связи с этим для обеспечения адекватности объекту при исследовании к. з. необходимо использование полных уравнений Горева — Парка. Полные уравнения каждого СГ в осях $d$, $q$ по [9, 56] в тех же относительных единицах путем соответствующей компоновки коэффициентов представим в матричной форме

$$p\,[\psi_k] = [R_k]\,[i_k] + [V_k]\,[u_n]; \quad [i_k] = [X_k]^{-1}\,[\psi_k]. \tag{2.7.71}$$

Здесь $k = 1, 2, \ldots, K$ — номер СГ; $n$ — номер узла, к которому подсоединен СГ; $[\psi_k] = [\psi_{dk}, \psi_{qk}, \psi_{fk}, \psi_{rdk}, \psi_{rqk}]'$ — вектор потокосцеплений; $p\,[\psi_k]$ — вектор производных по синхронному времени от потокосцеплений; $[u_n] = [u_{dn}, u_{qn}, u_{fk}]'$ — вектор составляющих напряжений узла и напряжения возбуждения генератора; $[X_k]$, $[R_k]$, $[V_k]$ — матрицы коэффициентов.

Преобразование уравнений (2.7.71) дает уравнения СГ в токах

$$[X_k]\,p\,[i_k] = [R_k]\,[i_k] + [V_k]\,[u_n] \tag{2.7.72}$$

и

$$p\,[i_k] = [E_k]\,[i_k] + [G_k]\,[u_n], \tag{2.7.73}$$

где

$$[E_k] = [X_k]^{-1}\,[R_k], \quad [G_k] = [X_k]^{-1}\,[V_k]. \tag{2.7.74}$$

Уравнения для приведения производных токов $i_d$, $i_q$ СГ к общим осям:

$$p\,[i_{СГ\,k\,п}] = [T_k]\,p\,[i_{СГ\,k}] + [F_k]\,[i_{СГ\,k}]; \tag{2.7.75}$$

$$[i_{СГ\,k}] = [i_{dk}, i_{qk}]'; \tag{2.7.76}$$



$$[T_k] = \begin{bmatrix} \cos\delta_k & -\sin\delta_k \\ \sin\delta_k & \cos\delta_k \end{bmatrix}; \quad [F_k] = \begin{bmatrix} -s_k \sin\delta_k - s_k \cos\delta_k \\ s_k \cos\delta_k - s_k \sin\delta_k \end{bmatrix}. \tag{2.7.77}$$

Аналогично уравнения каждого АД представим в матричной форме

$$p\,[\psi_l] = [R_l]\,[i_l] + [V_l]\,[u_n]; \quad [i_l] = [X_l]^{-1}\,[\psi_l]. \tag{2.7.78}$$

Здесь $l = K+1, K+2, \ldots, L$; $[\psi_l] = [\psi_{dl}, \psi_{ql}, \psi_{rdl}, \psi_{rql}]'$; $[u_n] = [u_{dn}, u_{qn}]'$.

Преобразование уравнений (2.7.78) дает уравнения АД в токах

$$[X_l]\,p\,[i_l] = [R_l]\,[i_l] + [V_l]\,[u_n] \tag{2.7.79}$$

и

$$p\,[i_l] = [E_l]\,[i_l] + [G_l]\,[u_n], \tag{2.7.80}$$

где

$$[E_l] = [X_l]^{-1}\,[R_l]; \quad [G_l] = [X_l]^{-1}\,[V_l]. \tag{2.7.81}$$

В предлагаемых формах записи уравнений СГ и АД матрицы $[X_k]$, $[R_k]$, $[V_k]$ и $[X_l]$, $[R_l]$, $[V_l]$ являются исходными и минимально необходимыми для получения всех возможных форм их матричных уравнений и преобразования переменных. Использование приведенных матриц обеспечивает унификацию формирования и преобразования коэффициентов уравнений в матричных моделях СГ и АД и облегчает оптимизацию алгоритмов.

Уравнения СН и П практически разрешены в отношении производных и легко представляются в матричных формах записи.

**Формы уравнений связи***. При исследовании переходных процессов в ЭЭС уравнения связи целесообразно представлять в виде сумм производных токов узлов

$$[П]\,p\,[i_в] = 0, \tag{2.7.82}$$

где $p\,[i_в]$ — вектор производных от приведенных к общим осям токов $i_d$, $i_q$ всех ветвей системы.

Использование вектора производных токов ветвей в качестве вектора-функции от производных токов $i_d$, $i_q$ всех элементов позволяет получить преобразованные уравнения связи как уравнения узловых напряжений в форме

$$[B]\,[u] = [П]\,p\,[i_в]_{[u]=0}, \tag{2.7.83}$$

где $[B]$ — матрица узловых проводимостей, вычисленная по индуктивным составляющим сопротивлений статорных ветвей элементов; $[u] = [u_{d1}, u_{qi}, u_{d2}, u_{q2}, \ldots]'$ — вектор составляющих узловых напряжений; $p\,[i_в]_{[u]=0} = [pi_{d1}, pi_{q1}, pi_{d2}, pi_{q2}, \ldots]'_{[u]=0}$ — вектор производных от приведенных к общим осям токов при $[u] = 0$.

Таким образом, правые части уравнений узловых напряжений (2.7.83) определяются вектором результирующих значений узловых сумм производных $p\,[i_{узл}]_{[u]=0} = [П]\,p\,[i_в]_{[u]=0}$ от приведенных к общим осям токов $i_d$, $i_q$ всех ветвей при нулевых значениях напряжения на их зажимах. В результате расчет напряжений узловых точек может производиться методом разделения такта численного интегрирования дифференциальных уравнений системы на две части. В процессе вычисления правых членов дифференциальных уравнений элементов вначале они рассчитываются при $[u] = 0$. После этого в середине такта численного интегрирования рассчитывается вектор $p\,[i_{узл}]_{[u]=0}$ и на основе уравнения (2.7.83) — вектор напряжений узловых точек

$$[u] = [B]^{-1}\,p\,[i_{узл}]_{[u]=0}. \tag{2.7.84}$$

* Теория и метод расчета по данному подходу разработаны В. И. Финагиным.

После расчета напряжений выполняется вторая часть такта численного интегрирования, в которой к значениям правых частей дифференциальных уравнений, вычисленных ранее при $[u] = 0$, прибавляются значения членов, содержащих напряжения узловых точек. На этом заканчивается вычисление правых частей уравнений и завершается такт интегрирования.

При таком методе расчета для выполнения основных операций по вычислению напряжений узловых точек используется алгоритм вычисления правых частей дифференциальных уравнений. В сложных алгоритмах это обеспечивает значительное сокращение объема алгоритма и работ по алгоритмизации, а также времени расчета.

**Пути повышения эффективности исследования процессов к. з. на ЦВМ.** Под эффективностью исследования процессов на ЦВМ можно понимать способность системы, включающей специалистов, технические средства, теорию, методы и специальные алгоритмы, при наличии заданных ее свойств и в заданных условиях обеспечивать выполнение поставленных задач исследований при определенных характеристиках затрат общественных ресурсов. Под затратами ресурсов в общем случае понимаются материальные, пространственные и временные затраты. При прочих равных условиях эффективность исследования процессов на ЦВМ определяется эффективностью создания и эффективностью функционирования алгоритмов и программ.

Эффективность создания алгоритмов и программ определяется уровнями подготовки специалистов, развития теории и методов расчета, методов алгоритмизации, специального математического обеспечения ЦВМ и соответствующими характеристиками затрат. Повышение эффективности работ по созданию алгоритмов и программ приобретает большое значение в связи с тем, что эти работы вызывают большие затраты средств и времени и часто не успевают за нуждами проектирования. Уже при создании алгоритмов и программ должна быть обеспечена возможность высокой эффективности их функционирования.

Под эффективностью функционирования понимается способность системы к достижению поставленной цели. Эффективность функционирования алгоритмов и программ при наличии необходимых специалистов и современных ЦВМ определяют следующие их основные свойства:

*производительность* (результативность) — качество и количество продукции в заданное время. Сюда можно включить: адекватность модели объекту, точность расчетов, вероятность ошибок, время заданного объема расчетов, степень автоматизации получения окончательных результатов;

*надежность* — способность системы сохранять свойства, необходимые для выполнения заданного назначения в течение заданного времени. Это — безотказность алгоритмов и программ, их долговечность, работоспособность во всем возможном диапазоне исходных данных;

*оперативность* — постоянная готовность к работе алгоритмов, программ и средств, малое время подготовки исходных данных, максимальная автоматизация расчетов и обработки результатов, непрерывность расчетов для совокупности точек к. з. и т. д.;

*адаптивность* — приспособляемость алгоритмов и программ к расчетам на разных ЦВМ, к изменениям исходного состава и структуры ЭЭС, к расчетам по разным моделям, простота изменений алгоритмов и программ;

*компактность* — малый объем записи и обозримость алгоритмов;

*экономичность функционирования* — наличие определенных характеристик затрат на выполнение расчетов или исследований в целом.

Узловыми вопросами повышения эффективности исследований процессов в СЭЭС на ЦВМ являются повышение эффективности создания алгоритмов и программ, обеспечение адекватности моделей, надежности алгоритмов, адаптивности алгоритмов к изменениям исходного состава и структуры СЭЭС, повышение оперативности расчетов. Достигнутые уровни развития теории процессов в СЭЭС и алгоритмизации обеспечивают резкое повышение эффективности создания алгоритмов и программ путем автоматизации формирования алгоритмов.

Простейшую автоматизацию формирования алгоритмов обеспечивает использование блочного метода формирования на основе специальных типовых и массовых процедур. Под массовыми процедурами здесь понимаются процедуры, обладающие адаптивностью к изменению исходных данных о составе и структуре ЭЭС. Разработаны, например, массовая процедура вычисления напряжений узловых точек СЭЭС на основе полных уравнений Горева—Парка и массовая процедура формирования системы дифференциально-алгебраических уравнений ЭЭС произвольного состава и структуры [11]. Полная автоматизация формирования алгоритмов процессов в СЭЭС произвольного состава и структуры из заданных типовых элементов достигается разработкой массовых алгоритмов расчета. Реализован, например, массовый алгоритм расчета процесса к. з. в автономных ЭЭС по полным уравнениям Горева—Парка [11]. В основе его лежит использование многомерных динамических массивов, массовых процедур и циклов с типовыми процедурами.

На базе массовых алгоритмов возможно полуавтоматическое формирование алгоритмов путем задания конкретных значений переменных, определяющих состав и структуру конкретных ЭЭС. Это обеспечивает резкое уменьшение времени формирования алгоритма, уменьшение необходимого объема оперативной памяти и выполнение расчетов на меньших ЦВМ.

Задачу автоматизации самих расчетов токов к. з. для типовых СЭЭС можно считать решенной [9, 28, 56, 59, 65]. По разработанным алгоритмам при минимально необходимой подготовке данных может выполняться расчет необходимых значений токов, извлечение (выборка) их на заданные во вводе моменты времени, непрерывный процесс расчета токов для различных точек к. з., а также вывод результатов расчетов и извлечения в виде таблиц или графиков. В настоящее время возникла новая проблема полной автоматизации трудоемких работ по созданию расчетных кривых для определения токов к. з. В результате последних работ с помощью ЦВМ в отдельных случаях уже рассчитываются и формируются в виде графиков специальные расчетные кривые для конкретных СЭЭС. Такие кривые могут отражать особенности состава, структуры и параметров эквивалентных схем замещения конкретных СЭЭС. Они обеспечивают значительное уточнение результатов расчета токов к. з.

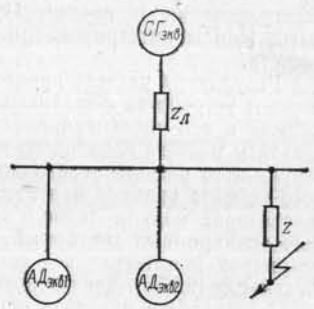


Рис. 2.7.27. Схема СЭЭС с одним эквивалентным генератором и двумя эквивалентными двигателями.

Специальные расчетные кривые могут создаваться и использоваться специалистами по СЭЭС непосредственно в процессе их ручного и автоматизированного проектирования.

**Стандартная программа расчета токов к. з. в ЭЭС** *. Программа составлена на алгоритмических языках ИНЖЕНЕР для ЦВМ «Минск-22», «Минск-32» и АЛГОЛ-60 для ЦВМ М220 и БЭСМ4.

Токи к. з. рассчитываются для судовой ЭЭС (рис. 2.7.27) с одним эквивалентным генератором и двумя эквивалентными асинхронными двигателями. В программе используются полные уравнения Горева—Парка для синхронных и асинхронных машин. Составляющие напряжений на зажимах генератора и на ГРЩ выражаются через переменные, имеющие производные.

Перед расчетом необходимо подготовить исходную информацию и отперфорировать ее на ленте или картах в определенном порядке. Задаются параметры одиночного генератора или эквивалентного генератора, полученные в соответствии с § 2.7.3. Асинхронные двигатели приводятся к одному или двум эквивалентным. В случае отсутствия второго асинхронного двигателя в качестве его параметров задаются параметры первого двигателя, увеличенные в $10^5$ раз. На основе справочных данных задаются параметры фидера между генератором и ГРЩ, параметры расчетной цепи к. з., параметры регуляторов напряжения и

* Текст данного пункта написан канд. техн. наук О. Н. Климановым.

частоты генератора. Задаются шаги интегрирования в начале и конце процесса к. з. Целыми числами задаются количество циклов интегрирования, шаги печати интегрирования и признак наличия демпферных обмоток у генератора.

По программе после ввода исходных данных производится расчет начального режима электроэнергетической системы и задание начальных условий для решения дифференциальных уравнений. Затем следует предварительное интегрирование системы дифференциальных уравнений для определения момента наступления максимальной величины ударного тока и соответствующего ему угла $\gamma_0$. Далее на алфавитно-цифровом печатающем устройстве выполняется печать информации, введенной в ЦВМ, и рассчитанных параметров исходного режима. После этого производится собственно расчет переходного процесса при коротком замыкании. Выполняется численное интегрирование дифференциальных уравнений и расчет действующего и интегрального значений тока цепи к. з. Проверяются условия, заданные в исходной информации, для изменения шагов интегрирования и печати. При необходимости изменяются соответствующие шаги. Циклы интегрирования повторяются до выполнения условий окончания расчета.

Результаты расчета процессов к. з. выдаются на алфавитно-цифровом печатающем устройстве с заданными шагами печати. При этом печатается заголовок расчета и вся численная информация, введенная в ЦВМ. Далее выводятся результаты расчета начального режима работы ЭЭС и печатается головка таблицы результатов расчета переходного процесса. В таблице в одну строчку для каждого момента времени к. з., задаваемого шагом печати, вносятся: напряжение генератора, модули токов в килоамперах генератора, цепи к. з., первого и второго асинхронных двигателей, затем действующее значение тока цепи к. з. в килоамперах и интегральное значение тока цепи к. з. в килоамперах в квадрате на секунду (кА$^2$/с). Две последние величины печатаются через каждые полпериода.

Для расчета процесса при к. з. в другой точке ЭЭС необходим повторный ввод исходной информации с новыми значениями активного и реактивного сопротивлений цепи к. з., что обеспечивается заменой одной перфокарты. Расчеты процесса длительностью 1 с занимают около 30 мин машинного времени ЦВМ «Минск-22» и 20 мин — ЦВМ М222.

# Глава 2.8. ЗАЩИТА СЭЭС И ВЫБОР АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ

## § 2.8.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ

Для предотвращения возникновения и развития аварий в СЭЭС предусматриваются отдельные аппараты, устройства или системы взаимосвязанных устройств защиты, осуществляющие:

— отключение элементов СЭЭС в случае нарушений нормального режима работы или повреждений, быстро ведущих к опасной аварийной ситуации;

— сигнализацию о возникновении нарушений нормального режима работы или повреждений, которые могут привести к опасной аварийной ситуации лишь через некоторое время, достаточное для проведения необходимых мероприятий обслуживающим персоналом.

В существующих судовых ЭЭС необходима защита при следующих видах повреждений и анормальных режимов работы:

а) коротком замыкании (к. з.);

б) перегрузке по току или мощности;

в) повреждении первичного двигателя;

г) обрыве одной фазы питающей сети;



д) исчезновении или недопустимом снижении напряжения сети.

Защита должна удовлетворять ряду требований, основными из которых являются: быстродействие, избирательность, надежность, способность выдерживать и отключать предельные токи к. з.

Защита должна обладать необходимым *быстродействием*, чтобы:

— предотвратить возникновение пожаров;

— предотвратить или ограничить повреждения электрооборудования;

— сократить до допустимых пределов перерыв питания потребителей или ухудшение качества электроэнергии в системе;

— предотвратить нарушение устойчивости работы СЭЭС.

Защита должна обеспечивать *избирательное* (селективное) *отключение* поврежденного участка СЭЭС. При возникновении анормального режима в системе защита должна производить только необходимые для его устранения отключения.

Защита должна обладать необходимой *чувствительностью*, т. е. должна четко реагировать на возникновение повреждения или анормального режима работы и не реагировать на нормальные режимы работы. Чувствительность оценивается *коэффициентом чувствительности*, характеризующим диапазон возможного изменения параметра срабатывания (тока, напряжения и т. д.) при повреждении или аварийном режиме.

Защита должна обладать необходимой *надежностью* и отвечать следующим требованиям: срабатывать при повреждениях и анормальных режимах (надежность срабатывания) и не допускать ложных срабатываний в нормальных или аварийных режимах, для действия в которых она не предназначена (надежность несрабатывания).

Аппараты и устройства защиты, через которые могут протекать токи к. з., должны быть *устойчивы к электродинамическому и термическому действию токов* к. з. Выключатели и предохранители, кроме того, должны быть способны отключать предельные токи к. з.

## § 2.8.2. ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ ОСНОВНЫХ ВИДОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

**Защита электродвигателей.** Электродвигатели должны иметь защиту от перегрузки и от снижения напряжения.

Для защиты двигателей от перегрузки необходимо предусматривать тепловые реле, встраиваемые в магнитные пускатели, станции и т. п. Для электродвигателей ответственных механизмов рекомендуется ставить защиту от перегрузки с действием на сигнал. Для электродвигателей мощностью менее 0,5 кВт допускается применять для защиты от перегрузки предохранители.

Защита электродвигателей от снижения напряжения осуществляется с помощью контакторов или специальных реле напряжения. Эта защита выполняет следующие функции:

а) предотвращает самозапуск электропривода после восстановления прерванного питания в случаях, когда это опасно или нецелесообразно по технологическим причинам;

б) обеспечивает переключение ответственных потребителей на питание от резервной сети при недопустимом снижении напряжения в основной сети.

Электродвигатели приводов, для которых самозапуск целесообразно обеспечивать после отключения к. з., должны иметь защиту от снижения напряжения с выдержкой времени, превышающей максимальное время отключения к. з. в СЭЭС.

Электродвигатели, непрерывная готовность к действию которых является необходимой (рулевые приводы и др.), могут не иметь защиты от снижения напряжения.

При наличии резервного питания электродвигатели ответственных механизмов целесообразно подключать к сети с помощью автоматических пускателей-переключателей (АПП), в которых защита от снижения напряжения осуществляется путем подачи сигнала на переключение от специальных реле

напряжения. Аналогично производится групповое переключение электродвигателей с помощью автоматических переключателей сети (АПС).

**Защита трансформаторов.** Трансформаторы должны иметь защиту от коротких замыканий и перегрузки. Эта защита осуществляется автоматическими выключателями (которые в дальнейшем изложении именуются выключателями), устанавливаемыми на фидерах питания трансформаторов. При параллельной работе трансформаторов выключатели должны размещаться на фидерах со стороны первичных обмоток. На стороне вторичных обмоток следует устанавливать разъединители.

**Защита генераторных агрегатов.** Генераторные агрегаты должны иметь защиту от коротких замыканий (трех- и двухфазных — металлических и через дугу), перегрузок, повреждений в первичных двигателях, а в некоторых случаях — защиту от снижения напряжения. Для генераторов переменного тока мощностью 1000 кВт и более рекомендуется устанавливать защиту от внутренних коротких замыканий. Для защиты генераторов от внешних к. з. на генераторных фидерах должны предусматриваться выключатели с расцепителями к. з. во всех фазах (или полюсах). Защита должна иметь выдержку времени с целью отстройки от ложных срабатываний при к. з. в сети.

Для защиты генераторов переменного тока от внутренних к. з. должны использоваться дифференциальные или аналогичные им по характеристикам реле. Защита должна действовать на отключение генераторного выключателя и на включение аппарата гашения поля.

Защита генераторного агрегата от перегрузки в первую очередь должна осуществляться путем автоматической разгрузки генераторов (АРГ) по активному току, мощности или частоте и путем автоматического включения резервного агрегата (АВР). Необходимость использования устройств АВР и АРГ зависит от схемы генерирования и распределения энергии, вида первичных двигателей, мощности и определяется отдельно для каждого конкретного случая.

Иногда кроме устройств АВР и АРГ целесообразно предусматривать защиту генератора от перегрузки, действующую на отключение генератора. Такая защита должна быть отстроена по времени действия от защиты, действующей на разгрузку, и срабатывать в тех случаях, когда разгрузка не снимает перегрузки генератора.

Для защиты от повреждений в первичных двигателях на дизель- и турбогенераторах следует применять реле обратного активного тока или мощности, действующие на отключение генераторных выключателей с выдержкой времени. Защита газотурбогенераторов от перехода в двигательный режим должна осуществляться путем блокировки, отключающей генераторный выключатель без выдержки времени при прекращении подачи топлива. Такая блокировка является предпочтительной также для дизель- и турбогенераторов, поэтому в каждом возможном случае ее следует использовать.

Защита от снижения напряжения осуществляется с помощью реле напряжения или путем блокировки с системой управления и защитой первичного двигателя. В случае применения реле напряжения должна использоваться выдержка времени для отстройки от кратковременных провалов напряжения в сети при к. з.

**Защита сети.** Электрические сети (фидеры питания потребителей, фидеры питания и секции шин распределительных щитов) должны защищаться от к. з. и перегрузок, а при наличии резервной сети — от снижения напряжения.

Защита сети от перегрузки не является обязательной, так как перегрузка в сети, как правило, снимается защитой отдельных потребителей, встраиваемой в магнитные пускатели, станции управления и т. д.

Защита сети от короткого замыкания должна осуществляться при всех его видах: трех-, двух-, однофазных — металлических и через дугу.

Для защиты сети от к. з. и перегрузки следует устанавливать предохранители или выключатели с расцепителями зоны к. з. во всех фазах (или полюсах). Расцепители зоны перегрузки могут быть установлены в двух фазах (одном полюсе).

Применение предохранителей допускается для сети освещения и питания маломощных потребителей в том случае, когда оно позволяет резко сократить габариты распределительных щитов.



Выполнение ответвлений без установки аппаратов защиты допускается для взаимосвязанных потребителей при условии, что при всех возможных к. з. и перегрузках обеспечивается надежное срабатывание защитного аппарата, предусмотренного до ответвления.

Для перемычек между секциями ГРЩ, проходящих через водонепроницаемые переборки, выключатели должны предусматриваться с обеих сторон.

Фидер питания с берега должен иметь защиту от к. з., перегрузок, обрыва фазы и снижения напряжения. Для защиты от к. з. и перегрузок предусматривается выключатель с комбинированными расцепителями, а для защиты от обрыва фазы и снижения напряжения — специальные виды защит (например, устройство ЗОФН), воздействующие на выключатель фидера питания с берега.

**Защита цепей измерения, управления и сигнализации.** Цепи измерения, управления и сигнализации рекомендуется собирать в группы по функциональному признаку и подключать к сети или к вторичной обмотке питающего трансформатора через групповые предохранители.

Переключение измерительных трансформаторов тока должно быть выполнено таким образом, чтобы исключалась возможность нахождения вторичных обмоток в разомкнутом состоянии.

Конденсаторы защиты от радиопомех, устанавливаемые в ГРЩ, РЩ, а также в электроустройствах ответственного назначения, должны иметь защиту от к. з.

## § 2.8.3. ВЫБОР АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ

Выбор аппаратов защиты производится по техническим условиям на их поставку, каталогам или официальным справочникам.

Прежде всего необходимо, чтобы аппарат удовлетворял требованиям Регистра (или других правил) по температуре, ударо- и вибропрочности, влажности и т. д.

Затем производится выбор аппарата по основным номинальным параметрам: роду тока, напряжению, току нагрузки, частоте и т. д.

Далее выполняется расчет уставок и защитных характеристик, в процессе которого может быть откорректирован выбор аппарата по номинальным параметрам. Расчет уставок и защитных характеристик является специфичным и наиболее сложным, поэтому ниже приведены рекомендации главным образом по этому этапу выбора аппарата защиты.

### ВЫБОР УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ПЕРЕГРУЗКИ И СНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Защита электродвигателей от перегрузки, осуществляемая тепловыми реле, является элементом комплектного устройства (магнитного пускателя, станции и т. д.). Поэтому выбор этой защиты производится одновременно с выбором комплектного устройства.

Номинальный ток токового реле $I_{ном}$ для защиты двигателя от перегрузки следует выбирать равным номинальному току защищаемого двигателя $I_{ном.\,дв}$. Если номинальный ток двигателя не совпадает со стандартной шкалой номинальных токов реле (с учетом возможной регулировки), то допускается выбирать реле с ближайшим большим номинальным током.

При установке реле в комплектном устройстве номинальный ток следует, по возможности, выбирать с учетом того, что температура воздуха внутри устройства в нормальном установившемся режиме может отличаться от температуры, при которой калибруется реле (+40° С).

Выбранное по номинальному току реле должно быть отстроено от ложных срабатываний в режиме пуска или стоянки под током по условию

$$t_р \geqslant 1{,}05 t_{пуск}, \qquad (2{,}8{.}1)$$

где $t_р$ — время срабатывания реле, определяемое по нижней граничной кривой время-токовой характеристики реле для значения тока перегрузки в режиме

пуска или стоянки электропривода; $t_{пуск}$ — время пуска или стоянки электропривода.

Время пуска электропривода ориентировочно может быть принято равным:

$t_{пуск} \approx T_{мех}$ — для механизмов с вентиляторным моментом сопротивления;

$t_{пуск} \approx (2 \div 2{,}5) T_{мех}$ — для механизмов с постоянным моментом сопротивления.

Механическая постоянная времени электропривода в секундах определяется по формуле

$$T_{мех} = \frac{\left(GD^2_{дв} + GD^2_{мех}\right) n_0^2}{364 P_{ном}},$$

где $GD^2_{дв}$ — маховой момент электродвигателя, т·м²; $GD^2_{мех}$ — маховой момент механизма, приведенный к номинальной частоте вращения электродвигателя, т·м²; $n_0$ — синхронная частота вращения электродвигателя, об/мин; $P_{ном}$ — номинальная мощность электродвигателя, кВт.

При отсутствии данных по $GD^2$ механизма механическая постоянная времени электропривода ориентировочно может быть принята равной:

$T_{мех} \approx (1{,}5 \div 2{,}0)\, T_{мех.\,дв}$ — для электронасосов;

$T_{мех} \approx 30 T_{мех.\,дв}$ — для электровентиляторов.

Кратность тока перегрузки в режиме пуска для электроприводов переменного тока определяется по выражению

$$\frac{I}{I_{ном}} = k_{доп} k_{пуск} k_{скв} \frac{I_{ном.\,дв}}{I_{ном}}, \qquad (2.8.2)$$

где $k_{доп}$ — коэффициент, учитывающий плюсовый допуск на величину пускового тока электродвигателя, равный 1,15; $k_{пуск}$ — кратность пускового тока по ТУ; $k_{скв}$ — коэффициент, равный отношению среднеквадратичного тока за время пуска электродвигателя к пусковому току, определяемому по ТУ. Значение $k_{скв}$ рекомендуется принимать равным 0,93 — для электродвигателей частотой тока 50 Гц, 0,82 — для электродвигателей 400 Гц. В режиме стоянки $k_{скв} = 1$.

Кратность тока перегрузки для электроприводов постоянного тока определяется по выражению

$$\frac{I}{I_{ном}} = k_{доп} \frac{i_{max\ пу.к} + 1{,}45 i_{min\ пуск}}{\sqrt{6}\ I_{ном}}, \qquad (2.8.3)$$

где $k_{доп} = 1{,}15$; $i_{max\ пуск}$, $i_{min\ пуск}$ — соответственно максимальный и минимальный пусковые токи.

Если условие (2.8.1) не выполняется, необходимо увеличить номинальный ток реле.

Защита электродвигателей от снижения напряжения, осуществляемая контакторами, является нерегулируемой и отдельно не выбирается.

Чтобы оценить возможность самозапуска электродвигателей после кратковременных провалов напряжения при коротких замыканиях, следует учитывать время и напряжение отпадания контактов контакторов. Контакторы переменного тока типа КМ-2000 с I по IV величину имеют катушки переменного тока. Напряжение отпадания контактов для них составляет (0,3—0,6) $U_{ном}$. Время отпадания при снижении напряжения до нуля не превышает 0,04 с. Контакторы переменного тока типа КМ-2000 V и VI величин, контакторы типа КНТ, а также все контакторы постоянного тока имеют напряжения отпадания контактов (0,1—0,2) $U_{ном}$ и время отпадания при снижении напряжения до нуля в пределах 0,1—0,4 с.

Защита ответственных потребителей электроэнергии от снижения напряжения должна осуществляться с помощью устройств автоматического переключения питания (АПП) и устройств автоматического переключения сети (АПС).



Уставка по напряжению в устройствах АПП и АПС постоянная и составляет $0{,}65 U_{ном}$ при переключении на резервную сеть и $0{,}9 U_{ном}$ при обратном переключении на основную сеть. Уставка по времени переключения переменная, благодаря чему можно переключить потребители не все сразу, а группами.

Минимально возможная выдержка времени между ступенями переключения в существующих устройствах АПП и АПС равна 0,5 с.

Провал напряжения при переключении каждой группы не должен превышать допустимого значения.

Допустимая мощность одновременно переключаемых электродвигателей переменного тока определяется формулой

$$S_{доп} = 0{,}2 \frac{\Delta U}{1 - \Delta U} \frac{S_\Sigma}{x'_d}, \qquad (2.8.4)$$

где $\Delta U$ — допустимый провал напряжения, о. е; $S_\Sigma$ — номинальная суммарная мощность эквивалентного генератора резервной сети, кВ·А; $x'_d$ — переходное сопротивление эквивалентного генератора резервной сети, величина которого в относительных единицах определяется из условия

$$\frac{1}{x'_d} = \frac{1}{x'_{d_1}} \frac{S_{г_1}}{S_\Sigma} + \frac{1}{x'_{d_2}} \frac{S_{г_2}}{S_\Sigma} + \cdots + \frac{1}{x'_{d_n}} \frac{S_{г_n}}{S_\Sigma}, \qquad (2.8.5)$$

где $x'_{d_1}, \ldots, x'_{d_n}$ и $S_{г_1}, \ldots, S_{г_n}$ — соответственно переходные сопротивления и номинальные мощности параллельно работающих генераторов резервной сети.

## ВЫБОР ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

При выборе выключателя основным моментом является определение его защитных параметров — уставок по току и времени — и проверка по предельным токам к. з. Вместе с тем в ряде случаев при выборе выключателя определяющими могут быть и другие параметры и характеристики, такие, например, как тип привода, наличие дистанционного управления, количество блок-контактов, время включения (если выключатель используется для синхронизации) и т. д.

Определение защитных параметров и характеристик производится в такой последовательности:

1) определяется номинальный ток максимального расцепителя выключателя;
2) определяется уставка выключателя на время срабатывания в зоне к. з.;
3) производится проверка выключателя по предельным токам к. з.;
4) определяется уставка выключателя на ток срабатывания в зоне к. з.;
5) проверяется чувствительность выключателя к минимальным токам к. з.

В том случае, если требуется защищать фидер от тока перегрузки, выбирается выключатель с комбинированным расцепителем. Отдельный расчет по выбору расцепителя перегрузки не производится.

**Определение номинального тока максимального расцепителя выключателя.** Номинальный ток максимального расцепителя выключателя генераторных фидеров и фидеров питания отдельных потребителей (электродвигателей, трансформаторов, преобразователей и т. д.) следует выбирать по условию

$$I_{ном.\,р} \geqslant I_{ном.\,потр}, \qquad (2.8.6)$$

где $I_{ном.\,р}$ — номинальный ток расцепителя выключателя по ТУ; $I_{ном.\,потр}$ — номинальный ток потребителя.

Номинальный ток расцепителя выключателя фидеров питания групповых силовых щитов необходимо определять для наиболее загруженного режима работы по условию

$$I_{ном.\,р} \geqslant I_ф = k_{одн} \left( \sum_1^n k_{загр\ i} I_{ном\ i} + I_р \right), \qquad (2.8.7)$$

где $I_ф$ — расчетный ток фидера; $k_{оди}$ — коэффициент одновременности работы потребителей; $k_{загр\,i}$ — коэффициент загрузки; $I_{ном\,i}$ — номинальный ток потребителя; $I_р$ — суммарный номинальный ток расцепителей резервных выключателей.

Номинальный ток расцепителя секционного выключателя и выключателя перемычки выбирают по условию

$$I_{ном.\,р} \geqslant I_{раб}, \qquad (2.8.8)$$

где $I_{раб}$ — расчетное значение длительного рабочего тока через выключатель в режиме, когда значение указанного тока максимально. Значение $I_{раб}$ определяется в каждом конкретном случае в зависимости от схемы генерирования и распределения электроэнергии.

**Выбор уставок выключателей на время срабатывания в зоне к. з.** С помощью существующих аппаратов избирательность действия защиты в зоне короткого замыкания достигается введением выдержек времени на срабатывание в зоне к. з. Однако при этом могут не обеспечиваться требования по быстродействию защиты. Поэтому выбор количества ступеней выдержки времени следует производить в каждом конкретном случае исходя из требований по быстродействию и избирательности с учетом схемы СЭЭС и возможностей аппаратов защиты. Не рекомендуется использовать выдержки времени свыше 0,3—0,5 с во избежание значительного разрушения оборудования электрической дугой.

Селективное отключение к. з. в пятиступенчатой системе защиты обеспечивается при условии установки следующих выключателей существующих серий:

на 1-й ступени — установочных выключателей;

на 2-й ступени — селективных выключателей с выдержкой времени 0,18 с (выключатели АМ), 0,15 с (А3500) или 0,10 с (А3700);

на 3-й ступени — селективных выключателей с выдержкой времени 0,38 с (АМ), 0,33 с (А3500) или 0,25 с (А3700);

на 4-й ступени — селективных выключателей с выдержкой времени 0,63 с (АМ), 0,70 с (А3500) или 0,40 с (А3700);

на 5-й ступени — селективных выключателей с выдержкой времени 1 с (АМ).

В общем случае уставки выключателей по времени их срабатывания должны возрастать в такой последовательности: индивидуальная защита потребителей, групповая защита, фидерный выключатель ГРЩ, выключатель перемычки, межсекционный выключатель, выключатели источников (в том числе выключатель питания с берега).

**Проверка выключателей по предельным токам к. з.** По предельным токам к. з. выключатели проверяют на коммутационную способность и термическую стойкость.

Предельная коммутационная способность (ПКС) характеризуется предельной включающей и предельной отключающей способностью.

Предельная включающая способность выражается первым наибольшим пиком в цепи, которую способен включить выключатель. Этот пик тока на переменном токе называется ударным током к. з., а на постоянном — максимальным током к. з.

Предельная отключающая способность выражается величиной тока в цепи в момент расхождения контактов.

Селективные выключатели постоянного тока и переменного тока частотой 50 Гц, селективные и неселективные выключатели тока частотой 400 Гц проверяют на предельную коммутационную способность по двум условиям:

$$i_{уд} \leqslant i_{уд.\,доп}; \qquad (2.8.9)$$

$$I_t \leqslant I_{t\,доп}, \qquad (2.8.10)$$

где $i_{уд}$, $i_{уд.\,доп}$ — расчетное и допустимое значения ударного (максимального) тока к. з., кА; $I_t$ и $I_{t\,доп}$ — расчетное и допустимое действующие значения тока к. з. в момент расхождения дугогасительных контактов.

Неселективные выключатели постоянного тока и переменного тока частотой 50 Гц проверяются на коммутационную способность только по условию (2.8.9),



так как расхождение дугогасительных контактов у этих выключателей происходит примерно при максимальном значении тока.

Селективные выключатели проверяются на термическую стойкость по условию

$$\int_0^t i^2\,dt \leqslant (I^2t)_{доп}, \qquad (2.8.11)$$

где $\int_0^t i^2 dt$ — расчетное значение интеграла, характеризующего термическое действие тока к. з. за время, равное уставке на срабатывание выключателя, кА²·с; $(I^2t)_{доп}$ — термическая стойкость выключателя, кА²·с.

Величины $i_{уд}$, $I_t$, $\int_0^t i^2 dt$ определяются по методике расчета токов к. з., изложенной в главе 2.7. При этом в качестве расчетных принимаются следующие условия:

а) короткое замыкание — металлическое (на переменном токе — трехфазное);

б) расчет проводится для режима, в котором мощность источников максимальна;

в) учитывается максимальная подпитка от электродвигателей.

**Определение уставок выключателей на ток срабатывания в зоне к. з.** Уставку на ток срабатывания в зоне к. з. выключателей фидеров электродвигателей следует выбирать из условия отстройки от ложных срабатываний при пусках электродвигателей:

$$k_{ср} \geqslant \frac{k_{над}k_{доп}k_{пуск}k_a}{1-\delta_t}\,\frac{I_{ном.\,дв}}{I_{ном.\,р}}, \qquad (2.8.12)$$

где $k_{ср}$ — уставка на ток срабатывания в зоне к. з. выключателя по ТУ; $k_{над}$ — коэффициент надежности, равный 1,05; $k_{доп}$ — коэффициент, учитывающий плюсовый допуск на величину пускового тока электродвигателя, равный 1,15, по ГОСТ 183—74; $k_{пуск}$ — кратность пускового тока электродвигателя по ТУ; $k_a$ — коэффициент, учитывающий величину апериодической составляющей пускового тока (значение $k_a$ рекомендуется принимать равным 1,3, на постоянном токе $k_a = 1$); $\delta_t$ — минусовый допуск на ток срабатывания выключателя в зоне к. з. по ТУ.

Если двигатель переменного тока имеет автоматический переключатель-пускатель (АПП) или предусматривается реверс электродвигателя, то уставка на ток срабатывания выключателя фидера питания двигателя должна выбираться из условия

$$k_{ср} \geqslant (1+E_{ост})\,\frac{k_{над}k_{доп}k_{пуск}k_a}{1-\delta_t}\,\frac{I_{ном.\,дв}}{I_{ном.\,р}}, \qquad (2.8.13)$$

где $E_{ост}$ — остаточная ЭДС переключаемого двигателя, о. е., величину которой рекомендуется принимать равной:

$0{,}6U_{пер}$ — при переключении электродвигателей частотой 50 Гц без выдержки времени (при закороченных блок-контактах реле времени АПП и АПС);

$0{,}3U_{пер}$ — при переключении электродвигателей частотой 50 Гц с выдержкой времени, равной 0,5 с;

$0{,}4U_{пер}$ — при переключении электродвигателей частотой 400 Гц, мощностью более 15 кВт без выдержки времени;

$0{,}15U_{пер}$ — при переключении электродвигателей частотой 400 Гц, мощностью менее 15 кВт без выдержки времени;

$U_{пер}$ — напряжение, при котором происходит отключение электродвигателя от сети; при переключении с основной сети на резервную $U_{пер} = 0{,}65$; при обратном переключении $U_{пер} = 1{,}0$.

При переключении электродвигателей частотой 50 Гц с выдержкой времени 1 с и более и частотой 400 Гц с выдержкой времени 0,5 с и более величину $E_{ост}$ рекомендуется принимать равной нулю.

Уставка на ток срабатывания в зоне к. з. выключателя фидера, питающего нагревательные устройства, может приниматься минимальной из приведенных в ТУ.

Уставку на ток срабатывания в зоне к. з. выключателя фидера, питающего трансформатор, следует выбирать из условия отстройки от токов включения и переключения:

$$k_{ср} \geqslant \frac{k_{max}}{1-\delta_i} \frac{I_{ном.\,тр}}{I_{ном.\,р}}, \qquad (2.8.14)$$

где $k_{max}$ — кратность максимального тока включения трансформатора; $I_{ном.\,тр}$ — номинальный ток первичной обмотки трансформатора.

Если величина $k_{max}$ неизвестна, то для трансформаторов частотой 50 Гц ориентировочно можно принимать:

при мощности трансформаторов 25 кВт и менее

$$k_{max} \geqslant 1{,}1 I_{х.\,х}; \qquad (2.8.15)$$

при мощности трансформаторов более 25 кВт

$$k_{max} \geqslant 1{,}5 I_{х.\,х}, \qquad (2.8.16)$$

где $I_{х.\,х}$ — ток холостого хода трансформатора, % от номинального тока трансформатора по ТУ.

Для трансформаторов частотой 400 Гц значение $k_{ср}$ следует принимать минимально возможным для данного типа выключателя $\left(\text{но не менее } 3\frac{I_{ном.\,тр}}{I_{ном.\,р}}\right)$.

Уставку на ток срабатывания в зоне к. з. выключателей фидеров питания групповых осветительных щитов и групп светильников рекомендуется принимать:

а) равной минимальному значению из возможных для фидеров, питающих групповые щиты и группы светильников с люминесцентными лампами (так как величина тока включения указанных ламп не превышает двукратного номинального тока);

б) равной $7\frac{I_{ном.\,ф}}{I_{ном.\,р}}$ для фидеров питания групповых щитов и групп светильников с лампами накаливания мощностью до 300 Вт включительно;

в) не менее $10\frac{I_{ном.\,ф}}{I_{ном.\,р}}$ для фидеров питания ламповых прожекторов и осветительных установок с лампами накаливания мощностью свыше 300 Вт.

Уставку на ток срабатывания в зоне к. з. выключателя, устанавливаемого на фидере питания силового распределительного щита, следует выбирать из условия отстройки от ложных срабатываний выключателя при пуске (переключении) потребителей:

а) при установке на фидере неселективного выключателя

$$k_{ср} \geqslant \frac{\sum_{1}^{m} I_{вкл\,i} + \sum_{m+1}^{n} k_{загр\,i} I_{ном\,i}}{(1-\delta_i)\, I_{ном.\,р}} \frac{\sum I_{ном} + I_{рез}}{\sum I_{ном}}, \qquad (2.8.17)$$

где $\sum_{1}^{m} I_{вкл\,i}$ — суммарный ток включения одновременно запускаемых потребителей.



Для случая, когда схемой управления не предусматривается одновременное включение (запуск) или самозапуск потребителей, учитывается только ток включения одного наиболее мощного потребителя.

На переменном токе при определении $\sum_{1}^{m} I_{вкл\,i}$ ток включения одного из одновременно запускаемых электродвигателей (с наибольшим пусковым током) берется с учетом коэффициентов $k_а$ и $1 + E_{ост}$ (при переключении):

$$I_{вкл} = k_а k_{доп} k_{пуск} I_{ном.\,дв} \qquad (2.8.18)$$

или

$$I_{вкл} = (1 + E_{ост})\, k_а k_{доп} k_{пуск} I_{ном.\,дв}; \qquad (2.8.19)$$

токи включения остальных одновременно запускаемых двигателей определяются как

$$I_{вкл} = k_{доп} \sum_{1}^{m} k_{пуск\,i} I_{ном.\,дв\,i}; \qquad (2.8.20)$$

токи включения трансформаторов и выпрямительных агрегатов вычисляются по формуле

$$I_{вкл} = k_{max} I_{ном.\,тр}\ (I_{ном.\,вып}). \qquad (2.8.21)$$

В выражение (2.8.17) входят также:

$\sum_{m+1}^{n} k_{за.р\,i} I_{ном\,i}$ — сумма номинальных токов с учетом коэффициентов загрузки потребителей, подключенных к щиту и одновременно работающих в рассматриваемом режиме;

$\sum I_{ном}$ — сумма номинальных токов всех потребителей, подключенных к щиту (работающих и не работающих в рассматриваемом режиме) без учета резерва;

$\frac{\sum I_{ном} + I_{рез}}{\sum I_{ном}}$ — коэффициент, учитывающий пропорциональное увеличение тока при подключении резерва;

б) при установке на фидере селективного выключателя $k_{ср}$ принимается по большему из значений, полученных либо по формуле (2.8.17), либо по формуле

$$k_{ср} \geqslant \frac{k_{доп} \sum_{1}^{m} k_{пуск\,i} I_{ном.дв\,i} + \sum_{m+1}^{n} k_{загр\,i} I_{ном\,i}}{(1+\delta_i)\, k_в I_{ном.\,р}} \frac{\sum I_{ном} + I_{рез}}{\sum I_{ном}}, \qquad (2.8.22)$$

где $k_в$ — коэффициент возврата максимального расцепителя.

На фидерах распределительных щитов с высоким процентом двигательной нагрузки целесообразно выбирать $k_{ср}$ исходя из условия отстройки от ложных срабатываний выключателя в режимах подпитки и самозапуска после к. з. вне зоны защиты. Расчет токов подпитки и самозапуска отличается сложностью и проводится методами исследования переходных процессов, изложенными в главе 1.2.

Уставку на ток срабатывания в зоне к. з. генераторных и секционных выключателей, а также выключателей перемычек следует выбирать из условия отстройки указанных выключателей от ложных срабатываний при пусках электродвигателей, синхронизации, переключении нагрузки с одного источника на другой.

Ориентировочно для отстройки выключателей от ложных срабатываний в этих режимах уставку на срабатывание следует принимать в пределах $(2{,}5 \div 4)\frac{I_{ном.\,ф}}{I_{ном.\,р}}$.

При наличии параллельной работы генераторных агрегатов разной мощности

или с первичными двигателями разного типа (например, турбо- и дизель-генераторов) выключатели целесообразно проверить на отсутствие ложных срабатываний в режиме качаний после отключения к. з. вне зоны защиты. Генераторные выключатели целесообразно также проверить на отсутствие ложных срабатываний в режиме самозапуска после отключения к. з.

**Проверка чувствительности защиты при к. з.** Расцепители зоны к. з. должны обладать необходимой чувствительностью, т. е. должны срабатывать не только при металлических трехфазных к. з., но и при двухфазных к. з. и к. з. через дугу.

Показателем чувствительности защиты является коэффициент чувствительности, определяемый по формуле

$$k_{ч} = \frac{I_{к.з\,min}}{k_{ср} I_{ном.р}}, \qquad (2.8.23)$$

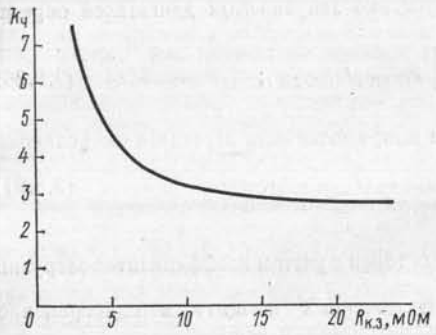



Рис. 2.8.1. Зависимость коэффициента чувствительности от сопротивления цепи к. з. постоянного тока.

где $I_{к.з\,min}$ — минимальное значение тока металлического к. з. в конце участка, защищаемого выключателем. Значение $I_{к.з\,min}$ следует определять для режима, когда суммарная мощность источников минимальна. Ток подпитки от электродвигателей принимается равным нулю.

В цепях переменного тока $I_{к.з\,min}$ в амперах определяется с учетом изложенных выше условий по формуле

$$I_{к.з\,min} = I''_{к.з\,min} = \frac{1}{Z_{к.з}} I_{б} \cdot 10^3, \qquad (2.8.24)$$

где $Z_{к.з}$ — расчетное сопротивление до точки к. з., о. е.; $I_{б}$ — базисный ток. Величины $Z_{к.з}$ и $I_{б}$ определяются по методике расчета токов к. з., приведенной в главе 2.7.

Для обеспечения необходимой чувствительности защиты в цепях переменного тока должно выполняться условие

$$k_{ч} \geqslant 2. \qquad (2.8.25)$$

В цепях постоянного тока $I_{к.з\,min}$ в амперах определяется с учетом изложенных выше условий по формуле

$$I_{к.з\,min} = \frac{E_{экв}}{R_{к.з}} \cdot 10^3, \qquad (2.8.26)$$

где $E_{экв}$ — эквивалентная ЭДС источников, В; $R_{к.з}$ — расчетное сопротивление до точки к. з., мОм.

Величины $E_{экв}$ и $R_{к.з}$ определяются по методике расчета токов к. з., приведенной в главе 2.7.

Для обеспечения необходимой чувствительности защиты в цепях постоянного тока $k_{ч}$ должен быть не менее значения, определяемого по кривой зависимости $k_{ч} = f(R_{к.з})$, изображенной на рис. 2.8.1.

Если для какого-либо выключателя коэффициент чувствительности получается менее рекомендуемого, то следует:

а) увеличивать сечение кабеля — для фидеров отдельных потребителей;

б) уменьшать количество одновременно включаемых потребителей или перегруппировывать потребителей так, чтобы уменьшить кратность тока уставки выключателя, или увеличивать сечение кабеля — для фидеров питания щитов, от которых питается группа потребителей;



в) использовать в дополнение к максимально-токовой защите устройство частотно-дуговой защиты — на выключателях генераторных, секционных и перемычек.

В тех случаях, когда для повышения чувствительности увеличивается сечение кабеля, необходимо вновь произвести проверку выключателя по предельным токам к. з.

## ВЫБОР ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

Номинальный ток плавкой вставки предохранителя $I_{ном.пл.в}$ следует выбирать равным (или ближайшим бóльшим) номинальному току потребителя.

Для фидеров питания электродвигателей выбранный по номинальному току предохранитель необходимо отстроить от ложных срабатываний при пуске или стоянке под током электродвигателя в соответствии с формулой (2.8.1).

Если время пуска электродвигателя переменного тока неизвестно, то выбор номинального тока плавкой вставки рекомендуется производить по формуле

$$I_{ном.пл.в} = \frac{k_{пуск} k_{скв} I_{ном.дв}}{\alpha}, \qquad (2.8.27)$$

где $\alpha$ — коэффициент, принимаемый равным 2,5 для легких условий пуска и 1,6—2,0 — для тяжелых условий.

Чтобы обеспечивалась селективность по току предохранителей, установленных последовательно, номинальные токи их плавких вставок должны отличаться между собой:

а) на пять ступеней — для предохранителей типа ПР с номинальными токами плавких вставок до 100 А;

б) на три-четыре ступени — для предохранителей типа ПР с номинальными токами плавких вставок свыше 100 А;

в) на две-три ступени — для предохранителей типов ПДС и ПД.

Выбранные предохранители переменного тока проверяют на разрывную способность по одному из условий, задаваемых заводом-изготовителем для данного типа предохранителя:

$$i_{уд} \leqslant i_{уд.доп} \qquad (2.8.28)$$

или

$$I_{п} \leqslant I_{п.доп}, \qquad (2.8.29)$$

где $i_{уд}$ ($i_{уд.доп}$) и $I_{п}$ ($I_{п.доп}$) — соответственно расчетные и допустимые значения ударного тока к. з. и расчетные и допустимые действующие значения периодической составляющей тока к. з.

Предохранители в цепях постоянного тока проверяются на разрывную способность по условию

$$I_{max\,доп} \geqslant I_{max}, \qquad (2.8.30)$$

где $I_{max\,доп}$ — допустимый отключаемый ток; $I_{max}$ — расчетный максимальный ток к. з.

## ВЫБОР УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКИ ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ И АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВА

В судовых электроустановках, как правило, могут иметь место два вида перегрузок генераторных агрегатов: случайные и аварийные.

Случайные перегрузки при правильно спроектированной электроустановке возникают редко и по величине незначительно превышают номинальную мощность электроустановки.

Аварийные перегрузки возникают при аварийном или ошибочном отключении одного из параллельно работающих агрегатов. Величины

аварийных перегрузок могут значительно превышать величину предельно допустимой мощности электроустановки. При аварийных перегрузках может происходить быстрое и значительное уменьшение частоты и напряжения сети.

Для защиты генераторных агрегатов от указанных перегрузок и обеспечения непрерывного питания электроэнергией наиболее ответственных потребителей в системе должно предусматриваться устройство АРГ, воздействующее на отключение неответственных потребителей, и устройство АВР.

Неответственные потребители, отключаемые по сигналу устройства АРГ, рекомендуется разбить на две группы: первая группа потребителей должна отключаться при возникновении случайных перегрузок, а вторая совместно с первой — при возникновении аварийной перегрузки. Группы отключаемых потребителей должны формироваться из неответственных потребителей, допускающих относительно длительное отключение (например, бытовые вентиляторы, кондиционеры, электронагреватели), а в случае необходимости — из потребителей, допускающих относительно кратковременное отключение (например, потребители камбуза, охлаждение провизионных камер).

Операции автоматической разгрузки генераторов и включения резерва могут производиться по сигналам датчиков различных параметров: активной мощности или тока, полного тока, частоты. Наиболее целесообразно использовать датчик активной мощности (тока).

Рекомендуемые уставки по активной мощности составляют:

90—100% — для включения резервного генератора;

110—115% — для отключения первой группы неответственных потребителей и одновременного включения резервного генератора;

120—130% — для отключения первой и второй групп неответственных потребителей и одновременного включения резервного генератора.

Величины уставок устройств АРГ и АВР по времени должны выбираться с учетом перегрузочной способности генераторных агрегатов и требуемого качества электроэнергии. При этом должна быть обеспечена отстройка по времени от ложных срабатываний в нормальных переходных режимах (при синхронизации, включении потребителей, переключении групп потребителей на резервный источник и др.). Кроме того, выдержки времени устройств АРГ и АВР должны быть меньше выдержек времени реле перегрузки, воздействующего на отключение генератора.

Рекомендуемые значения выдержек времени составляют:

не менее 10 с — на включение резервного генератора при уставке по мощности 90—100%;

5—10 с — на отключение первой группы неответственных потребителей и включение резерва при уставке по мощности 110—115%;

без выдержки — на отключение первой и второй групп неответственных потребителей и включение резерва при уставке по мощности 120—130%.

Алгоритм разгрузки и включения резерва, а также рекомендации по величинам уставок являются ориентировочными и могут изменяться в зависимости от типа электроустановки, режимов работы, требований к качеству электроэнергии и т. д.

### ВЫБОР РЕЛЕ ОБРАТНОГО ТОКА ИЛИ ОБРАТНОЙ МОЩНОСТИ

Уставка на срабатывание реле по обратному активному току или обратной активной мощности не должна превышать значение мощности, потребляемой из сети поврежденным агрегатом. Величина указанной мощности определяется в основном механическими потерями первичного двигателя и может быть определена как

$$\Delta P_{\text{мех}} = (1 - \eta_{\text{мех}}) \cdot 100\%, \qquad (2.8.31)$$

где $\eta_{\text{мех}}$ — механический КПД первичного двигателя, о. е.

Приведенные в ТУ на реле обратного тока или мощности значения уставок по току или мощности даны для случая совпадения номинального тока генератора с номинальным током первичной обмотки трансформатора тока при коэффициенте мощности, равном единице. Так как практически во всех случаях указанные условия не соблюдаются, то фактические уставки на срабатывание будут отличаться от приведенных в ТУ.



Определение фактической уставки на срабатывание реле в процентах следует производить по формуле

$$k_{\text{ср}} = \frac{k'_{\text{ср}} I_{1\text{ном}}}{I_{\text{ном. г}} \cos \varphi_{\text{с}}}, \qquad (2.8.32)$$

где $k'_{\text{ср}}$ — уставка на срабатывание реле в соответствии с ТУ при $\cos\varphi$ сети, равном единице, в процентах от номинального тока или мощности реле; $I_{1\text{ном}}$ — номинальный ток первичной обмотки трансформатора тока, А; $\cos\varphi_{\text{с}}$ — коэффициент мощности сети.

Ориентировочно уставка по мощности должна составлять:

2—6% — для турбогенераторов переменного тока;

2—15% — для турбогенераторов постоянного тока;

8—15% — для дизель-генераторов переменного тока;

2—15% — для дизель-генераторов постоянного тока.

Величина уставки по времени реле должна приниматься в пределах 1—6 с. Уставка по времени уточняется в зависимости от характеристик первичных двигателей, длительности качаний мощности в переходных процессах (например, при синхронизации) и других факторов.

**Пример 1.** Произвести выбор защиты двигателя типа АМ62-2 привода вентилятора 90ЦС24 от перегрузки и снижения напряжения.

Номинальные параметры двигателя: $P_{\text{ном}} = 14$ кВт; $U_{\text{ном}} = 380$ В; $I_{\text{ном}} = 28{,}3$ А. Кратность пускового тока $k_{\text{пуск}} = 6{,}0$. Время пуска $t_{\text{пуск}} = 0{,}75$ с. Маховой момент привода $GD^2 = 0{,}534$ кг·м².

Двигатель может быть скомпонован с магнитным пускателем типа ПММ-2 на номинальный ток 50 А, в котором установлен контактор типа КМ-2000 II величины на номинальный ток 50 А и реле типа ТРТ.

Защита от снижения напряжения осуществляется с помощью контактора, главные контакты которого отпадают при снижении напряжения до величины (0,3—0,6) $U_{\text{ном}}$.

Для защиты электродвигателя от перегрузки выбираем реле типоисполнения ТРТ-134 с номинальным током $I_{\text{ном}} = 28$ А. Номинальный ток реле меньше номинального тока двигателя, но уставку номинального тока реле можно регулировать в пределах ±15% со ступенью регулировки ±5%. Подбираем величину ступени, позволяющую добиться максимального сближения номинальных токов двигателя и реле при одновременном соблюдении условия $I_{\text{ном}} \geqslant I_{\text{ном. дв}}$.

При подрегулировке тока уставки на +5% номинальный ток уставки реле становится равным $I_{\text{ном}} = 28 \cdot 1{,}05 = 29{,}4 > I_{\text{ном. дв}}$.

Проверим выбранное реле на отстройку от ложных срабатываний по условию (2.8.1): $t_{\text{р}} \geqslant 1{,}05 t_{\text{пуск}}$.

Время срабатывания теплового реле $t_{\text{р}}$ определяем по нижней граничной кривой время-токовой характеристики реле ТРТ-134 для значения кратности тока перегрузки, вычисляемого по формуле (2.8.2), где $k_{\text{доп}} = 1{,}15$; $k_{\text{пуск}} = 5{,}5$; $k_{\text{скв}} = 0{,}93$; $I_{\text{ном. дв}} = 28{,}3$ А; $I_{\text{ном}} = 29{,}4$ А. После подстановки числовых значений получаем $I/I_{\text{ном}} = 5{,}66$.

По кривой для $I/I_{\text{ном}} = 5{,}66$ $t_{\text{р}} = 4{,}4$ с.

Время пуска ориентировочно может быть определено по каталожным данным. Для данного привода время пуска составляет $t_{\text{пуск}} = 0{,}75$ с.

Проверим выполнение условия (2.8.1): $1{,}05\, t_{\text{пуск}} = 1{,}05 \cdot 0{,}75$ с $= 0{,}788 < 4{,}4$ с, т. е. условие (2.8.1) выполняется и выбранное тепловое реле отстроено от ложных срабатываний в режиме пуска.

Если в магнитном пускателе, куда встраивается реле, температура воздуха при установившемся режиме отличается от температуры калибровки реле (+40° С), надо учесть, по возможности, разницу в температурах при помощи кривой температурных поправок.

Предположим, что пускатель работает при температуре окружающей среды +55° С. Кроме того, примем, что в нормальном установившемся режиме

температура воздуха в магнитном пускателе превышает температуру окружающей среды на 5° С. Таким образом, температура в магнитном пускателе достигает 60° С. По кривой температурных поправок для реле серии ТРТ находим, что при 60° С номинальный ток реле следует изменить примерно на +9%, при этом повторная проверка реле на отстройку от ложных срабатываний в режиме пуска не требуется.

**Пример 2.** Определить допустимую мощность нагрузки, которую можно автоматически переключить на электростанцию с двумя параллельно работающими генераторами типов МСК1560-1500 и МСК1250-1500. Суммарная мощность асинхронной нагрузки, которую необходимо переключить на станцию, составляет $S_{пер} = 1100$ кВ·А. При переключении провал напряжения не должен превышать 20% $U_{ном}$.

Допустимая величина мощности одновременно переключаемых электродвигателей переменного тока определяется формулой (2.8.4) при подстановке в нее $\Delta U = 0{,}2$; $S_{\Sigma} = 1560 + 1250 = 2810$ кВ·А:

$$\frac{1}{x'_d} = \frac{1}{x'_{d_1}}\frac{S_{г1}}{S_{\Sigma}} + \frac{1}{x'_{d_2}}\frac{S_{г2}}{S_{\Sigma}} = \frac{1}{0{,}194}\cdot\frac{1560}{2810} + \frac{1}{0{,}213}\cdot\frac{1250}{2810} = 4{,}95.$$

В результате получаем $S_{доп} = 626$ кВ·А.

Оставшаяся асинхронная нагрузка составляет

$$S_{ост} = S_{пер} - S_{доп} = 1100 - 626 = 474 \text{ кВ·А}.$$

Ее следует переключить во вторую очередь, установив для указанных электродвигателей устройства автоматического переключения питания с большей выдержкой времени. Провал напряжения при переключении второй очереди нагрузки будет меньше допустимого, так как значение переключаемой мощности меньше значения $S_{доп}$.

**Пример 3.** Произвести выбор автоматических выключателей и предохранителей для СЭЭС, приведенной на рис. 2.8.2.

Межсекционный выключатель и выключатель перемычки должны быть рассчитаны на передачу 50% мощности одного генераторного агрегата.

К РЩ подключены следующие потребители:

*1* — нагреватель ($P_{ном} = 16$ кВт; $I_{ном} = 24{,}3$ А; $k_{загр} = 1$);

*2* — трансформатор типа 03-10 ($I_{х.х} = 5{,}5$; $S_{ном} = 10$ кВ·А; $I_{ном} = 27{,}4$ А; $k_{загр} = 0{,}9$);

*3, 4* — электродвигатели типа АМ62-2 к насосу ($I_{ном} = 28{,}3$ А; $k_{пуск} = 6{,}5$; $k_{загр} = 1$);

*5* — электродвигатель типа АМШ91-6 к насосу ($I_{ном} = 74{,}8$ А; $k_{пуск} = 5{,}5$; $k_{загр} = 0{,}55$);

*6* — электродвигатель типа АМ72-2 к насосу ($I_{ном} = 29{,}1$ А; $k_{пуск} = 5{,}0$; $k_{загр} = 0{,}88$);

*7, 8* — резервные выключатели с суммарным номинальным током 80 А.

Потребители *3, 4, 6* должны иметь автоматическое переключение питания с основной сети на резервную, потребитель *6* от указанного щита получает резервное питание.

В наиболее загруженном режиме работы одновременно работают потребители *1, 3, 5*; в этом же режиме потребитель *6* может быть переключен на резервное питание при исчезновении основного.

К ГЩ подключены потребители:

*9* — электродвигатель типа АОМ12-2 к вентилятору ($I_{ном} = 7{,}7$ А; $k_{пуск} = 5{,}7$; $\alpha = 2{,}5$);

*10* — электродвигатель типа МОМ11-2 к вентилятору ($I_{ном} = 4{,}2$ А; $k_{пуск} = 5{,}0$; $\alpha = 2{,}5$);

*11* — резервный предохранитель с номинальным током 15 А.

Результаты расчета параметров аппаратов приведены в табл. 2.8.1. Расчет параметров производится в следующем порядке:

1. На основании данных по номинальным токам отдельных потребителей (или рабочим токам фидеров) и учитывая назначение фидеров, выбираем типы и номинальные токи расцепителей (плавких вставок) защитных аппаратов. Выбор и расчет указанных параметров производим в соответствии с рекомендациями § 2.8.3 и формулами (2.8.6)—(2.8.8) и (2.8.27).



Значения номинальных токов фидеров ($I_{ном.ф}$), типы аппаратов и значения номинальных токов расцепителей (плавких вставок) ($I_{пом.р}$) приведены в графах 2, 3 и 4 таблицы.

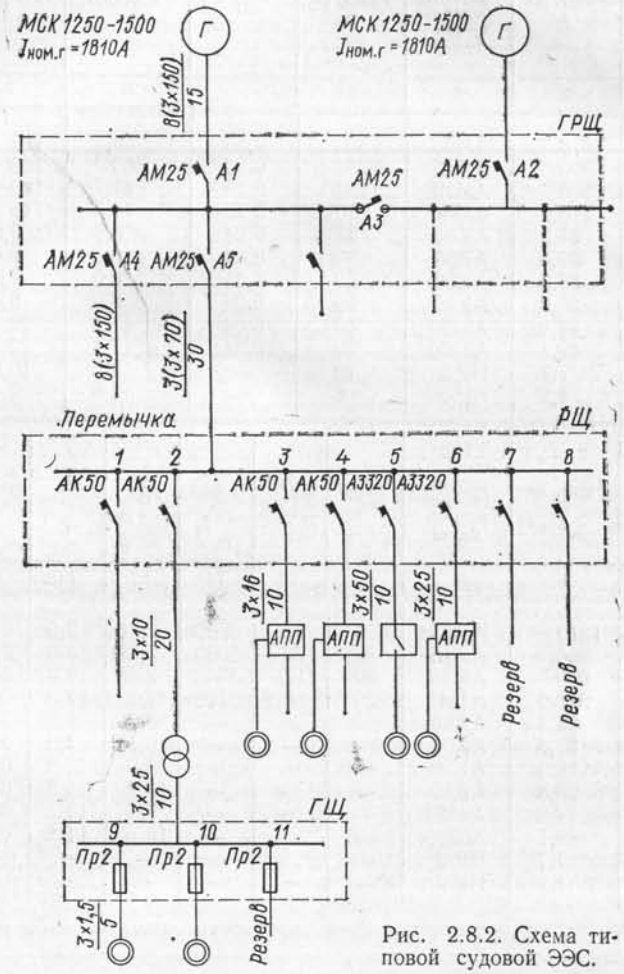



Рис. 2.8.2. Схема типовой судовой ЭЭС.

2. Выдержки времени селективных выключателей выбираем исходя из обеспечения селективности срабатывания при коротких замыканиях, однако при этом стремимся, по возможности, не использовать больших выдержек времени. В нашем примере целесообразно отказаться от одной ступени селективности между выключателем РЩ (А5) и выключателем перемычки (А4), применив на обоих выключателях выдержки времени одной ступени. При этом на генераторном выключателе можно установить выдержку времени 0,63 с вместо 1,0 с. Выбранные значения выдержек времени приведены в графе 5 таблицы.

3. Проверку аппаратов по предельным токам к. з. проводим в соответствии с условиями (2.8.9)—(2.8.11) и (2.8.28)—(2.8.29). Вычисление параметров $i_{уд}$,

*Таблица 2.8.1*

**Результаты расчета параметров защитных аппаратов**

| Номер выключателя (предохранителя) | $I_{ном.ф}$, А | Тип выключателя (предохранителя) | $I_{ном.р}$, А | $t_{ср}$, с | $i_{уд}$, кА | $i_{уд.доп}$, кА | $I_{0,04}$, кА |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| А1 | 1810 | АМ25 | 2000 | 0,63 | 55,2 | 120 | 14 |
| А3 | 900 | АМ15 | 1250 | 0,38 | 83 | 120 | 28 |
| А4 | 900 | АМ15 | 1250 | 0,18 | 81,7 | 120 | 27 |
| А5 | 216,9 | А3540 | 250 | 0,15 | 44,5 | 45 | 19,3 |
| А6 | 24,3 | АК50 | 25 | 0,04 | <8,9 | 9,0 | — |
| А7 | 27,4 | АК50 | 30 | 0,04 | <8,9 | 9,0 | — |
| А8 | 28,3 | АК50 | 30 | 0,04 | 8,9 | 9,0 | — |
| А9 | 28,3 | АК50 | 30 | 0,04 | 8,9 | 9,0 | — |
| А10 | 74,8 | А3320 | 80 | 0,04 | 17,1 | 22 | — |
| А11 | 49,1 | А3320 | 50 | 0,04 | <17,1 | 22 | — |
| П1 | 7,7 | ПР-2 | 10 | — | 2,5 | 10,8 | — |
| П2 | 4,2 | ПР-2 | 6 | — | 1,6 | 2,4 | — |

| Номер выключателя (предохранителя) | $I_{ном.ф}$, А | Тип выключателя (предохранителя) | $I_{t_{доп}}$, кА | $\int i^2 dt$, кА$^2$.с | $(I^2t)_{доп}$, кА$^2$.с | $k_{ср.расч}$, о. е. | $k_{ср\ ту}$, о. е. | $Z_{к.з}$, о. е. | $k_ч$, о. е. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| А1 | 1810 | АМ25 | 50 | 57 | 3000 | 2,26 | 2,5 | 0,3 | 2,42 |
| А3 | 900 | АМ15 | 50 | 176 | 3000 | 2,88 | 3,0 | 0,15 | 3,22 |
| А4 | 900 | АМ15 | 50 | 117 | 3000 | 2,88 | 3,0 | 0,15 | 6,44 |
| А5 | 216,9 | А3540 | 25 | 62,3 | 125 | 4,3 | 7,0 | 0,18 | 20,4 |
| А6 | 24,3 | АК50 | — | — | — | 5,0 | 5,0 | 1,9 | 9,0 |
| А7 | 27,4 | АК50 | — | — | — | 6,13 | 7,0 | 1,93 | 8,9 |
| А8 | 28,3 | АК50 | — | — | — | 13,9 | 10 * | 0,54 | 15 |
| А9 | 28,3 | АК50 | — | — | — | 13,9 | 10 * | 0,54 | 15 |
| А10 | 74,8 | А3320 | — | — | — | 9,5 | 14 | 0,35 | 9,2 |
| А11 | 49,1 | А3320 | — | — | — | 15 | 14 * | 0,42 | 10,3 |
| П1 | 7,7 | ПР-2 | — | — | — | — | — | — | — |
| П2 | 4,2 | ПР-2 | — | — | — | — | — | — | — |

* Уставки выбраны с учетом повышения номинального тока расцепителя.

$I_{0,04}$ и $\int i^2 dt$ производим на основании рекомендаций главы 2.7. Проверку выключателей А6, А7 и А11 не производим, так как аналогичные выключатели А8 и А10, находящиеся в контурах с заведомо большими токами к. з., удовлетворяют требованиям к коммутационной способности. Результаты проверки аппаратов по предельным токам к. з. приведены в графах 6—11 таблицы.

4. Производим определение уставок выключателей на ток срабатывания в зоне к. з. Уставки выключателей фидеров питания электроприводов определяем по условиям (2.8.12) и (2.8.13), принимая для выключателей АК50 $\delta_i = 0{,}1$ и для выключателей А3300 $\delta_i = 0{,}15$. Для выключателей А8 и А9 в соответствии



с исходными условиями принимаем $U_{пер} = 1{,}0$, для выключателей А11 $U_{пер} = 0{,}65$. Для выключателей А8, А9 и А11 расчетные значения уставок (графа 12) получились выше максимальных уставок по техническим условиям на выключатели (графа 13 таблицы). Поэтому мы вынуждены выбрать максимальные уставки и повысить номинальные токи расцепителей.

Уставку выключателя фидера РЩ (А5) рассчитываем по формуле (2.8.17) с учетом исходных данных по одновременности запуска и переключения потребителей. Уставку генераторного выключателя выбираем по условию

$$k_{ср.расч} = 2{,}5 \frac{I_{ном.ф}}{I_{ном.р}} = 2{,}26.$$

Уставку выключателей перемычки и секционного для обеспечения отстройки от токов синхронизации выбираем по условию

$$k_{ср.расч} = 3{,}0 \frac{I_{ном.ф}}{I_{ном.р}} = 2{,}88.$$

5. Проверку чувствительности производим, предварительно рассчитав сопротивление короткого замыкания $Z_{к.з}$ и ток к. з. в соответствии с условием (2.8.24). Результаты расчета коэффициента чувствительности $k_ч$ приведены в графах 14 и 15 таблицы. Как видно из таблицы, все выключатели обладают необходимой чувствительностью.

# Глава 2.9. ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

## § 2.9.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В судовых электроэнергетических системах переменного тока в качестве источников электроэнергии, как правило, используются трехфазные синхронные генераторы. Мягкость естественных внешних характеристик $U = f(I, \cos\varphi)$ таких генераторов (рис. 2.9.1) обусловила необходимость применения автоматических регуляторов напряжения (АРН).

Синхронные генераторы с автоматическими регуляторами напряжения имеют значительно меньшие отклонения напряжения в установившихся режимах с нормальной нагрузкой. Благодаря АРН относительные отклонения напряжения $\varepsilon = U_N^{-1}(U - U_N)$ удается снизить на один-два порядка по сравнению со значениями без АРН. Тем самым во всем диапазоне нормальных режимов нагрузки синхронных генераторов достигается кондиционность качества их напряжения, определяемая в установившихся режимах предельным неравенством

$$\varepsilon_N \geqslant \left| \frac{U - U_N}{U_N} \right| 100\%, \qquad (2.9.1)$$

где $\varepsilon_N$ — точность поддержания напряжения, требуемая нормами на качество напряжения.

Для автономных электроэнергетических систем, к которым относятся судовые системы, характерны переходные процессы, обусловленные внезапными изменениями нагрузки. Такие изменения сопровождаются увеличенными откло-

нениями (выбросами) напряжения, называемыми провалами напряжения, в случаях, когда разность $U(t) - U_N$ имеет отрицательный знак. На рис. 2.9.2 показаны графики изменения периодической составляющей напряжения $\Delta U(t) = U(t) - U_N$ внезапно нагружаемого генератора с медленно действующим *2* и быстродействующим *1* АРН, а также без АРН *3*.

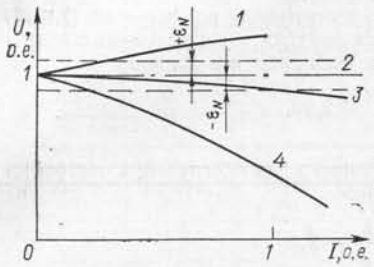



Рис. 2.9.1. Внешние характеристики синхронного генератора.
*1* — без АРН при $\varphi = -\frac{\pi}{2}$; *2* — $U$ = const; *3* — с АРН; *4* — без АРН при $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

Качество напряжения в переходных режимах принято контролировать по координатам $\Delta u$ и $t$ нескольких «критериальных» точек (кривая *2* на рис. 2.9.2), означающих:

*A* — начало переходного процесса (непосредственно в начале изменения тока нагрузки);

*B* — максимальный выброс напряжения в течение всего переходного процесса;

*C* — первое восстановление напряжения до уровня предельных отклонений в статических режимах;

*D* — окончание переходного процесса. Далее отклонения напряжения не превосходят отклонений в статических режимах $\varepsilon_N$.

Для количественного описания качества напряжения выбираются следующие величины (координаты):

$\Delta u_0$ — начальное изменение напряжения (точка *A*);

$\Delta u_{max}$ — максимальное изменение напряжения, совпадающее при быстродействующих АРН с $\Delta u_0$ (точка *B*);

$t_{max}$ — время, соответствующее $\Delta u(t) = \Delta u_{max}$ (точка *B*);

$t_{восст}$ — время восстановления напряжения (точка *C*), определяемое равенством $|\Delta u(t_{восст})| = \varepsilon_N$;

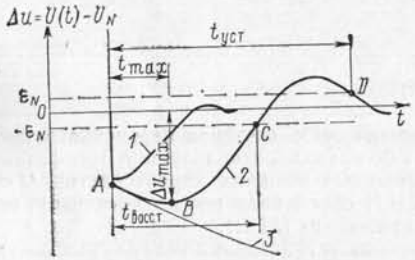



Рис. 2.9.2. Изменение напряжения внезапно нагружаемого синхронного генератора.

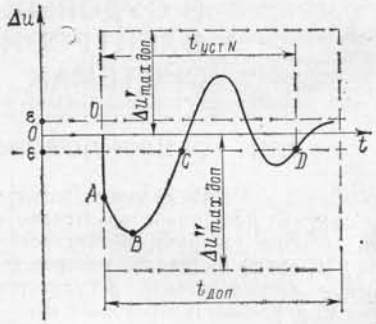



Рис. 2.9.3. Сравнение отклонений параметров электроэнергии с допустимыми нормами.

$t_{уст}$ — время установления напряжения (точка *D*), определяемое неравенством $|\Delta u(t \geqslant t_{уст})| \leqslant \varepsilon_N$.

Свойства потребителей электроэнергии требуют ограничения отрицательных (провалов) и положительных максимальных изменений напряжения и времени установления напряжения (рис. 2.9.3). Поэтому для СЭЭС нормируются предельные значения положительных и отрицательных изменений напряжения $\Delta u'_{max\,N}$ и $\Delta u''_{max\,N}$ и времени установления напряжения $t_{уст\,N}$:

$$-\Delta u''_{max\,N} \leqslant \Delta u_{max} \leqslant \Delta u'_{max\,N};$$
$$t_{уст} \leqslant t_{уст\,N}. \qquad (2.9.2)$$



Допустимые сочетания $\Delta u_{max\,доп}$ для различных потребителей различны. В судовых электрических системах величины $\Delta u_{max}$ и $t_{уст}$ генераторов, подвергаемых внезапным возмущениям при включении и отключении нагрузки, должны быть ограничены настолько, чтобы обеспечивалась нормальная работа всех потребителей электроэнергии в системе. Последние, в свою очередь, проектируются таким образом, чтобы выбранные (нормированные) значения $\Delta u_{max\,N}$ и $t_{уст\,N}$ для СЭЭС в целом не вызывали нарушений их нормальной работы.

Из ряда возможных вариантов динамических режимов в рассматриваемом плане большое значение имеют режимы, связанные с внезапным увеличением тока нагрузки генератора при низком (индуктивном) коэффициенте мощности. Это объясняется тем, что внезапные изменения тока в сторону увеличения обычно больше, чем в сторону уменьшения, и тем, что возникающие при этом снижения или провалы напряжения $\Delta u_{max}(t) > 0$ в большей мере связаны с нарушением нормальной работы потребителей, чем такие же по величине повышения напряжения $\Delta u_{max}(t) < 0$. По Правилам Регистра СССР максимальное изменение напряжения $|\Delta u_{max}|$ при включении 100%-ной и отключении 50%-ной нагрузки не должно превышать 20%, а время установления напряжения $t_{уст}$ с точностью $\varepsilon = \pm 2{,}5\%$ после включения номинальной нагрузки с коэффициентом мощности 0,4 не должно превышать 1,5 с. По рекомендации МЭК, внезапное изменение тока нагрузки на 60% номинальной величины при коэффициенте мощности не более 0,4 не должно вызывать выбросов напряжения более 15%, а время его установления с точностью $\pm 3\%$ не должно превышать 1 с.

Таким образом, для нормальной работы потребителей электроэнергии в СЭЭС необходимо, чтобы динамические выбросы напряжения не превышали регламентированных (нормированных) значений как по величине, так и по длительности. С этой целью уже на стадии проектирования СЭЭС требуется проверка предельных неравенств (2.9.2) при выбранных генераторных агрегатах в режимах наиболее сильных возмущений, вызываемых планируемыми внезапными изменениями нагрузки. Проверка выполняется в большинстве случаев расчетным путем.

Задача расчета динамических изменений напряжения регулируемого синхронного генератора, возмущаемого изменением нагрузки в СЭЭС, решается с помощью математических моделей генератора, его системы регулирования возбуждения, первичного двигателя и, наконец, нагрузки. В зависимости от цели и значимости расчета выбираются модели всех перечисленных элементов, более или менее точно их описывающие и соответственно более или менее сложные.

В случае ответственных расчетов, требующих повышенной точности (с учетом большого числа влияющих факторов), модели оказываются настолько сложными, что количественные результаты могут быть получены лишь при использовании вычислительной техники (см. [11]).

Менее точная оценка выбросов (провалов) напряжения может производиться на упрощенных моделях, позволяющих получить решения в аналитической (алгебраической) или графической формах, использование которых для получения числовых результатов не требует применения средств машинного счета.

Качество напряжения в СЭЭС определяется для тяжелых динамических режимов СЭЭС, обусловленных быстрыми (внезапными) изменениями нагрузки генераторов. Наиболее просто эта задача решается при внезапном изменении сопротивления симметричной нагрузки (цепи статора), остающегося далее постоянным в течение всего переходного режима. Учет нелинейного (динамического) характера сопротивления нагрузки существенно усложняет задачу и делает ее аналитически неразрешимой. Поэтому для расчета провалов напряжения в первом приближении задача рассматривается как линейная. Одним из вариантов ее решения является расчет качества напряжения при периодических изменениях сопротивления нагрузки с периодом, величина которого меньше длительности переходного режима, вызываемого каждым изменением сопротивления (импульсная нагрузка).

Помимо детерминированной постановки задачи расчета качества напряжения (при определенном, наперед заданном законе изменения нагрузки) возможна ее постановка в вероятностном плане, когда рассматривается возможность случайных комбинаций по величине и моменту начала изменения сопротивления

нагрузки. Методы решения при такой вероятностной постановке задачи в настоящее время еще не получили достаточного развития.

Обычно расчеты провалов напряжения производятся для следующих режимов:

а) включения статической нагрузки;
б) импульсной нагрузки;
в) пуска асинхронного двигателя;
г) переключения (включения) группы вращающихся асинхронных двигателей;
д) грубой и точной синхронизации.

## § 2.9.2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ

**Синхронный генератор без демпферных контуров с произвольной системой АРН.** Электромагнитные процессы в идеальном синхронном генераторе описываются уравнениями Горева—Парка, которые позволяют получить уравнение синхронного генератора без демпферных обмоток с постоянной частотой вращения в следующей форме (см., например, [12]), удобной для приближенных расчетов провалов напряжения при внезапном изменении проводимости нагрузки $Y$ (в относительных единицах)

$$[H'(Y_{\text{ном}})\,T_f p + 1]\,u = H(Y)\,u_f; \tag{2.9.3}$$

$$\left.\begin{aligned} H'(Y_{\text{ном}}) &= \frac{\sqrt{(rY+g)^2+(x_qY+b)^2}}{(rY+g)^2+(x_dY+b)(x_qY+b)};\\ H(Y) &= \frac{(rY+g)^2+(x'_dY+b)(x_q+b)}{(rY+g)^2+(x_dY+b)(x_qY+b)}. \end{aligned}\right\} \tag{2.9.4}$$

Расчеты $u(t)$ по (2.9.3) выполняются в предположении, что напряжение возбуждения, регулируемое АРН, описывается уравнением

$$u_f(t) = u_{f0} + (u_{f\infty} - u_{f0})\left(1 + K_{\exp}\frac{-t}{T}\right), \tag{2.9.5}$$

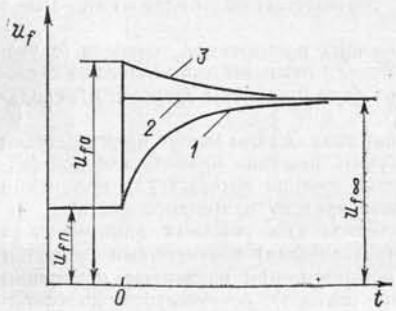



Рис. 2.9.4. Изменение напряжения возбуждения генератора при включении нагрузки.

*1* — для САРН с электромашинным возбудителем; *2* — для ССГ с повышенным насыщением возбудительного трансформатора; *3* — для ССГ с малонасыщенным возбудительным трансформатором

которое может обеспечить удовлетворительное совпадение расчетного и экспериментального определений сглаженных кривых $u_f(t)$ при правильном выборе параметров функции (2.9.5).

В законе $u_f(t)$ величины $u_{f0}$ и $u_{f\,\max}$ определяют соответственно напряжения возбуждения перед началом и после завершения переходного процесса, вызванного увеличением нагрузки генератора. Коэффициент

$$K = \frac{u_{f0} - u_{f\infty}}{u_{f\infty} - u_{f\,\text{ном}}} \tag{2.9.6}$$

имеет следующие значения: $K = 1$ для системы автоматического регулирования напряжения (САРН) с электромашинным возбудителем и регулятором комбинированного типа (например, УБК-М); $K = 0$ для самовозбуждающихся синхронных генераторов (ССГ) с повышенным насыщением возбудительного трансформатора и $K = 0{,}2 \div 0{,}3$ для ССГ с малонасыщенным возбудительным трансформатором (рис. 2.9.4). Параметр $T$ принимается равным соответственно постоянной времени контура возбуждения возбудителя или обмотки возбуждения ССГ.



Определение выбросов (провалов) напряжения современных синхронных генераторов в первом приближении может выполняться без учета динамики регулирования частоты их вращения благодаря тому, что составляющие больших провалов напряжения, обусловленные рассчитываемыми электромагнитными процессами, больше, например, в 4—6 раз, чем составляющие, обусловленные изменением частоты вращения генератора. Кроме того, максимальные значения последних имеют место, когда переходные электромагнитные процессы заканчиваются.

Минимум функции $u(t)$ определяет провал напряжения в переходном процессе, рассчитываемом согласно (2.9.4) и (2.9.5).

В частном случае для ССГ с $K = 0$ и $r = 0$ при включении нагрузки $Y_{\text{нг}} = jb_{\text{нг}}$ в режиме холостого хода при номинальном начальном значении напряжения генератора $U_{\text{ном}} = 1{,}0$ о. е. провал напряжения в относительных единицах равен

$$\Delta u = \frac{x'_d b_{\text{нг}}}{x'_d b_{\text{нг}} + 1}. \tag{2.9.7}$$

**Синхронный генератор с демпферными контурами и комбинированной системой самовозбуждения.** Практика расчетов напряжения ССГ показывает возможность определения максимальных провалов при внезапных включениях нагрузки как среднеарифметических значений начальных провалов напряжения, вычисленных с учетом демпферных обмоток $\Delta u_1$ и без учета их $\Delta u_2$:

$$\Delta u = \frac{\Delta u_1 + \Delta u_2}{2}. \tag{2.9.8}$$

Для определения $\Delta u_1$ используются уравнения генератора с проводимостью цепи нагрузки $g_{\text{нг}} + jb_{\text{нг}}$ в форме Горева—Парка:

$$\left.\begin{aligned} u_d &= -ri_d + x_q i_q + i_Q;\\ u_q &= -ri_q + i_f - x_d i_d + i_D;\\ \Psi_f &= i_f - \mu_d x_d i_d + g_1 i_D;\\ \Psi_D &= i_D - \mu'_d x_d i_d + g_2 i_f;\\ \Psi_Q &= i_q + \mu_q x_q i_q;\\ i_d &= g_{\text{нг}} u_d + b_{\text{нг}} u_q;\\ i_q &= g_{\text{нг}} u_q - b_{\text{нг}} u_d, \end{aligned}\right\} \tag{2.9.9}$$

где $g_{\text{нг}}$ и $b_{\text{нг}}$ — активная и реактивная проводимости нагрузки в относительных единицах; $i_d$, $i_q$, $i_f$ — составляющие тока статора по продольной и поперечной осям и ток возбуждения генератора.

Согласно принципу постоянства потокосцеплений в первый момент после нарушения режима работы синхронной машины потокосцепления обмотки возбуждения и демпферной обмотки можно считать неизменными. Поэтому, используя выражения для сверхпереходных реактивностей $x''_d$ и $x''_q$ и решая систему алгебраических уравнений (2.9.9) относительно составляющих напряжения $u_d$ и $u_q$ (см. например, [26]), в первый момент после изменения нагрузки получим

$$\left.\begin{aligned} u_d &= \frac{(1 + rg_{\text{нг}} + x''_d b_{\text{нг}})\,\mu_q i_{q0} - (rb_{\text{нг}} - x''_q g_{\text{нг}})\,[i_{f0} - (x_d - x''_d) i_{d0}]}{(1 + rg_{\text{нг}} + x''_d b_{\text{нг}})(1 + rg_{\text{нг}} + x''_q b_{\text{нг}}) - (rb_{\text{нг}} - x''_d g_{\text{нг}})(rb_{\text{нг}} - x''_q g_{\text{нг}})};\\ u_q &= \frac{(1 + rg_{\text{нг}} + x''_q b_{\text{нг}})\,[i_{f0} - (x_d - x''_d)\,i_{d0}] + (rb_{\text{нг}} - x''_d g_{\text{нг}})\,\mu_q x_q i_{q0}}{(1 + rg_{\text{нг}} + x''_d b_{\text{нг}})(1 + rg_{\text{нг}} + x''_q b_{\text{нг}}) - (rb_{\text{нг}} - x''_d g_{\text{нг}})(rb_{\text{нг}} - x''_q g_{\text{нг}})}. \end{aligned}\right\} \tag{2.9.10}$$

Таким образом, для определения составляющих напряжения генератора в первый момент после нарушения режима необходимо знать параметры генератора, параметры нагрузки и значения токов в исходном режиме.

Мгновенное изменение напряжения генератора находят по формулам

$$u = \sqrt{u_d^2 + u_q^2};$$
$$\Delta u = u - 1.$$

Начальное значение тока генератора при изменении нагрузки может быть определено из уравнений нагрузки:

$$\left.\begin{aligned} i_d &= g_{нг} u_d + b_{нг} u_q; \\ i_q &= g_{нг} u_q - b_{нг} u_d; \\ i &= \sqrt{i_d^2 + i_q^2}. \end{aligned}\right\} \qquad (2.9.11)$$

Для определения провала напряжения предварительно нагруженного генератора последовательно рассчитываются следующие параметры:

полная проводимость включаемой и предварительной нагрузки в относительных единицах

$$\left.\begin{aligned} Y_{вкл} &= \frac{S_{вкл}}{S_{нг}}; \\ Y_0 &= \frac{S_0}{S_{нг}}, \end{aligned}\right\} \qquad (2.9.12)$$

активная и реактивная проводимости включаемой и предварительной нагрузки

$$\left.\begin{aligned} g_{вкл} &= Y_{вкл} \cos \varphi_{вкл}; \\ b_{вкл} &= Y_{вкл} \sin \varphi_{вкл}; \\ g_0 &= Y_0 \cos \varphi_0; \\ b_0 &= Y_0 \cos \varphi_0, \end{aligned}\right\} \qquad (2.9.13)$$

проводимости нагрузки генератора в переходном режиме

$$\left.\begin{aligned} g_{нг} &= g_{вкл} + g_0; \\ b_{нг} &= b_{вкл} + b_0. \end{aligned}\right\} \qquad (2.9.14)$$

Расчеты показывают, что активное сопротивление статора генератора практически не влияет на провал напряжения. Поэтому все расчеты обычно ведутся без учета этого сопротивления. При расчете исходного режима вначале определяются:

— составляющие напряжения генератора при $u_0 = 1$ о. е.

$$\left.\begin{aligned} u_{d0} &= \frac{x_q g_0}{\sqrt{(1 + x_q b_0)^2 + (x_q g_0)^2}}; \\ u_{q0} &= \frac{1 + x_q b_0}{\sqrt{(1 + x_q b_0)^2 + (x_q g_0)^2}}, \end{aligned}\right\} \qquad (2.9.15)$$

— составляющие тока статора и ток возбуждения генератора

$$\left.\begin{aligned} i_{d0} &= g_0 u_{d0} + b_0 u_{q0}; \\ i_{q0} &= \frac{u_{d0}}{x_q}; \\ i_{f0} &= u_{q0} + x_d i_{d0}, \end{aligned}\right\} \qquad (2.9.16)$$



— составляющие напряжения генератора с учетом демпферных обмоток в первый момент после включения нагрузки

$$\left.\begin{aligned} u_{d1} &= \frac{x''_q g_{нг} [i_{f0} - (x_d - x''_d) i_{d0}] + (1 + x''_d b_{нг}) \mu_q x_q i_{q0}}{(1 + x''_d b_{нг})(1 + x''_q b_{нг}) + x''_d x''_q g_{нг}^2}; \\ u_{q1} &= \frac{(1 + x''_q b_{нг}) [i_{f0} - (x_d - x''_d) i_{d0}] - x''_d g_{нг} \mu_q x_q i_{q0}}{(1 + x''_d b_{нг})(1 + x''_q b_{нг}) + x''_d x''_q g_{нг}^2}, \end{aligned}\right\} \qquad (2.9.17)$$

где $x_d$, $x_q$, $x''_d$, $x''_q$, $\mu_q$ — параметры генератора; $g_{нг}$, $b_{нг}$ — параметры нагрузки.

Напряжение в первый момент и провал напряжения генератора определяются формулами

$$\left.\begin{aligned} u_1 &= \sqrt{u_{d1}^2 + u_{q1}^2}; \\ \Delta u_1 &= (u_1 - 1) \cdot 100\%. \end{aligned}\right\} \qquad (2.9.18)$$

Составляющие напряжения, напряжение в первый момент и провал напряжения в первый момент после включения нагрузки на генератор без учета демпферных контуров рассчитываются по формулам

$$\left.\begin{aligned} u_{d2} &= \frac{x_q g_{нг} [i_{f0} - (x_d - x'_d) i_{d0}]}{(1 + x'_d b_{нг})(1 + x_q b_{нг}) + x'_d x_q g_{нг}^2}; \\ u_{q2} &= \frac{(1 + x_q b_{нг}) [i_{f0} - (x_d - x'_d) i_{d0}]}{(1 + x'_d b_{нг})(1 + x_q b_{нг}) + x'_d x_q g_{нг}^2}; \\ u_2 &= \sqrt{u_{d2}^2 + u_{q2}^2}; \\ \Delta u_2 &= (u_2 - 1) \cdot 100\%. \end{aligned}\right\} \qquad (2.9.19)$$

Максимальный провал напряжения генератора определится из алгебраической формулы

$$\Delta u = \frac{\Delta u_1 + \Delta u_2}{2}. \qquad (2.9.20)$$

**Пример 1.** Рассчитать провалы напряжения синхронного генератора МСС250-500 мощностью 200 кВт при включении статической нагрузки в 100 кВ·А с $\cos \varphi = 0{,}76$.

Исходные данные: параметры предварительной нагрузки: $S_0 = 20$ кВ·А, $\cos \varphi_0 = 0{,}89$; параметры генератора: $x_d = 1{,}2$ о. е., $x_q = 0{,}75$ о. е., $x'_d = 0{,}23$ о. е., $x''_d = 0{,}16$ о. е., $\mu_q = 0{,}781$ о. е., $x''_q = 0{,}164$ о. е.

Расчет: 1. Проводимости предварительной, включаемой и полной нагрузки генератора определяем по формулам (2.9.12)—(2.9.13):

$$Y_{вкл} = \frac{100}{250} = 0{,}4 \text{ о. е};$$

$$Y_0 = \frac{20}{250} = 0{,}08 \text{ о. е.};$$

$$g_{вкл} = 0{,}4 \cdot 0{,}76 = 0{,}304 \text{ о. е.};$$
$$b_{вкл} = 0{,}4 \cdot 0{,}65 = 0{,}26 \text{ о. е.};$$
$$g_0 = 0{,}08 \cdot 0{,}89 = 0{,}0712 \text{ о. е.};$$
$$b_0 = 0{,}08 \cdot 0{,}459 = 0{,}0367 \text{ о. е.};$$
$$g_{нг} = 0{,}304 + 0{,}0712 = 0{,}375 \text{ о. е.};$$
$$b_{нг} = 0{,}26 + 0{,}0367 = 0{,}297 \text{ о. е.}$$

2. Составляющие напряжения и токов в исходном установившемся режиме рассчитываем по формулам (2.9.15)—(2.9.16):

$$u_{d0} = \frac{0{,}75 \cdot 0{,}0712}{\sqrt{(1 + 0{,}75 \cdot 0{,}0367)^2 + (0{,}75 \cdot 0{,}0712)^2}} = 0{,}052 \text{ о. е;}$$

$$u_{q0} = \frac{1 + 0{,}75 \cdot 0{,}0367}{\sqrt{(1 + 0{,}75 \cdot 0{,}0367)^2 + (0{,}75 \cdot 0{,}0712)^2}} = 0{,}998 \text{ о. е.;}$$

$$i_{d0} = 0{,}0712 \cdot 0{,}052 + 0{,}0367 \cdot 0{,}998 = 0{,}04 \text{ о. е.;}$$

$$i_{q0} = \frac{0{,}052}{0{,}75} = 0{,}069 \text{ о. е.;}$$

$$i_{f0} = 0{,}998 + 1{,}2 \cdot 0{,}04 = 1{,}05 \text{ о. е.}$$

3. Составляющие напряжения, напряжение и провал напряжения генератора с учетом демпферных контуров в первый момент после включения нагрузки по формулам (2.9.17)—(2.9.18)

$$u_{d1} = \frac{0{,}164 \cdot 0{,}375\,[1{,}046 - (1{,}2 - 0{,}16) \cdot 0{,}0403] + (1 + 0{,}16 \cdot 0{,}297) \cdot 0{,}781 \cdot 0{,}75 \cdot 0{,}069}{(1 + 0{,}16 \cdot 0{,}297)\,(1 + 0{,}164 \cdot 0{,}297) + 0{,}16 \cdot 0{,}164 \cdot 0{,}375^2} =$$

$$= \frac{0{,}0637}{1{,}102} = 0{,}094 \text{ о. е.;}$$

$$u_{q1} = \frac{(1 + 0{,}164 \cdot 0{,}297)\,[1{,}046 - (1{,}2 - 0{,}16) \cdot 0{,}0403] - 0{,}16 \cdot 0{,}375 \cdot 0{,}781 \cdot 0{,}75 \cdot 0{,}069}{1{,}102} = \frac{1\,049}{1{,}102} = 0{,}953 \text{ о.е.;}$$

$$u_1 = \sqrt{0{,}094^2 + 0{,}953^2} = 0{,}954 \text{ о. е.;}$$

$$\Delta u_1 = (0{,}954 - 1) \cdot 100\% = -4{,}6\%.$$

4. Те же величины для генератора без учета демпферных контуров по формулам (2.9.19)

$$u_{d2} = \frac{0{,}75 \cdot 0{,}375\,[1{,}046 - (1{,}2 - 0{,}23) \cdot 0{,}0403]}{(1 + 0{,}23 \cdot 0{,}297)\,(1 + 0{,}75 \cdot 0{,}297) + 0{,}23 \cdot 0{,}75 \cdot 0{,}375^2} =$$

$$= \frac{0{,}283}{1{,}33} = 0{,}213 \text{ о. е.;}$$

$$u_{q2} = \frac{(1 + 0{,}75 \cdot 0{,}297)\,[1{,}046 - (1{,}2 - 0{,}23) \cdot 0{,}0403]}{1{,}33} = \frac{1{,}231}{1{,}33} = 0{,}925 \text{ о. е.;}$$

$$u_2 = \sqrt{0{,}213^2 + 0{,}925^2} = 0{,}949 \text{ о. е.;}$$

$$\Delta u_2 = (0{,}949 - 1) \cdot 100\% = -5{,}1\%.$$

5. Максимальный провал напряжения генератора согласно формуле (2.9.20)

$$\Delta u = \frac{-4{,}6 - 5{,}1}{2} = -4{,}8\%.$$

Провал напряжения при включении асинхронных двигателей рассчитывается в предположении, что составляющие проводимости цепи двигателя в начальной стадии переходного процесса сохраняют постоянное значение, равное исходному, до достижения напряжением своей минимальной величины. Поэтому аналитический расчет провала напряжения при включении асинхронного двигателя выполняется так же, как и при включении статической нагрузки. Исходные для



расчета величины $g_{вкл}$ и $b_{вкл}$ определяются по расчетным формулам двигателя с учетом частоты вращения его ротора в момент включения.

Для получения расчетных формул система уравнений асинхронного двигателя приводится к следующему виду:

$$\left.\begin{aligned} \left[r_a + \frac{\mu x s_{дв} T_r}{1 + (s_{дв} T_r)^2}\right] i_d - \left[(1 - \mu)\, x + \frac{\mu x}{1 + (s_{дв} T_r)^2}\right] i_q = u_d; \\ \left[r_a + \frac{\mu x s_{дв} T_r}{1 + (s_{дв} T_r)^2}\right] i_q + \left[(1 - \mu)\, x + \frac{\mu x}{1 + (s_{дв} T_r)^2}\right] i_d = u_q, \end{aligned}\right\} \quad (2.9.21)$$

где $r_a$ — активное сопротивление статора; $\mu$ — коэффициент связи обмоток статора и ротора двигателя; $x$ — индуктивное сопротивление статора; $s_{дв}$— скольжение двигателя; $T_r$ — постоянная времени ротора.

Из расчетных формуляров на двигатель можно получить активное сопротивление статора $r_a$, индуктивное сопротивление рассеяния статора $x_i$, индуктивное сопротивление взаимоиндукции $x_m$, активное сопротивление ротора $r'_2$, индуктивное сопротивление ротора $x'_2$. Параметры двигателя, необходимые для расчета, определяются по формулам

$$\left.\begin{aligned} x &= x_1 + x_m; \\ x_r &= x'_2 + x_m; \\ \mu &= \frac{x_m^2}{x x_r}; \\ T_r &= \frac{x_r}{r'_2}. \end{aligned}\right\} \quad (2.9.22)$$

Вводя в систему уравнений (2.9.21) обозначения

$$\left.\begin{aligned} x' &= (1 - \mu)\, x; \\ r_{экв} &= r_a + \frac{\mu x s_{дв} T_r}{1 + (s_{дв} T_r)^2}; \\ x_{экв} &= x' + \frac{\mu x}{1 + (s_{дв} T_r)^2}, \end{aligned}\right\} \quad (2.9.23)$$

получаем

$$r_{экв} i_d - x_{экв} i_q = u_d;$$

$$r_{экв} i_q + x_{экв} i_d = u_q.$$

Составляющие эквивалентной проводимости асинхронного двигателя определяются по формулам

$$\left.\begin{aligned} g_{иг} &= \frac{r_{экв}}{r_{экв}^2 + x_{экв}^2}; \\ b_{иг} &= \frac{x_{экв}}{r_{экв}^2 + x_{экв}^2}. \end{aligned}\right\} \quad (2.9.24)$$

На рис. 2.9.5—2.9.13 даны полученные на ЦВМ графики зависимости $Y_{экв}$ (эквивалентная проводимость двигателя) и cos φ распространенных типов судовых двигателей от их частоты вращения (скольжения).

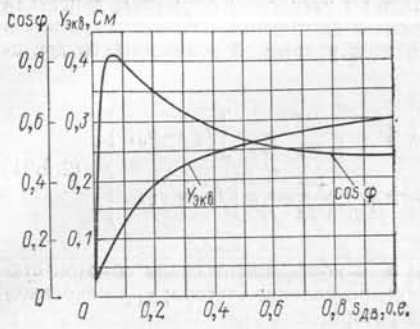



Рис. 2.9.5. Зависимости эквивалентной проводимости и коэффициента мощности от скольжения для асинхронного двигателя типа АМ61-4 ($P_{ном}$ = 8 кВт).

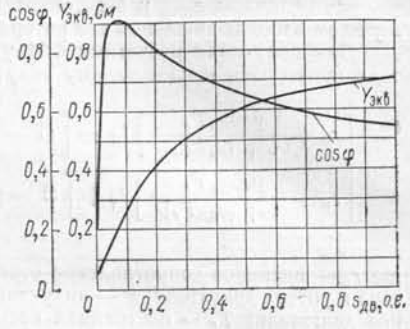



Рис. 2.9.6. Зависимости эквивалентной проводимости и коэффициента мощности от скольжения для асинхронного двигателя типа АМ62-2 ($P_{ном}$ = 14 кВт).

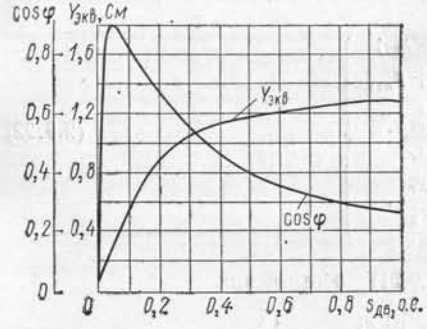



Рис. 2.9.7. Зависимости эквивалентной проводимости и коэффициента мощности от скольжения для асинхронного двигателя типа АМ72-2 ($P_{ном}$ = 25 кВт).

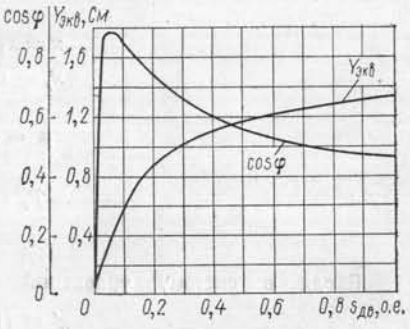



Рис. 2.9.8. Зависимости эквивалентной проводимости и коэффициента мощности от скольжения для асинхронного двигателя типа АМ82-4 ($P_{ном}$ = 32 кВт).

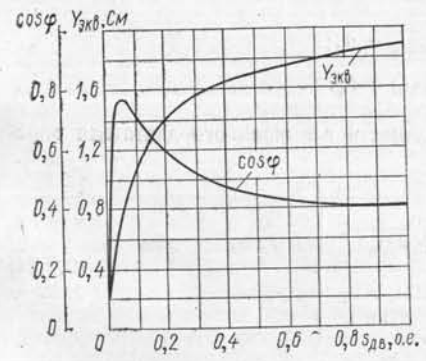



Рис. 2.9.9. Зависимости эквивалентной проводимости и коэффициента мощности от скольжения для асинхронного двигателя типа АМ102-8 ($P_{ном}$ = 45 кВт).

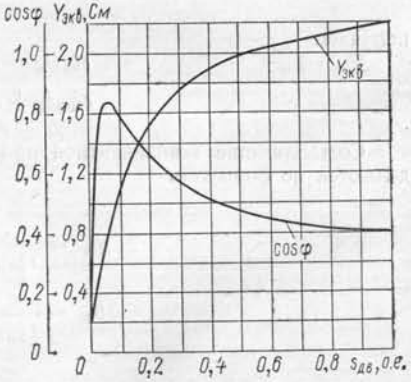



Рис. 2.9.10. Зависимости эквивалентной проводимости и коэффициента мощности от скольжения для асинхронного двигателя типа АМ92-4 ($P_{ном}$ = 55 кВт).

Для последующих расчетов значения $g_{вкл}$ и $b_{вкл}$ активной и реактивной составляющих проводимости, эквивалентной включаемому двигателю, должны быть выражены в относительных единицах генератора.

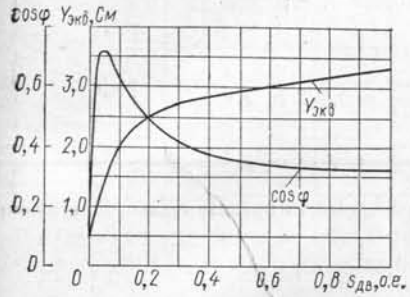



Рис. 2.9.11. Зависимости эквивалентной проводимости и коэффициента мощности от скольжения для асинхронного двигателя типа АМ111-8 ($P_{ном}$ = = 72 кВт).

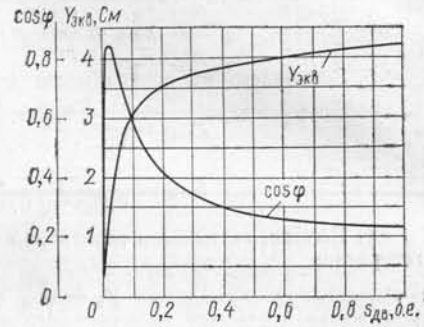



Рис. 2.9.12. Зависимости эквивалентной проводимости и коэффициента мощности от скольжения для асинхронного двигателя типа АМ112-4/8НШ ($P_{ном}$ = 85 кВт).

**Пример 2.** Рассчитать провал напряжения генератора ГСС103-8м мощностью 100 кВт при запуске асинхронного двигателя типа АМ81-2 мощностью 35 кВт. Предварительная нагрузка генератора составляет 40 кВ·А при $\cos\varphi_0 = 0{,}75$.

Исходные данные: параметры синхронного генератора: $x_d$ = 1,915 о. е., $x_q$ = 1,135 о. е., $x'_d$ = = 0,235 о. е., $x''_d$ = 0,136 о. е., $x''_q$ = = 0,14 о. е., $\mu_q$ = 0,877 о. е., $Z_{б.г}$ = = 1,276 Ом; параметры асинхронного двигателя: $r_a$ = 0,117 Ом; $x_1$ = = 0,369 Ом; $x_m$ = 7,75 Ом; $r'_2$ = = 0,182 Ом; $x'_2$ = 0,305 Ом.

Расчет. 1. Индуктивные сопротивления и коэффициент магнитной связи асинхронного двигателя определяются по формулам (2.9.22):

$$x = 0{,}369 + 7{,}75 = 8{,}119 \text{ Ом};$$

$$x_2 = 0{,}305 + 7{,}75 = 8{,}055 \text{ Ом};$$

$$\mu = \frac{7{,}75^2}{8{,}119\ 8{,}055} = 0{,}918 \text{ о. е.};$$

$$T_r = \frac{8{,}055}{0{,}182} = 44{,}26 \text{ синхр. с.}$$

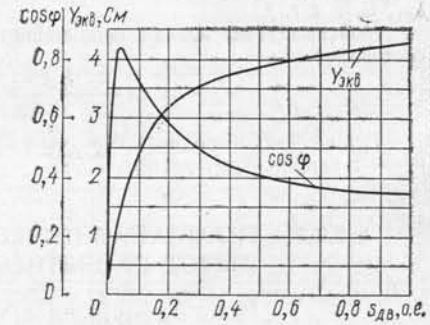



Рис. 2.9.13. Зависимости эквивалентной проводимости и коэффициента мощности от скольжения для асинхронного двигателя типа АМ101-2 ($P_{ном}$ = = 100 кВт).

2. Переходное и эквивалентные сопротивления двигателя согласно формулам (2.9.27) равны

$$x' = (1 - 0{,}918)\cdot 8{,}119 = 0{,}663 \text{ Ом};$$

$$r_{экв} = 0{,}117 + \frac{0{,}918\cdot 8{,}119\cdot 44{,}26}{1 + 44{,}26^2} = 0{,}285 \text{ Ом};$$

$$x_{экв} = 0{,}663 + \frac{0{,}918\cdot 8{,}119}{1 + 44{,}26^2} = 0{,}666 \text{ Ом},$$

или в относительных единицах генератора

$$r_{\text{экв}} = \frac{0{,}285}{1{,}276} = 0{,}224 \text{ о. е.};$$

$$x_{\text{экв}} = \frac{0{,}666}{1{,}276} = 0{,}522 \text{ о. е.};$$

3. Эквивалентные проводимости двигателя

$$g_{\text{экв}} = \frac{0{,}224}{0{,}224^2 + 0{,}522^2} = 0{,}693 \text{ о. е.};$$

$$b_{\text{экв}} = \frac{0{,}522}{0{,}224^2 + 0{,}522^2} = 1{,}618 \text{ о. е.}$$

4. Полная, активная и реактивная проводимости предварительной нагрузки генератора

$$Y_0 = \frac{40}{125} = 0{,}32 \text{ о. е.};$$

$$g_0 = 0{,}32 \cdot 0{,}75 = 0{,}24 \text{ о. е.};$$
$$b_0 = 0{,}32 \cdot 0{,}661 = 0{,}212 \text{ о. е.}$$

5. Суммарная активная и реактивная проводимости нагрузки генератора в в момент включения двигателя

$$g_{\text{нг}} = 0{,}24 + 0{,}693 = 0{,}933 \text{ о. е.};$$
$$b_{\text{нг}} = 0{,}212 + 1{,}618 = 1{,}83 \text{ о. е.}$$

Дальнейший расчет ведется так же, как и для случая включения статической нагрузки, т. е. по формулам (2.9.15)—(2.9.20) определяются $u_{d0}$, $u_{q0}$, $i_{d0}$, $i_{q0}$, $u_{d1}$, $u_{q1}$, $u_{d2}$, и т. д.

Максимальный провал напряжения генератора при включении двигателя составляет

$$\Delta u = \frac{-18{,}1 - 27{,}1}{2} = -22{,}6\%.$$

Если расчет выполнять без учета предварительной нагрузки, то получится провал напряжения, равный 23,5%.

## § 2.9.3. ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД (МЕТОД РАСЧЕТНЫХ КРИВЫХ)

Максимальный провал напряжения внезапно нагружаемых синхронных генераторов существенно зависит [28] от ограниченного числа параметров самих генераторов ($x_d$, $x_q$, $x'_d$, $x''_d$, $T_f$), их систем регулирования возбуждения ($T_{\text{к. н}}$, $K_{\text{к}}$) и нагрузки ($Y_{\text{нг}}$, $\cos\varphi$). Для каждого генератора существует функциональная зависимость максимального провала напряжения от проводимости и коэффициента мощности нагрузки.

Предварительно вычисленные семейства таких зависимостей $\Delta u = f(Y_{\text{нг}})$ для нескольких значений коэффициента мощности (например, 0,4, 0,7, 0,8) предельно упрощают процедуру определения $\Delta u$, которая сводится к следующему. Находят полную проводимость включаемой нагрузки в относительных единицах

$$Y_{\text{нг}} = \frac{S_{\text{вкл}}}{S_{\text{нг}}}. \qquad (2.9.25)$$

Далее по расчетной кривой, соответствующей коэффициенту мощности включаемой нагрузки, определяют максимальный провал напряжения генератора. Если нагрузка имеет коэффициент мощности, отличный от значений, которые приняты в расчетных кривых, то целесообразно применять интерполяцию (экстраполяцию).



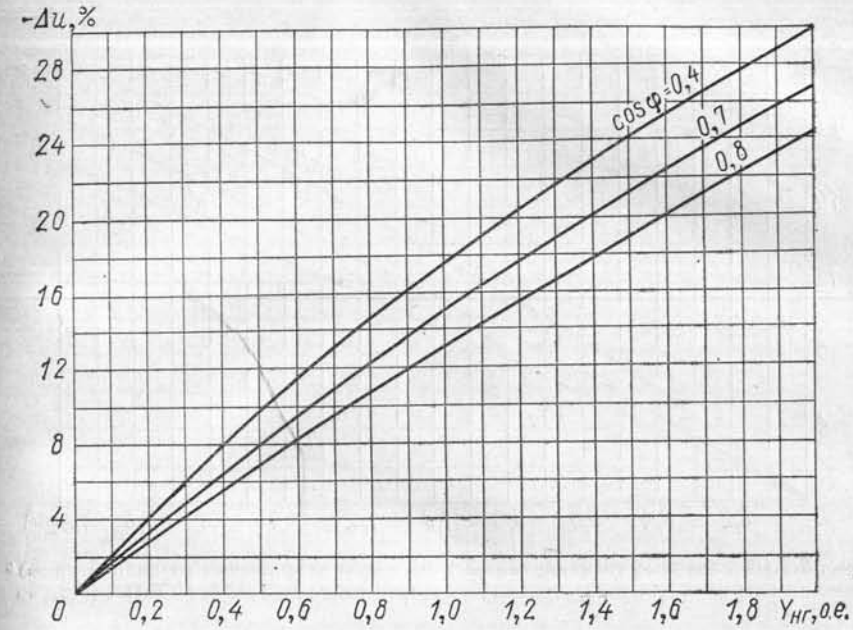



Рис. 2.9.14. Зависимости максимальных провалов напряжения от полной проводимости нагрузки для синхронных генераторов типов МСК82-4, МСС82-4 = 30 $P_{\text{ном}}$ (кВт).

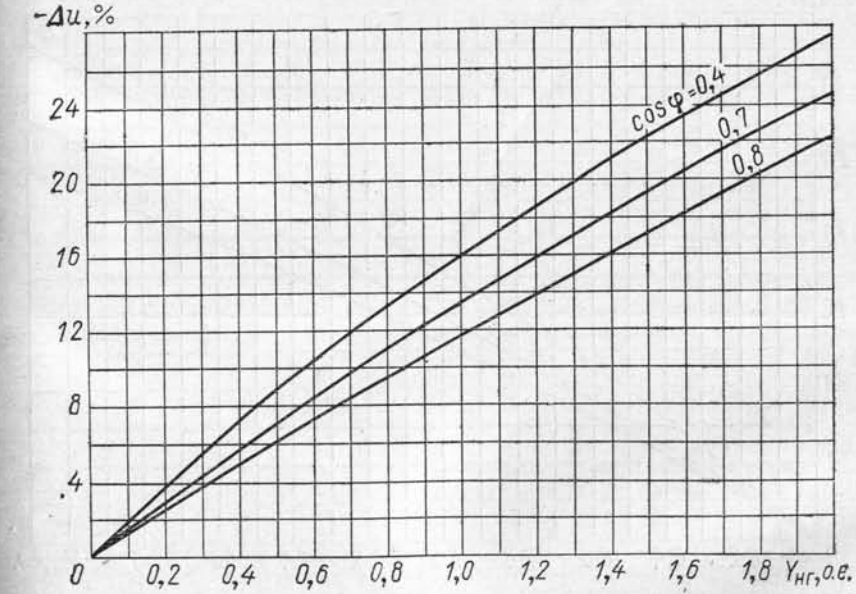



Рис. 2.9.15. Зависимости максимальных провалов напряжения от полной проводимости нагрузки для синхронных генераторов типов МСК83-4, МСС83-4 ($P_{\text{ном}}$ = 50 кВт).

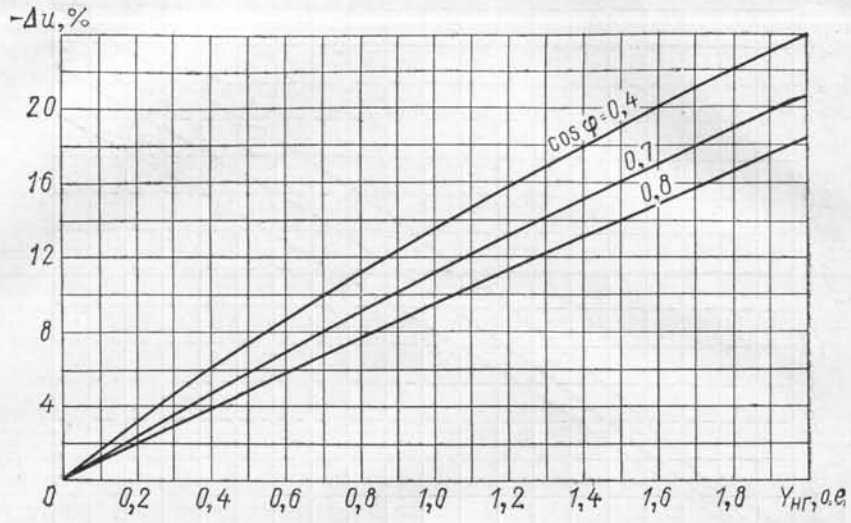



Рис. 2.9.16. Зависимости максимальных провалов напряжения от полной проводимости нагрузки для синхронных генераторов типов МСК92-4, МСС92-4 ($P_{ном}$ = = 100 кВт).

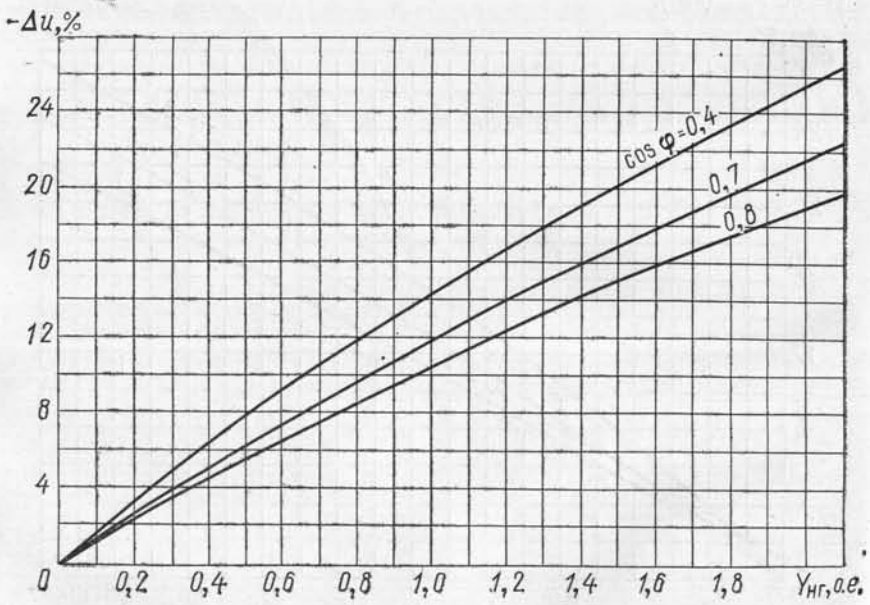



Рис. 2.9.17. Зависимости максимальных провалов напряжения от полной проводимости нагрузки для синхронного генератора типа ГСС114-8м ($P_{ном}$ = 160 кВт).



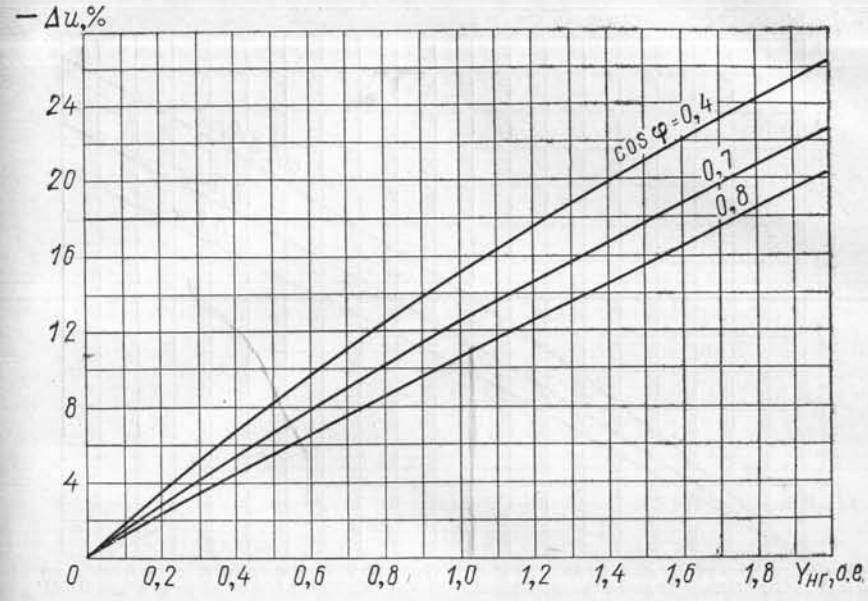



Рис. 2.9.18. Зависимости максимальных провалов напряжения от полной проводимости нагрузки для синхронных генераторов типов МСК103-4, МСС103-4 ($P_{ном}$ = = 200 кВт).

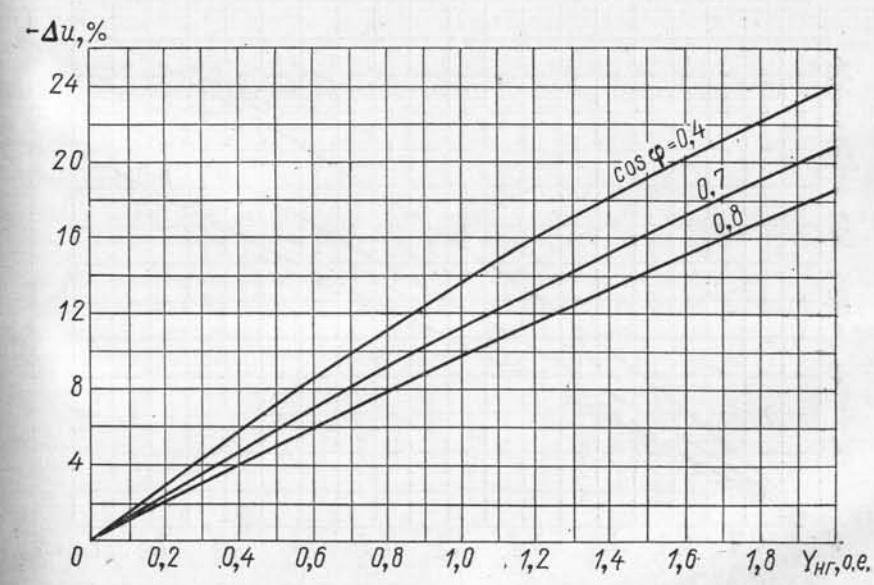



Рис. 2.9.19. Зависимости максимальных провалов напряжения от полной проводимости нагрузки для синхронного генератора типа МСС375-500 ($P_{ном}$ = 300 кВт).

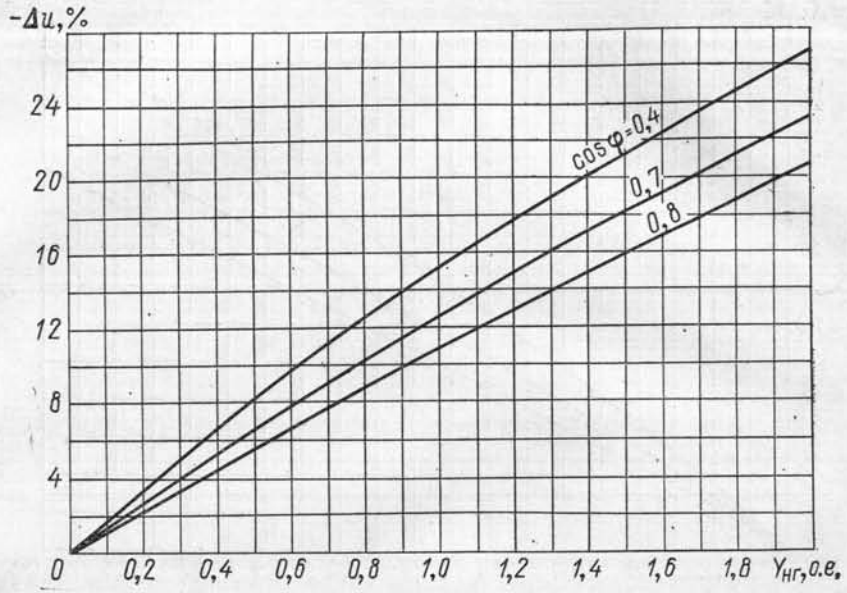



Рис. 2.9.20. Зависимости максимальных провалов напряжения от полной проводимости нагрузки для синхронного генератора типа МСС500-500 ($P_{ном}$ = 400 кВт).

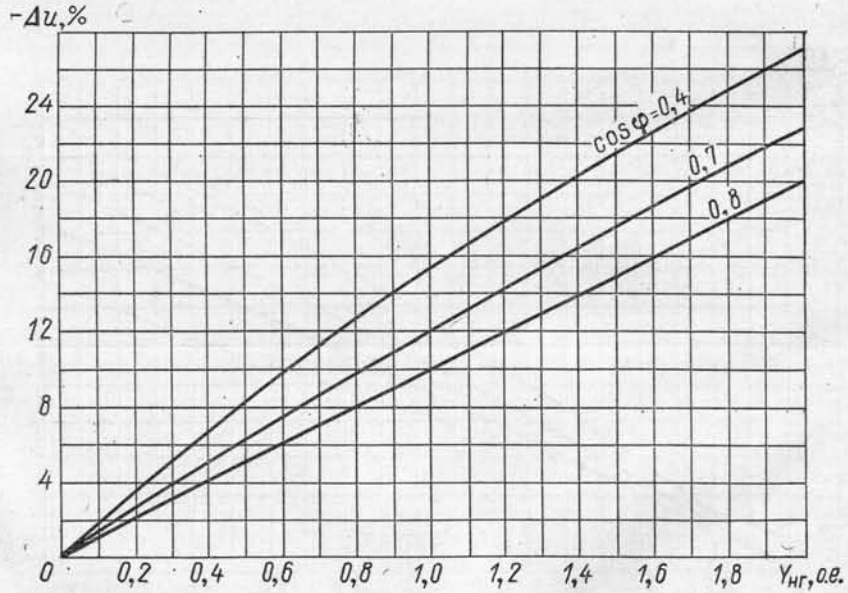



Рис. 2.9.21. Зависимости максимальных провалов напряжения от полной проводимости нагрузки для синхронного генератора типа МСК625-1500 ($P_{ном}$ = = 500 кВт).



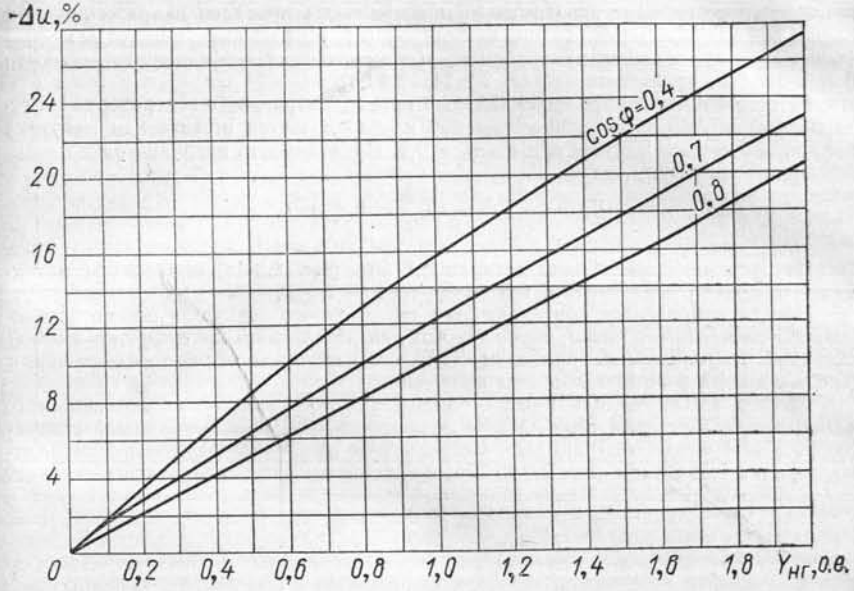



Рис. 2.9.22. Зависимости максимальных провалов напряжения от полной проводимости нагрузки для синхронного генератора типа МСК940-1500 ($P_{ном}$ = = 750 кВт).

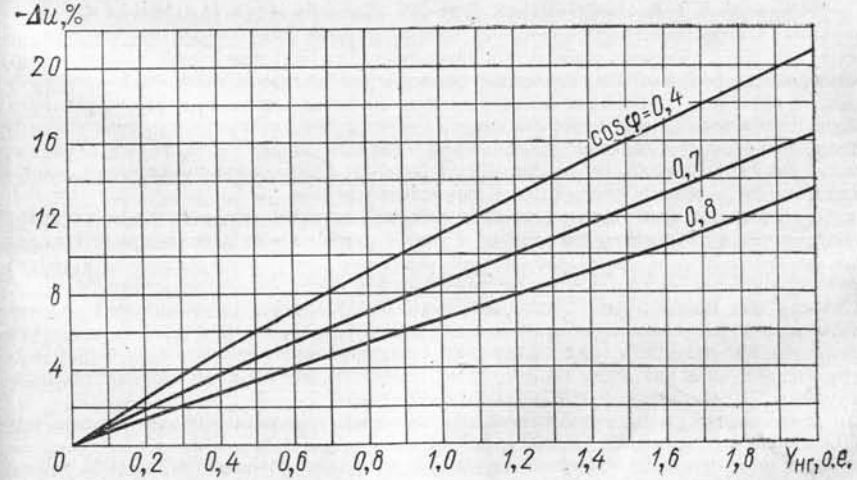



Рис. 2.9.23. Зависимости максимальных провалов напряжения от полной проводимости нагрузки для синхронного генератора типа МСК1875-1500 ($P_{ном}$ = 1500 кВт).

Расчетные графики зависимостей максимальных провалов напряжения наиболее распространенных судовых синхронных генераторов мощностью 30—1500 кВт от проводимости нагрузки $Y_{нг}$ (при значениях коэффициента мощности 0,4, 0,7 и 0,8) приведены на рис. 2.9.14—2.9.23.

**Пример 3.** Определить максимальный провал напряжения генератора. На генератор типа МСК103-4 мощностью 200 кВт включается статическая нагрузка полной мощностью 100 кВт при $\cos\varphi = 0{,}7$. Проводимость нагрузки равна

$$Y_{нг} = \frac{S_{вкл}}{S_{нг}} = \frac{100}{250} = 0{,}4 \text{ о. е.}$$

По расчетной кривой для $\cos\varphi = 0{,}7$ (см. рис. 2.9.18) определяем максимальный провал напряжения, который равен — 5,3%.

Провал напряжения при включении асинхронного двигателя можно определить по расчетным кривым, полагая, что двигатель эквивалентируется суммой активной и реактивной проводимостей, соответствующих частоте вращения (скольжению) его ротора в момент включения.

**Пример 4.** Определить провал напряжения при включении неподвижного асинхронного двигателя типа АМ82-4 мощностью 32 кВт на синхронный генератор МСК92-4 мощностью 100 кВт. По расчетной кривой двигателя его проводимость равна 1,35 См (см. рис. 2.9.8). Базовое сопротивление генератора составляет

$$Z_{б.г} = \frac{U_ф}{I_ф} = \frac{230}{180} = 1{,}28 \text{ Ом.}$$

Эквивалентная проводимость двигателя и его $\cos\varphi$ (см. рис. 2.9.8) равны

$$Y_{нг} = 1{,}35 \cdot 1{,}28 = 1{,}73 \text{ о. е.}; \quad \cos\varphi = 0{,}4.$$

По расчетным кривым для генератора МСК92-4 (см. рис. 2.9.16) определяем провал напряжения: $\Delta u = -21{,}5\%$.

## § 2.9.4. РАСЧЕТЫ НА ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Расчеты провалов напряжения на ЦВМ выполняются в тех случаях, когда необходимы уточненное определение процесса изменения напряжения во времени, учет изменения параметров системы в течение переходного процесса, учет изменения частоты вращения генераторных агрегатов, учет относительных качаний роторов параллельно работающих генераторов, т. е. в случаях, когда аналитические (графоаналитические) методы либо дают малую точность, либо связаны с чрезмерно трудоемкими вычислениями.

Существуют программы расчета изменений напряжения в судовой электроэнергетической системе с одиночным и двумя параллельно работающими генераторными агрегатами. Наиболее распространенные программы включены в состав стандартной методики расчета провалов напряжения синхронных генераторов. Стандартные программы, помещенные в указанной методике, позволяют рассчитать переходные процессы, связанные с изменением напряжения в таких основных режимах работы СЭЭС, как включение статической и питание импульсной нагрузки, запуск асинхронных двигателей, переключение питания асинхронной нагрузки и синхронизация генераторных агрегатов.

Расчеты могут быть выполнены на любой из цифровых вычислительных машин семейств «Минск-22», М-220 и БЭСМ-4.

Расчеты провалов напряжения по стандартным программам на ЦВМ имеют небольшую трудоемкость и могут выполняться без участия заказчика. Заказчик должен только предварительно заполнить формуляр с исходными данными на расчет.

В формуляр входят числовые величины активных и индуктивных сопротивлений генераторов и асинхронных двигателей, их постоянные времени, параметры



регуляторов напряжения возбуждения, регуляторов частоты вращения первичных двигателей и др. Порядок заполнения формуляров исходных данных приводится в инструкциях к стандартным программам, а все необходимые параметры электрических машин имеются в приложении к стандартной методике расчета.

Для выполнения расчета переходного процесса необходимо ввести в память ЦВМ стандартную программу, а затем исходные данные, предварительно отперфорированные на бумажной ленте или картах. Перфорация исходных данных для расчета любого из рассматриваемых режимов занимает у перфораторщицы несколько минут. Расчет переходного режима выполняется в полуавтоматическом режиме и начинается с установки во вводном устройстве ЦВМ лент или колоды карт с программой и исходными данными. После нажатия кнопки «Ввод» или «Пуск» программа и исходные данные вводятся в оперативное запоминающее устройство ЦВМ и автоматически начинается расчет соответствующего переходного режима.

Указанные операции, как правило, выполняются работниками вычислительного центра — специалистами по обслуживанию ЦВМ. На расчет переходного процесса длительностью 1 с затрачивается в зависимости от рассматриваемого режима 10—30 мин машинного времени ЦВМ. Таким образом, участие заказчика в расчете заключается в передаче на вычислительный центр стандартной программы и исходных данных, получении выполненного расчета и анализа его результатов.

Расчет на ЦВМ дает значительно больший объем информации, чем расчет аналитическим методом или с помощью кривых. Машина позволяет получить данные по токам, напряжениям, электромагнитным моментам, активной мощности электрических машин, напряжению возбуждения генераторов, скольжению асинхронных двигателей, частоте вращения генераторных агрегатов и ряду других переменных. Печать всех этих данных производится через достаточно близкие промежутки времени, например через каждые 0,02 с переходного процесса, что позволяет легко анализировать изменение качества электроэнергии во времени.

В качестве примера рассмотрим особенности расчета переходных процессов в режиме синхронизации генераторных агрегатов, который является одним из самых сложных и ответственных переходных режимов СЭЭС. Даже при точной синхронизации генераторов провалы напряжения могут быть значительными из-за того, что синхронизатор практически не обеспечивает включение генераторов при нулевом угле между осями роторов. Часто аппаратура синхронизации, например при синхронизации через реактор, выбирается по допустимому провалу напряжения. Поэтому расчет провалов напряжения генераторов в этом режиме имеет большой практический интерес.

Разработка метода расчетных кривых для определения провалов напряжения в режимах синхронизации невозможна из-за большого разнообразия условий протекания этих режимов.

Расчет провалов напряжения генераторов в режиме синхронизации может быть выполнен аналитически, однако существующие для этого простые формулы не обеспечивают необходимой точности и полноты расчета, а достаточно точные формулы, полученные из уравнений Горева—Парка, громоздки, и расчет по ним весьма трудоемок. Кроме того, для практических целей знание только величины провала напряжения недостаточно. Так, например, для оценки динамической устойчивости СЭЭС в этом режиме необходимо знать изменение во времени таких величин, как токи, электромагнитные моменты, частоты вращения и угол между осями роторов генераторов.

Разработанный для этой цели алгоритм учитывает наличие в СЭЭС двух генераторных агрегатов с первичными двигателями любого типа. Алгоритм предусматривает расчет исходных режимов генераторов перед синхронизацией. Каждый генератор имеет эквивалентную асинхронную нагрузку. Алгоритм использует математическое описание синхронных генераторов на основе дифференциальных уравнений Горева—Парка без учета трансформаторных ЭДС и ЭДС скольжения. Уравнения эквивалентной асинхронной нагрузки записаны без учета сверхпереходных электромагнитных процессов. По разработанному алгоритму на международном алгоритмическом языке АЛГОЛ-60 составлена программа расчета, по ко-

торой на ЦВМ, имеющей транслятор ТА-1М, могут быть выполнены расчеты не только синхронизации генераторов, но и запуска асинхронного двигателя, самозапуска асинхронной нагрузки после возникновения и отключения короткого замыкания в системе с параллельно работающими генераторными агрегатами.

Программа обеспечивает печать в виде таблицы следующих переменных переходного процесса: времени, напряжений и токов генераторов, токов эквивалентной асинхронной нагрузки, токов статической нагрузки, реактивной мощности и электромагнитного момента генераторов, движущего момента первичных двигателей, скольжения агрегатов и эквивалентных асинхронных двигателей, электромагнитных моментов эквивалентной асинхронной нагрузки, напряжения возбуждения генераторов, тока между генераторами и угла между осями роторов генераторов.

# Глава 2.10. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СЭЭС

## § 2.10.1. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Одним из критериев эффективности судовых электроэнергетических систем является качество электрической энергии в установившихся и переходных режимах, которое характеризуется рядом показателей.

В установившихся режимах к ним относятся:

1. Длительное отклонение напряжения $\Delta U_{дл}$ — разность между фактическим значением напряжения в установившемся режиме $U$ и его номинальным значением $U_{ном}$ для источника или потребителя, выраженная в процентах от соответствующей номинальной величины:

$$\Delta U_{дл} = \frac{U - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%. \qquad (2.10.1)$$

2. Длительное отклонение частоты $\Delta f_{дл}$ — разность между фактическим значением частоты в установившемся режиме $f$ и ее номинальным значением $f_{ном}$, выраженная в процентах от номинальной величины:

$$\Delta f_{дл} = \frac{f - f_{ном}}{f_{ном}} \cdot 100\%. \qquad (2.10.2)$$

3. Коэффициент несимметрии (небаланса) напряжения основной частоты в трехфазной системе — выраженное в процентах отношение разности между наибольшим $U_{max}$ и наименьшим $U_{min}$ значениями линейного напряжения к номинальному напряжению:

$$k_{нес.\,н} = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{ном}} \cdot 100\%. \qquad (2.10.3)$$

4. Коэффициент амплитудной низкочастотной модуляции напряжения переменного тока — выраженное в процентах отношение амплитуды огибающей модулированного напряжения $\Delta U_{мод}$ к амплитудному значению номинального напряжения $U_{ном}$:

$$k_{мод.\,н} = \frac{\Delta U_{мод}}{U_{ном}} \cdot 100\%. \qquad (2.10.4)$$



Этот коэффициент определяется так же, как полуразность наибольшего $U_{max\ мод}$ и наименьшего $U_{min\ мод}$ значений амплитуды модулированного напряжения в процентах от амплитудного значения номинального напряжения $U_{ном}$:

$$k_{мод.\,н} = \frac{U_{max\ мод} - U_{min\ мод}}{2U_{ном}} \cdot 100\%. \qquad (2.10.5)$$

Модуляция напряжения может характеризоваться частотой модуляции $f_{мод}$ (в герцах), являющейся обратной величиной периода огибающей модулированного напряжения $T_{мод}$ (в секундах):

$$f_{мод} = \frac{1}{T_{мод}}. \qquad (2.10.6)$$

5. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения — выраженное в процентах отношение квадратного корня из суммы квадратов действующих значений высших гармонических составляющих $U_\nu$ данной периодической кривой к действующему значению ее основной гармонической составляющей $U_1$:

$$k_{иск.\,син} = \frac{\sqrt{\sum_{\nu=2}^{\infty} U_\nu^2}}{U_1} \cdot 100\%. \qquad (2.10.7)$$

Порядок последней учитываемой гармоники определяется исходя из требуемой точности определения $k_{иск.\,син}$.

6. Коэффициент пульсации напряжения постоянного тока:

а) отношение амплитуды низшей гармоники переменной составляющей выпрямленного напряжения $U_\mu$ к его среднему значению $U_{ср}$:

$$k_{пульс} = \frac{U_\mu}{U_{ср}} \cdot 100\%; \qquad (2.10.8)$$

б) отношение полуразности максимального $U_{max}$ и минимального $U_{min}$ мгновенных значений выпрямленного напряжения к его среднему значению:

$$k'_{пульс} = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{ср}} \cdot 100\%; \qquad (2.10.9)$$

в) отношение полуразности максимального и минимального мгновенных значений выпрямленного напряжения к полусумме этих величин:

$$k''_{пульс} = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}} \cdot 100\%; \qquad (2.10.10)$$

г) отношение действующего значения переменной составляющей выпрямленного напряжения (с учетом всех гармонических составляющих) $U_{\sim д}$ к его среднему значению:

$$k'''_{пульс} = \frac{U_{\sim д}}{U_{ср}} \cdot 100\%. \qquad (2.10.11)$$

Для единообразия оценки пульсации напряжения при различных его средних значениях целесообразно в формулах (2.10.8), (2.10.11) $U_{ср}$ заменить на $U_{ном}$, а в формуле (2.10.10) — на $2U_{ном}$.

В переходных режимах показатели качества электроэнергии следующие:

1. Кратковременные отклонения напряжения $\Delta U_{кр}$ — разность между минимальным $U_{min}$ или максимальным $U_{max}$ значениями напряжения при переходном режиме в системе и номинальным напряжением $U_{ном}$ источника или потребителя, выраженная в процентах от соответствующей номинальной величины:

$$-\Delta U_{кр} = \frac{U_{min} - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%; \qquad (2.10.12)$$

$$+\Delta U_{кр} = \frac{U_{max} - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%. \qquad (2.10.13)$$

2. Кратковременные отклонения частоты переменного тока $\Delta f_{кр}$ — разность между минимальным $f_{min}$ или максимальным $f_{max}$ значениями частоты при переходном режиме в системе и номинальным значением частоты $f_{ном}$, выраженная в процентах от номинальной частоты тока:

$$-\Delta f_{кр} = \frac{f_{min} - f_{ном}}{f_{ном}} \cdot 100\%; \qquad (2.10.14)$$

$$+\Delta f_{кр} = \frac{f_{max} - f_{ном}}{f_{ном}} \cdot 100\%. \qquad (2.10.15)$$

## § 2.10.2. ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

С целью определения кондиционности электрической энергии, т. е. ее приемлемости для потребителей, введены нормы качества электроэнергии на клеммах потребителей. Эти нормы с одной стороны являются требованиями к потребителям электроэнергии и определяют условия, при которых они должны нормально работать. С другой стороны — это требования к СЭЭС как к системе электроснабжения, которые должны быть обеспечены на клеммах всех судовых потребителей электроэнергии во всех режимах СЭЭС.

Для обеспечения кондиционности электроэнергии и оптимизации ее качества предъявляются следующие требования:

1. К потребителям электроэнергии:

а) по допустимому качеству электроэнергии на клеммах, при котором они должны нормально работать;

б) по уменьшению их воздействия на качество электроэнергии сети питания, т. е. уменьшению несимметрии, несинусоидальности и пульсаций потребляемого тока.

2. К источникам электроэнергии:

а) по качеству напряжения в режиме холостого хода и при стабильной линейной симметричной нагрузке с номинальным коэффициентом мощности;

б) по параметрам и характеристикам источников и их систем регулирования, определяющим реакцию источников на плавное и резкое изменение нагрузки с определенным коэффициентом мощности, потребляющей в различной степени несимметричный, несинусоидальный, пульсирующий ток. Косвенно это учитывается требованиями к качеству электроэнергии источников при типовых нагрузках в установившихся и переходных режимах.

3. К промежуточным между источниками и потребителями элементам СЭЭС:

а) требования, аналогичные предъявляемым к потребителям;

б) требования, аналогичные предъявляемым к источникам;

в) требования по степени передачи электрических возмущений с входа на выход и со стороны нагрузки — в сеть питания.

4. К СЭЭС в целом:

а) по параметрам и взаимосвязи источников электроэнергии;

б) по схемам распределения электроэнергии;

в) по допустимым режимам работы и т. д.

Все нормируемые требования к качеству электроэнергии СЭЭС сосредоточены в нормативных документах, основными из которых являются Правила классификации и постройки морских судов Регистра СССР, Правила классификации и постройки речных судов Регистра РСФСР с опубликованными дополнениями и изменениями.

Из числа показателей качества электроэнергии, не определяемых количественно в указанных Правилах, наибольшее практическое значение имеют: одновременные отклонения напряжения и частоты в разные стороны ($+\Delta U$, $-\Delta f$), несимметрия напряжения, амплитудная низкочастотная модуляция напряжения и искажение синусоидальности кривой напряжения.

**Одновременные отклонения напряжения и частоты в разные стороны.** В установившихся и переходных режимах СЭЭС знак отклонения частоты может не



соответствовать знаку отклонения напряжения. Это обусловлено тем, что в установившемся режиме знак отклонения частоты у всех потребителей СЭЭС, получающих питание от общесудовых источников электроэнергии, один и тот же (плюс или минус). В то же время отклонения напряжения у потребителей близко расположенных к ГРЩ, как правило, имеют знак плюс, а у потребителей, удаленных от ГРЩ, — минус.

В переходных режимах возможны отклонения напряжения и частоты в разные стороны, так как имеет место перерегулирование напряжения при его установлении после резкого изменения нагрузки. Величина перерегулирования зависит от типа регулятора напряжения источника и характера процесса изменения нагрузки. В связи с этим возможен режим, когда отклонение напряжения при переходном процессе после наброса нагрузки будет иметь знак плюс (при перерегулировании), а отклонение частоты — знак минус. Такие режимы могут привести к нежелательным последствиям, в частности, к насыщению трансформаторов, что приведет к увеличению тока намагничивания. При этом возможно срабатывание защиты по току в схемах потребителей, а также выход из строя потребителя или его отдельных внутренних цепей.

В СЭЭС имеют место случаи, когда электромашинный источник или преобразователь электроэнергии с подключенными потребителями по какой-либо причине работает в режиме свободного выбега и напряжение генератора поддерживается системой АРН некоторое время (до 10—15 с) на определенном уровне, а частота $f$ постепенно уменьшается. При этом возможно резкое увеличение потребляемого тока за счет увеличения тока намагничивания трансформаторных элементов потребителей и уменьшения индуктивного сопротивления их внутренних цепей.

**Несимметрия напряжения в трехфазных системах.** Основной причиной возникновения несимметрии напряжения в трехфазных системах является наличие однофазных потребителей электроэнергии. При прочих равных условиях наибольшая несимметрия напряжения будет в случае включения однофазной нагрузки на генератор, работающий в режиме холостого хода. Трехфазная симметричная нагрузка способствует уменьшению несимметрии напряжения, вызванной однофазной нагрузкой. В системах малой мощности, особенно с применением электромашинных преобразователей с трехфазными генераторами мощностью 1—50 кВт, несимметрия напряжения будет увеличиваться за счет несимметрии ЭДС генератора, которая, согласно техническим условиям, допускается в ряде случаев до 2%. Для генераторов большей мощности несимметрия ЭДС, как правило, не нормируется, а измерения показывают, что она составляет не более 0,1—0,2% (реже 0,5—0,6%).

Несимметрия напряжения может оказать влияние на работу асинхронных электродвигателей. Однако ее величина на судах Регистра СССР косвенно ограничена максимальной величиной допустимой несимметрии тока, потребляемого от судовых генераторов, равной 10% номинального тока генератора. В этих условиях несимметрия напряжения будет около 3%.

Несимметрия напряжения оказывает влияние и на работу судовой радиоэлектронной техники (РЭТ), большинство функциональных устройств которой получают питание через свои блоки питания, содержащие однофазные и трехфазные вторичные источники питания (ВИП). Если ВИП являются выпрямительными устройствами, то при однофазных ВИП несимметрия напряжения может проявиться как дополнительное увеличение отклонений напряжения; при трехфазных ВИП несимметрия напряжения может проявиться на работе функциональных устройств РЭТ как дополнительная переменная составляющая выпрямленного напряжения частотой ниже частоты, на которую рассчитаны сглаживающие фильтры в ВИП. Чувствительность РЭТ к несимметрии напряжения определяется параметрами и характеристиками фильтров и стабилизаторов, применяемых в ВИП и блоках питания РЭТ.

**Амплитудная низкочастотная модуляция напряжения.** Возникновение амплитудной низкочастотной модуляции (НЧМ) напряжения обусловлено как внутренними причинами, заложенными в самом источнике или преобразователе электрической энергии, так и внешними для источника возмущениями в системе. Внутренние причины вызывают НЧМ напряжения, как правило не превышающую

0,1—0,4%. Внешние причины — импульсно-циклическое потребление энергии — могут вызывать модуляцию напряжения до 1% и более, в зависимости от соотношения мощности источника и импульсов нагрузки (например, эхолотов, рыбопоисковой аппаратуры, периодически включаемых электроприводов и других потребителей с импульсно-циклическим режимом работы). При этом частота модуляции определяется частотой следования импульсов потребляемого тока.

Модуляция напряжения может оказать влияние на работу судовой РЭТ, особенно радиолокационных станций (колеблется луч на экране электронно-лучевого индикатора), что затрудняет работу оператора. Это может наблюдаться и на индикаторах рыбопоисковой аппаратуры. В то же время некоторые устройства радиосвязи нормально работают при модуляции напряжения до 1—2%.

Анализ показал, что чувствительность РЭТ к НЧМ напряжения определяется параметрами и характеристиками стабилизаторов напряжения постоянного тока, применяемых в блоках питания РЭТ.

**Искажение синусоидальности кривой напряжения переменного тока.** Причинами возникновения искажений синусоидальности кривой напряжения в системе могут быть как внутренние для источников электроэнергии факторы, так и внешние. Внутренние факторы, как правило, не вызывают искажений более 2—5%. Однако при работе генераторов на штатную судовую нагрузку искажения напряжения иногда могут достигать 20%. Это определяется влиянием нелинейной нагрузки. Если к генератору синусоидального напряжения присоединить нелинейное сопротивление, то потребляемый ток будет иметь несинусоидальную форму. Падение напряжения высших гармонических составляющих тока в индуктивностях источника и линии вызовут соответствующие искажения формы кривой напряжения в системе.

Из судовых потребителей основной нелинейной нагрузкой являются статические полупроводниковые преобразователи электроэнергии, которые потребляют из сети несинусоидальный ток.

Искажение напряжения, вызываемое статическими преобразователями, в основном зависит от схемы статического преобразователя, глубины его регулирования и характера нагрузки, а также от параметров судовых источников электроэнергии и соотношения их мощности и мощности подключенных преобразователей.

Нелинейной нагрузкой для источника электроэнергии является также РЭТ, так как блоки питания аппаратуры — это, как правило, различного рода статические преобразователи электроэнергии.

Искажения напряжения более 10% могут вызвать дополнительный нагрев судовых генераторов и электродвигателей, что потребует соответствующего снижения мощности их нагрузки. Искажения напряжения могут снизить точность работы систем автоматического регулирования и управления судовыми генераторными агрегатами и вызвать нарушения в работе систем автоматики и РЭТ. Однако не все системы РЭТ одинаково чувствительны к искажениям напряжения. В ряде случаев влияние может проявиться при незначительной величине коэффициента искажения (3—5%) за счет избирательного влияния отдельных гармоник напряжения. Иногда допустимы искажения до 10—15%, если применяются достаточно эффективные фильтры высших гармоник напряжения во внутренних цепях постоянного тока в ВИП или проводятся мероприятия, способствующие уменьшению проникновения гармоник напряжения в функциональные устройства РЭТ.

## § 2.10.3. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И МЕРЫ ПО ЕГО УЛУЧШЕНИЮ

**Оценка отклонений напряжения.** *Длительные отклонения* напряжения на клеммах потребителей в установившихся режимах СЭЭС обусловлены величиной уставки напряжения генератора, точностью регулирования напряжения системой АРН генератора и потерями напряжения в линии от точки подключения корректора напряжения генератора до клемм потребителей электроэнергии. Расчеты потерь напряжения и выбор уставки напряжения генератора могут быть выполнены методами, изложенными в гл. 2.5. В тех случаях, когда



в норму допустимых для потребителей длительных отклонений напряжения входят его отклонения, обусловленные несимметрией и амплитудной модуляцией напряжения (например, для однофазных вторичных источников питания РЭТ) в формулу (2.5.44) необходимо ввести значения $k_{\text{нес. н}}$ и $k_{\text{мод. н}}$ со знаками минус в левую от $U_{\text{у}}$ часть формулы, со знаками плюс — в правую часть. После выбора значения уставки напряжения генератора $U_{\text{у}}$ расчетные длительные отклонения напряжения вверх $\Delta U_{\text{дл. расч. в}}$ и вниз $\Delta U_{\text{дл. расч. н}}$ на клеммах потребителей могут быть определены по формулам, полученным из выражения (2.5.44):

$$\Delta U_{\text{дл. расч. в}} = U_{\text{у}} - U_{\text{ном}} + \Delta U_{\text{т. в}} - \\ - \Delta U_{\text{с}} + k_{\text{нес. н}} + k_{\text{мод. н}}; \quad (2.10.16)$$

$$\Delta U_{\text{дл. расч. н}} = U_{\text{у}} - U_{\text{ном}} + \Delta U_{\text{т. н}} - \\ - \Delta U_{\text{с}} - k_{\text{нес. н}} - k_{\text{мод. н}}, \quad (2.10.17)$$

где $\Delta U_{\text{с}}$ — расчетная величина потери напряжения до потребителя, на клеммах которого определяется отклонение напряжения.

Если потребитель работает в нескольких режимах с различными значениями потребляемого тока и соответственно различными потерями напряжения до него, то при расчете верхнего предела отклонений напряжений по формуле (2.10.16) необходимо учитывать минимальные потери напряжения, а при расчете нижнего предела по формуле (2.10.17) — максимальные потери.

Для предварительного анализа СЭЭС с точки зрения длительных отклонений напряжения (без расчета уставки напряжения и отклонений напряжения на клеммах каждого потребителя) может быть использован график, представленный на рис. 2.10.1. По графику можно определить, при каких наибольших в данной СЭЭС длительных отклонениях напряжения на клеммах потребителей $\Delta U_{\text{дл. расч}}$ существует уставка напряжения генератора (при заданных значениях $\Delta U_{\text{с max}}$, $\Delta U_{\text{с min}}$, $\Delta U_{\text{т}}$, $k_{\text{нес. н}}$, $k_{\text{мод. н}}$).

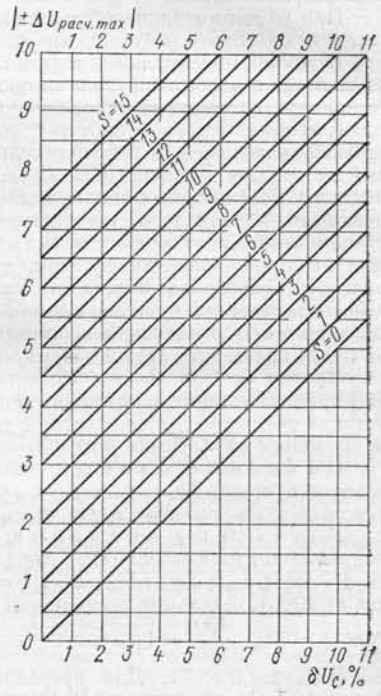



Рис. 2.10.1. Определение предельных значений длительных отклонений напряжения на клеммах потребителей электроэнергии СЭЭС.

На горизонтальной оси графика отложены значения разности между наибольшей и наименьшей в данной СЭЭС величинами потерь напряжения до клемм потребителей:

$$\delta U_{\text{с}} = \Delta U_{\text{с max}} - \Delta U_{\text{с min}}. \quad (2.10.18)$$

На вертикальной оси графика отложены значения расчетных длительных отклонений напряжения на клеммах потребителей (в предположении, что $|\Delta U_{\text{дл. доп. в}}| = |\Delta U_{\text{дл. доп. н}}| = |\Delta U_{\text{дл. доп}}|$). Значения $S$ у наклонных линий графика определяются по одной из нижеприведенных формул (в предположении, что $|\Delta U_{\text{т. в.}}| = |\Delta U_{\text{т. в}}| = |\Delta U_{\text{т}}|$) в зависимости от регламентируемой для потребителей взаимосвязи норм $\Delta U_{\text{дл. доп}}$, $k_{\text{нес. н}}$, $k_{\text{мод. н}}$:

$$S = 2(|\Delta U_{\text{т}}| + k_{\text{нес. н}} + k_{\text{мод. н}}); \quad (2.10.19)$$

$$S = 2(|\Delta U_{\text{т}}| + k_{\text{нес. н}}); \quad (2.10.20)$$

$$S = 2(|\Delta U_{\text{т}}| + k_{\text{мод. н}}); \quad (2.10.21)$$

$$S = 2|\Delta U_{\text{т}}|. \quad (2.10.22)$$

Значение $S$ рассчитывается по формуле (2.10.19), когда при наличии несимметрии и модуляции напряжения суммарное отклонение напряжения на клеммах потребителей в каждый момент времени не должно превышать нормы допустимого длительного отклонения $\Delta U_{\text{дл. доп}}$; по формуле (2.10.20), когда допустимо превышение $\Delta U_{\text{дл. доп}}$ за счет модуляции напряжения; по формуле (2.10.21), когда допустимо превышение $\Delta U_{\text{дл. доп}}$ за счет несимметрии напряжения; по формуле (2.10.22), когда допустимо превышение $\Delta U_{\text{дл. доп}}$ за счет несимметрии и модуляции напряжения.

При расчете отклонений напряжения на клеммах однофазных потребителей следует пользоваться формулами (2.10.19) или (2.10.20).

Величина максимальных в данной СЭЭС длительных отклонений напряжения на клеммах потребителей, при которой существует значение уставки напряжения генератора, отвечающее условию (2.5.44), определяется по шкале вертикальной оси графика $\Delta U_{\text{расч max}}$ против точки пересечения наклонной линии, соответствующей значению $S$, и перпендикуляра, восставленного из точки, соответствующей расчетному значению $\delta U_{\text{с}}$, на горизонтальной оси графика. Если максимальные расчетные отклонения напряжения окажутся больше допустимых, то уставка напряжения генератора, удовлетворяющая условию (2.5.44), не может быть выбрана и необходимо соответственно изменить значения потерь напряжения (уменьшив $\delta U_{\text{с}}$) или значения величин, входящих в $S$. График, представленный на рис. 2.10.1, позволяет определить необходимые пределы этих изменений, а также решить задачу: при каких значениях $S$ и входящих в нее величин при конкретных значениях $\delta U_{\text{с}}$ отклонения напряжения на клеммах потребителей данной СЭЭС не будут превышать заданных допустимых значений.

**Пример 1.** Определить, существует ли в данной СЭЭС переменного тока 50 Гц, 380 В уставка напряжения генератора, отвечающая условию (2.5.44). Если уставка существует, определить ее значение и значения длительных отклонений напряжения на клеммах потребителей № 1, 2, 3.

Исходные данные: задано $\Delta U_{\text{т}} = \pm 1\%$ (с учетом статизма характеристики генератора), т. е. $\Delta U_{\text{т. в}} = 1\%$, $\Delta U_{\text{т. н}} = -1\%$; $\Delta U_{\text{дл. доп}} = \pm 5\%$, т. е. $\Delta U_{\text{дл. доп. в}} = 5\%$, $\Delta U_{\text{дл. доп. н}} = -5\%$ (включая $k_{\text{нес. н}}$, $k_{\text{мод. н}}$).

Расчетные значения: потери напряжения от точки подключения корректора напряжения генератора до потребителей: № 1 — 1%, № 2 — 3%, № 3 — 5%; $k_{\text{нес. н}} = 1{,}5\%$, $k_{\text{мод. н}} = 0{,}3\%$; величина $\Delta U_{\text{т}}$ выражена в процентах от 400 В, остальные величины — в процентах от 380 В. В процентах от 380 В $|\Delta U_{\text{т}}| = 1\% \cdot \frac{400}{380} = 1{,}05\%$.

Решение: 1. Для предварительной оценки воспользуемся графиком рис. 2.10.1. По формуле (2.10.19) $S = 2\,(1{,}05 + 1{,}5 + 0{,}3) = 5{,}7$. По формуле (2.10.18) $\delta U_{\text{с}} = 5 - 1 = 4\%$. С помощью графика определяем $|\Delta U_{\text{расч max}}| = 4{,}85\%$, т. е. $\pm 4{,}85\%$, что не превышает норму $\pm 5\%$. Значит, уставка напряжения в данной системе, отвечающая условию (2.5.44), может быть выбрана.

2. По формуле (2.5.44) определяем зону значений уставки напряжения на ГРЩ (с учетом $k_{\text{нес. н}}$ и $k_{\text{мод. н}}$):

$$U_{\text{ном. п}} + \Delta U_{\text{дл. доп. в}} - \Delta U_{\text{т. в}} + \Delta U_{\text{с min}} - k_{\text{нес. н}} - k_{\text{мод. н}} \geqslant U_{\text{у}} \geqslant U_{\text{ном}} + \Delta U_{\text{дл. доп. н}} - \Delta U_{\text{т. н}} + \Delta U_{\text{с max}} + k_{\text{нес. н}} + k_{\text{мод. н}},$$

или

$$100 + (+5) - (+1{,}05) + 1 - 1{,}5 - 0{,}3 \geqslant U_{\text{у}} \geqslant 100 + (-5) - (-1{,}05) + 5 + 1{,}5 + 0{,}3.$$

Искомая зона: $103{,}15\% \geqslant U_{\text{у}} \geqslant 102{,}85\%$.

Принимаем значение $U_{\text{у}} = 103\%$ от 380 В, что составит $103\% \cdot \frac{380}{400} = 0{,}98\%$ от 400 В.



3. По формулам (2.10.16) и (2.10.17) определяем расчетные значения длительных отклонений напряжения на клеммах потребителей электроэнергии:

у потребителя № 1

$$\Delta U_{\text{дл. расч. в}} = 103 - 100 + (+1{,}05) - 1 + 1{,}5 + 0{,}3 = 4{,}85\%;$$

$$\Delta U_{\text{дл. расч. н}} = 103 - 100 + (-1{,}05) - 1 - 1{,}5 - 0{,}3 = -0{,}85\%;$$

у потребителя № 2

$$\Delta U_{\text{дл. расч. в}} = 103 - 100 + (+1{,}05) - 3 + 1{,}5 + 0{,}3 = 2{,}85\%,$$

$$\Delta U_{\text{дл. расч. н}} = 103 - 100 + (-1{,}05) - 3 - 1{,}5 - 0{,}3 = -2{,}85\%;$$

у потребителя № 3

$$\Delta U_{\text{дл. расч. в}} = 103 - 100 + (+1{,}05) - 5 + 1{,}5 + 0{,}3 = 0{,}85\%,$$

$$\Delta U_{\text{дл. расч. н}} = 103 - 100 + (-1{,}05) - 5 - 1{,}5 - 0{,}3 = -4{,}85\%.$$

*Кратковременные отклонения* напряжения на клеммах генератора и подключаемого потребителя, создающего резкое изменение нагрузки, могут быть определены методами, изложенными в гл. 2.9.

Расчет кратковременных отклонений напряжения на клеммах других работающих в данной системе потребителей с учетом выбранного значения уставки напряжения генератора и потерь напряжения до этих потребителей может быть выполнен по формулам:

$$\Delta U_{\text{кр. расч. в}} = U_{\text{у}} - U_{\text{ном}} + \Delta U_{\text{т. в}} - \Delta U_{\text{с}} + k_{\text{нес. н}} + k_{\text{мод. н}} + \Delta U_{\text{кр. г. в}}; \quad (2.10.23)$$

$$\Delta U_{\text{кр. расч. н}} = U_{\text{у}} - U_{\text{ном}} + \Delta U_{\text{т. н}} - \Delta U_{\text{с}} - k_{\text{нес. н}} - k_{\text{мод. н}} + \Delta U_{\text{кр. г. н}}, \quad (2.10.24)$$

где $\Delta U_{\text{кр. расч. в}}$, $\Delta U_{\text{кр. расч. н}}$ — соответственно верхний и нижний пределы расчетных значений кратковременных отклонений напряжения на клеммах потребителя; $\Delta U_{\text{кр. г. в}}$, $\Delta U_{\text{кр. г. н}}$ — соответственно верхнее (при сбросе нагрузки) и нижнее (при набросе нагрузки) отклонения напряжения генератора в переходном режиме СЭЭС в точке подключения корректора напряжения системы АРН.

**Пример 2.** Для системы с исходными данными, приведенными в предыдущем примере, рассчитать кратковременные отклонения напряжения на клеммах потребителей № 1, 2, 3 при кратковременных отклонениях напряжения генератора $\Delta U_{\text{кр. г. в}} = 9\%$. $\Delta U_{\text{кр. г. н}} = -20\%$ (в процентах от 400 В). В процентах от 380 В: $\Delta U_{\text{кр. г. в}} = 9 \cdot \frac{400}{380} = 9{,}45\%$; $\Delta U_{\text{кр. г. н}} = -20 \cdot \frac{400}{380} = -21\%$.

Решение. По формулам (2.10.23) и (2.10.24) определяем кратковременные отклонения напряжения на клеммах потребителей электроэнергии при уставке напряжения генератора $U_{\text{у}} = 103\%$ (выбранной в предыдущем примере):

у потребителя № 1

$$\Delta U_{\text{кр. расч. в}} = 103 - 100 + (+1{,}05) - 1 + 1{,}5 + 0{,}3 + (+9{,}45) = 14{,}3\%,$$

$$\Delta U_{\text{кр. расч. н}} = 103 - 100 + (-1{,}05) - 1 - 1{,}5 - 0{,}3 + (-21) = -21{,}85\%;$$

у потребителя № 2

$$\Delta U_{\text{кр. расч. в}} = 103 - 100 + (+1{,}05) - 3 + 1{,}5 + 0{,}3 + (+9{,}45) = 12{,}3\%,$$

$$\Delta U_{\text{кр. расч. н}} = 103 - 100 + (-1{,}05) - 3 - 1{,}5 - 0{,}3 + (-21) = -23{,}85\%;$$

у потребителя № 3

$$\Delta U_{\text{кр. расч. в}} = 103 - 100 + (+1{,}05) - 5 + 1{,}5 + 0{,}3 + (+9{,}45) = 10{,}3\%,$$

$$\Delta U_{\text{кр. расч. н}} = 103 - 100 + (-1{,}05) - 5 - 1{,}5 - 0{,}3 + (-21) = -25{,}85\%.$$

**Оценка отклонений частоты.** Отклонения частоты могут быть определены по данным технических условий на генераторный агрегат или его первичный

двигатель и на преобразователь электроэнергии как точность поддержания частоты в установившихся и переходных режимах.

Если потребители получают питание через электромашинные преобразователи частоты, то при определении отклонений частоты на клеммах потребителей следует учитывать ее уменьшение на величину скольжения приводного асинхронного двигателя преобразователя. При определении кратковременных отклонений частоты на клеммах потребителей в этом случае необходимо учитывать, что электромашинные преобразователи с приводными короткозамкнутыми асинхронными двигателями передают отклонения частоты тока сети питания с входа на выход преобразователя без изменения их по величине (что указывается в технических условиях на их поставку).

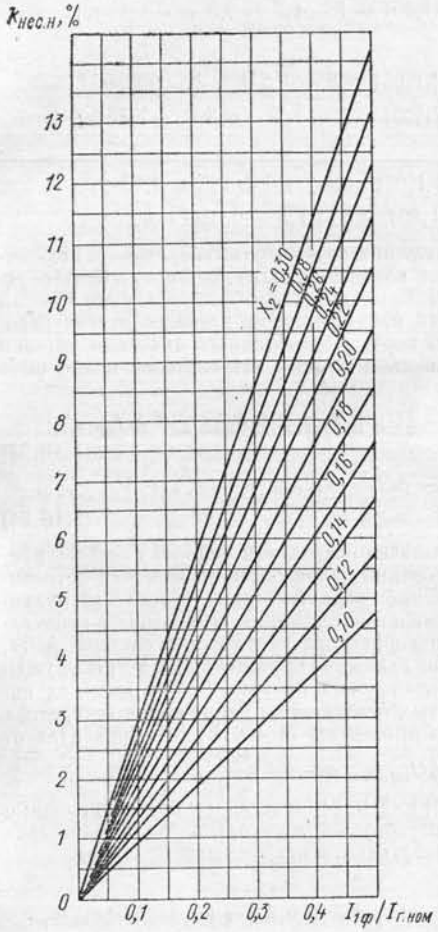



Рис. 2.10.2. Определение несимметрии напряжения СЭЭС.

**Оценка несимметрии напряжения.** Коэффициент несимметрии напряжения в системе с трехфазными синхронными генераторами при однофазной нагрузке может быть определен по формуле

$$k_{\text{нес. н}} = \frac{X_2 I_{1\text{ф}} \sqrt{3}}{U_{\text{г. ном}}} \cdot 100\%. \qquad (2.10.25)$$

где $X_2$ — индуктивное сопротивление обратной последовательности (генератора), Ом (указывается в технической документации на генератор); $I_{1\text{ф}}$ — ток однофазной нагрузки, А; $U_{\text{г. ном}}$ — номинальное линейное напряжение генератора, В.

По этой формуле рассчитывается наибольшая возможная в СЭЭС несимметрия напряжения, которая возникает при включении однофазной нагрузки на генератор, работающий в режиме холостого хода. При этом не учитывается влияние симметричной трехфазной нагрузки, которая несколько уменьшает несимметрию напряжения, вызванную однофазной нагрузкой. Достаточно точные расчеты несимметрии напряжения в СЭЭС могут быть выполнены методом, изложенным в [56], однако это требует большого объема вычислений.

На основе [56] рассчитан и построен график рис. 2.10.2, позволяющий определить несимметрию напряжения генераторов с разными значениями $X_2$ в относительных единицах при однофазной нагрузке от 0 до 0,4 номинального тока генератора с коэффициентом мощности 0,7—1 (он мало влияет на результаты расчета)*. Симметричная трехфазная нагрузка генератора принята постоянной и равной

* Расчеты выполнены Г. Б. Либерман.



0,25 номинального тока генератора. Коэффициент мощности трехфазной нагрузки принят равным 0,3. Для режимов с большей величиной трехфазной нагрузки генератора график дает завышенные значения коэффициента несимметрии напряжения, но не более чем на 20% его расчетной величины.

Коэффициент несимметрии напряжения генератора определяется по графику на вертикальной оси против точки пересечения соответствующих наклонной и вертикальной линий.

При определении несимметрии напряжения генераторов мощностью менее 100—200 кВт или электромашинных преобразователей с трехфазными генераторами переменного тока необходимо учитывать собственную несимметрию напряжения генератора, которая может увеличить расчетную несимметрию напряжения в зависимости от распределения однофазных нагрузок по фазам системы.

Собственная несимметрия генератора в режиме холостого хода и при работе на симметричную трехфазную нагрузку приводится в технических условиях на поставку машин.

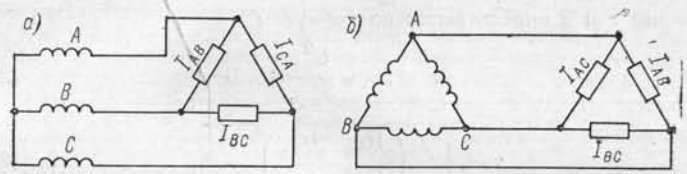



Рис. 2.10.3. Расчетные схемы включения вторичной обмотки трансформатора и нагрузки: *а* — при соединении обмотки звездой; *б* — при соединении обмотки треугольником.

При наличии в СЭЭС трансформаторов напряжения, работающих на трехфазно-однофазную нагрузку, может возникнуть необходимость расчета несимметрии напряжения вторичных обмоток трансформатора. Расчет изменения вторичных напряжений трехфазных двухобмоточных трансформаторов без нулевого провода при несимметричной нагрузке выполняется по приведенным ниже формулам *. При этом должны быть известны значения токов и коэффициентов мощности отдельных плеч нагрузки (рис. 2.10.3).

Формулы имеют следующий вид:

$$\Delta U_{AB} = \frac{1}{2}(k_1 r + k_2 x); \qquad (2.10.26)$$

$$\Delta U_{BC} = \frac{1}{2}(k_3 r + k_4 x); \qquad (2.10.27)$$

$$\Delta U_{CA} = \frac{1}{2}(k_5 r + k_6 x), \qquad (2.10.28)$$

где $\Delta U_{AB}$, $\Delta U_{BC}$, $\Delta U_{CA}$ — изменение соответствующих вторичных линейных напряжений, В; $r$, $x$ — соответственно полное активное и полное индуктивное сопротивления фазы трансформатора, приведенные к его вторичной обмотке, Ом; $k_1$ — $k_6$ — коэффициенты, значения которых находятся по следующим выражениям:

$$k_1 = 4I_{AB}\cos\varphi_{AB} + I_{BC}\cos\varphi_{BC} + I_{CA}\cos\varphi_{CA} + \sqrt{3}\,(I_{BC}\sin\varphi_{BC} - I_{CA}\sin\varphi_{CA}); \qquad (2.10.29)$$

$$k_2 = 4I_{AB}\sin\varphi_{AB} + I_{BC}\sin\varphi_{BC} + I_{CA}\sin\varphi_{CA} - \sqrt{3}\,(I_{BC}\cos\varphi_{BC} - I_{CA}\cos\varphi_{CA}); \qquad (2.10.30)$$

* Формулы предложены М. Я. Файнштейном.

$$k_3 = 4I_{BC}\cos\varphi_{BC} + I_{CA}\cos\varphi_{CA} +$$

$$+ I_{AB}\cos\varphi_{AB} + \sqrt{3}\,(I_{CA}\sin\varphi_{CA} - I_{AB}\sin\varphi_{AB}); \quad (2.10.31)$$

$$k_4 = 4I_{BC}\sin\varphi_{BC} + I_{CA}\sin\varphi_{CA} +$$

$$+ I_{AB}\sin\varphi_{AB} - \sqrt{3}\,(I_{CA}\cos\varphi_{CA} - I_{AB}\cos\varphi_{AB}); \quad (2.10.32)$$

$$k_5 = 4I_{CA}\cos\varphi_{CA} + I_{AB}\sin\varphi_{AB} +$$

$$+ I_{BC}\cos\varphi_{BC} + \sqrt{3}\,(I_{AB}\cos\varphi_{AB} - I_{BC}\sin\varphi_{BC}); \quad (2.10.33)$$

$$k_6 = 4I_{CA}\sin\varphi_{CA} + I_{AB}\cos\varphi_{AB} +$$

$$+ I_{BC}\sin\varphi_{BC} - \sqrt{3}\,(I_{AB}\sin\varphi_{AB} - I_{BC}\cos\varphi_{BC}), \quad (2.10.34)$$

где $I_{AB}$, $I_{BC}$, $I_{CA}$ — токи соответствующих плеч треугольника нагрузки, А; $\cos\varphi_{AB}$, $\cos\varphi_{BC}$, $\cos\varphi_{CA}$ — коэффициенты мощности соответствующих плеч треугольника нагрузки, о. е.

Величины $r$ и $x$ определяются по формулам

$$r = P_{к.\,з}\frac{U_{2л}^2}{S_{ном}^2}; \quad (2.10.35)$$

$$x = \sqrt{\left(\frac{10e_{к.\,з}U_{2л}^2}{S_{ном}}\right)^2 - r^2}, \quad (2.10.36)$$

где $P_{к.\,з}$ — полные потери мощности при опыте короткого замыкания, Вт; $U_{2л}$ — номинальное вторичное линейное напряжение, кВ; $S_{ном}$ — полная номинальная мощность трансформатора, кВ·А; $e_{к.\,з}$ — напряжение короткого замыкания, %.

Номинальные значения $S_{ном}$ и $U_{2л}$ всегда известны, а значения $P_{к.\,з}$ и $e_{к.\,з}$, измеряемые при опыте короткого замыкания, являются данными завода-изготовителя и приводятся в технических условиях на изготовление и поставку трансформаторов.

После расчета значений $\Delta U_{AB}$, $\Delta U_{BC}$, $\Delta U_{CA}$ суммированием их с величинами линейных напряжений, имевших место до подключения однофазной нагрузки, определяются линейные вторичные напряжения трансформатора в расчетном режиме и по формуле (2.10.3) определяется значение коэффициента несимметрии напряжения вторичных обмоток трансформатора.

**Оценка низкочастотной модуляции напряжения.** Коэффициент амплитудной низкочастотной модуляции напряжения переменного тока слагается из двух составляющих: коэффициента модуляции напряжения, свойственного источнику электроэнергии, значение которого указывается в технических условиях на поставку источников и преобразователей электроэнергии, и коэффициента амплитудной модуляции напряжения, обусловленного работой импульсно-циклических потребителей электроэнергии, который может быть определен расчетным путем.

Так как в последнем случае генератор работает в режиме наброса-сброса импульсов нагрузки, эту составляющую коэффициента амплитудной модуляции напряжения можно определить на основе методов, изложенных в главе 2.9.

**Оценка искажений формы кривой напряжения.** Коэффициент искажения синусоидальности формы кривой напряжения в СЭЭС со статическими преобразователями может быть определен аналитическим методом по расчетным выражениям, разработанным на основе теории планирования эксперимента. Реализация плана экспериментов осуществлялась расчетом искажений на ЭЦВМ по программе, разработанной на основе описаний электромагнитных процессов в системе со статическими преобразователями полными дифференциальными уравнениями *.

Достоинства метода — возможность получения исходных данных из технических условий на поставку генераторов (преобразователей) и выполнение расчетов на любом калькуляторе.

---

* Метод разработан Ю. И. Пайкиным, Ю. Я. Зубаревым, В. А. Зуевым и В. В. Шейниховичем.



Ниже приведены исходные данные и выражения для расчета искажений напряжения в системе с одним или несколькими синхронными генераторами, асинхронными двигателями и одним или несколькими однотипными судовыми трехфазными статическими выпрямителями:

а) исходные данные генераторов СЭЭС:

тип генератора

$N_г$ — количество параллельно работающих генераторов;

$S_{г.\,ном}$ — номинальная полная мощность, кВ·А;

$U_{г.\,ном}$ — номинальное линейное напряжение, В;

$I_{г.\,ном}$ — номинальный ток, А;

$x''_d$ — сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси, о. е.

$x''_q$ — сверхпереходное индуктивное сопротивление по поперечной оси, о. е.;

б) исходные данные статических выпрямителей:

тип статического выпрямителя

$N_{пр}$ — количество однотипных выпрямителей;

$U_{вх.\,пр.\,ном}$ — номинальное линейное входное напряжение, В;

$U_{вх.\,пр}$ — фактическое входное напряжение в расчетном режиме, В;

$S_{тр.\,ном}$ — номинальная полная мощность входного трансформатора, кВ·А (при отсутствии данных можно принять $S_{тр.\,ном} = 1{,}1S_{пр.\,ном}$);

$U_{тр.\,к.\,з}$ — напряжение короткого замыкания входного трансформатора, % (при отсутствии данных можно принять $U_{тр.\,к.\,з} = 5\%$);

$x_{тр.\,к.\,з}$ — индуктивное сопротивление короткого замыкания входного трансформатора (реактора), Ом:

$$x_{тр.\,к.\,з} = \frac{U_{вх.\,пр.\,ном}^2 U_{тр.\,к.\,з}}{S_{тр.\,ном}\cdot 10^5}; \quad (2.10.37)$$

$U_{вых.\,пр.\,х.\,х}$ — выходное напряжение выпрямителя в режиме холостого хода, В;

$U_{вых.\,пр}$ — выходное напряжение выпрямителя в расчетном режиме, В;

$\lambda_{ном}$ — глубина регулирования выходного напряжения в расчетном режиме при номинальном напряжении на входе;

$$\lambda_{ном} = \frac{U_{вых.\,пр}}{U_{вых.\,пр.\,х.\,х}}; \quad (2.10.38)$$

$P_{пр}$ — мощность нагрузки выпрямителя в расчетном режиме, кВт;

$L_н$ — индуктивность нагрузки выпрямителя в расчетном режиме, Гн;

$R_н$ — активное сопротивление нагрузки выпрямителя в расчетном режиме, Ом;

$\tau$ — постоянная времени нагрузки выпрямителя, с:

$$\tau = \frac{L_н}{R_н}; \quad (2.10.39)$$

$x_л$ — индуктивное сопротивление линии питания от ГРЩ до входных клемм трансформатора выпрямителя, Ом;

в) исходные данные двигателей нагрузки:

$S_{а.\,д}$ — полная мощность асинхронных двигателей в расчетном режиме, кВ·А;

$k_п$ — кратность пускового тока (если данных нет, можно принять $k_п = 5$).

Значения перечисленных исходных данных определяются по схеме СЭЭС, таблице нагрузок генераторов, техническим условиям на поставку генераторов, преобразователей и асинхронных двигателей и по данным настоящего справочника (см. Т. 2).

Расчетная схема изображена на рис. 2.10.4.

Базисные величины системы в соответствующих единицах определяются по формулам:

$$U_б = \frac{\sqrt{2}\,U_{г.\,ном}}{\sqrt{3}}; \tag{2.10.40}$$

$$I_б = \sqrt{2}\sum_{n=1}^{n=N_г} I_{п\,г.\,ном}; \tag{2.10.41}$$

$$S_б = \sum_{n=1}^{n=N_г} S_{п\,г.\,ном}; \tag{2.10.42}$$

$$Z_б = \frac{U_б}{I_б}; \tag{2.10 43}$$

$$t_б = \frac{1}{2\pi f}. \tag{2.10.44}$$

Выражение исходных данных в относительных единицах системы (что отмечается звездочкой в индексе) производится по формулам:

$$P^*_{пр} = \frac{\sum_{n=1}^{n=N_{пр}} P_{п\,пр}}{S_б}; \tag{2.10.45}$$

$$x^{*''}_d = \frac{1}{\sum_{n=1}^{n=N_г}\left(\frac{1}{x''_d}\,\frac{\sqrt{2}\,I_{п\,г.\,ном}}{I_б}\right)}; \tag{2.10.46}$$

$$x^{*''}_q = \frac{1}{\sum_{n=1}^{n=N_г}\left(\frac{1}{x''_q}\,\frac{\sqrt{2}\,I_{п\,г.\,ном}}{I_б}\right)}; \tag{2.10.47}$$

$$x^*_{а.\,д} = \frac{S_б}{S_{а.\,д}k_п}; \tag{2.10.48}$$

$$x^*_{тр.\,к.\,з} = \frac{x_{тр.\,к.\,з}}{Z_б N_{пр}}; \tag{2.10.49}$$

$$x^*_л = \frac{x_л}{Z_б}. \tag{2.10.50}$$

Расчетные параметры в относительных единицах системы определяются по следующим формулам:

индуктивное сопротивление генератора без учета асинхронной нагрузки:

$$x^*_г = \frac{x^{*''}_d + x^{*''}_q}{2}; \tag{2.10.51}$$



индуктивное сопротивление эквивалентного генератора с учетом асинхронной нагрузки:

$$x^*_г = \frac{x^{*''}_d x^*_{а.\,д}}{2\left(x^{*''}_d + x^*_{а.\,д}\right)} + \frac{x^{*''}_q x^*_{а.\,д}}{2\left(x^{*''}_q x^*_{а.\,д}\right)}; \tag{2.10.52}$$

напряжение короткого замыкания входного трансформатора (реактора) статического преобразователя:

$$U^*_{тр.\,к.\,з} = \left(x^*_л + x^*_{тр.\,к.\,з}\right) S^*_{пр}. \tag{2.10.53}$$

глубина регулирования выходного напряжения статического преобразователя:

$$\lambda_р = \frac{\lambda_{ном} U_{вх.\,пр.\,ном}}{U_{вх.\,пр}}; \tag{2.10.54}$$

полная мощность статического преобразователя:

$$S^*_{пр} = \frac{P^*_{пр}}{\lambda_р}; \tag{2.10.55}$$

постоянная времени нагрузки преобразователя:

$$\tau^* = \frac{\tau}{t_б}. \tag{2.10.56}$$

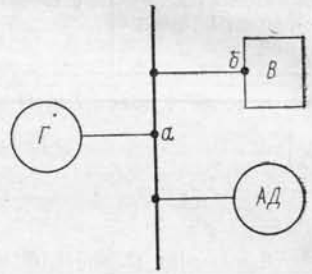



Рис. 2.10.4. Схема для расчета коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения.

*Г* — генератор переменного тока; *В* — статический полупроводниковый выпрямитель; *АД* — асинхронный электродвигатель.

Расчет коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения (в процентах) ведется по следующим выражениям:

в точке *а* (рис. 2.10.4)

$$k_{иск.\,син\,ГРЩ} = -3{,}895 + 76{,}352x^*_г - 77{,}208U^*_{тр.\,к.\,з} + 6{,}846\lambda_р + 31{,}589S^*_{пр} - 0{,}719\tau^* - 151{,}98\,(x^*_г)^2 - 68{,}058x^*_г U^*_{тр.\,к.\,з} - 2{,}837x^*_г\lambda_р + 127{,}33x^*_г S^*_{пр} - 0{,}164x^*_г\tau^* - 70{,}91x^*_г\lambda_р S^*_{пр} + 42{,}416\,(U^*_{тр.\,к.\,з})^2 + 1{,}815U^*_{тр.\,к.\,з}\lambda_р - 56{,}628U^*_{тр.\,к.\,з}S^*_{пр} + 0{,}974U^*_{тр.\,к.\,з}\tau^* - 7{,}428\lambda^2_р - 3{,}525\lambda_р S^*_{пр} + 0{,}181\lambda_р\tau^* - 15{,}724\,(S^*_{пр})^2 - 0{,}063S^*_{пр}\tau^* - 0{,}054\,(\tau^*)^2. \tag{2.10.57}$$

Если окажется, что $k_{иск.\,син\,ГРЩ} > 12\%$, следует выполнить уточняющий расчет по выражению

$$k_{иск.\,син\,ГРЩ} = -4{,}571 + 53{,}089x^*_г - 38{,}87U^*_{тр.\,к.\,з} + 14{,}134\lambda_р + 30{,}187S^*_{пр} - 0{,}256\tau^* - 82{,}81\,(x^*_г)^2 - 102{,}5x^*_г U^*_{тр.\,к.\,з} - 2{,}692x^*_г\lambda_р + 120{,}2x^*_г S^*_{пр} - 0{,}225x^*_г\tau^* - 62{,}8x^*_г\lambda_р S^*_{пр} + 248{,}75\,(U^*_{тр.\,к.\,з})^2 + 5{,}33U^*_{тр.\,к.\,з}\lambda_р - 63{,}94U^*_{тр.\,к.\,з}S^*_{пр} + 0{,}45U^*_{тр.\,к.\,з}\tau^* - 14{,}78\,(\lambda_р)^2 - 4{,}596\lambda_р S^*_{пр} + 0{,}193\lambda_р\tau^* - 12{,}978\,(S^*_{пр})^2 - 0{,}023\,6S^*_{пр}\tau^* + 0{,}012\,9\,(\tau^*)^2, \tag{2.10.58}$$

*Таблица 2.10.1*

**Допустимые пределы значений расчетных параметров**

| Расчетные параметры | $x_г^*$ | $U_{тр.\ к}^*$ | $\lambda_р$ | $S_{пр}^*$ | $\tau^*$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Допустимые пределы значений | 0,1—0,3 | 0,035—0,14 | 0,05—0,9 | 0,05—1 | 0—10 |

В точке *б* (рис. 2.10.4)

$$k_{иск.\ син.\ пр} = Ak_{иск.\ син\ ГРЩ}, \qquad (2.10.59)$$

где

$$A = \frac{x_г^* + x_л^*}{x_г^*}. \qquad (2.10.60)$$

Выражения (2.10.57), (2.10.58) справедливы при значениях расчетных параметров, находящихся в пределах, указанных в табл. 2.10.1. При заданных значениях исходных параметров погрешность расчетов составляет 15—20%.

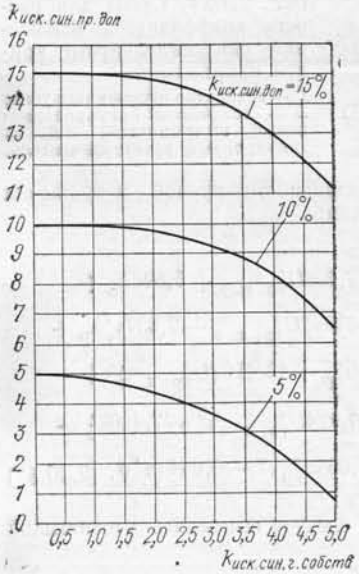



Рис. 2.10.5. Определение допустимого для СЭЭС коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, вносимого работающими статическими преобразователями.

Искажения напряжения сети складываются из собственных искажений напряжения генератора, имеющих место в режиме холостого хода и при работе на линейную симметричную нагрузку, а также искажений, вносимых работающими статическими преобразователями.

Допустимые для данной ЭЭС искажения напряжения, которые могут быть внесены работающими статическими преобразователями, $k_{иск.\ син.\ пр.\ доп}$ определяются в зависимости от нормы $k_{иск.\ син.\ доп}$ и собственных искажений напряжения генератора $k_{иск.\ син.\ г.\ собств}$. Ориентировочно такой расчет может быть произведен с помощью графиков, приведенных на рис. 2.10.5, которые построены для трех значений нормы коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения: $k_{иск.\ син.\ доп} = 5$, 10 и 15%.

Полученное значение $k_{иск.\ син.\ пр.\ доп}$ сопоставляется с расчетным значением $k_{иск.\ син}$ в точке *б* на рис. 2.10.4 с целью оценки его допустимости на клеммах статического выпрямителя и в точке *а* (рис. 2.10.4) — с целью оценки его допустимости для других потребителей электроэнергии данной системы, являющихся линейной нагрузкой для генератора.

**Пример 3.** Рассчитать коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в системе с двумя параллельно работающими синхронными генераторами типа МСС102-4 напряжением 400 В, двумя выпрямительными агрегатами типа ВАКС-17,5-115, работающими при напряжении сети 390 В на номинальную нагрузку с постоянной времени $\tau = 0{,}0038$ с и асинхронными двигателями суммарной мощностью 160 кВ·А, $k_п = 5$. Усредненное значение сопротивления линии $x_л = 0{,}035$ Ом.



Определить допустимость полученного значения $k_{иск.\ син}$ для данной системы, если собственный коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения генератора равен 3,5%, а норма в системе равна 5%.

Исходные данные берутся из технических условий на поставку генераторов и преобразователей: $N_г = 2$; $S_г = 200$ кВ·А; $U_{г.\ ном} = 400$ В; $I_{г.\ ном} = 289$ А; $x_d'' = 0{,}172$ о. е.; $x_q'' = 0{,}190$ о. е.; $U_{вх.\ пр.\ ном} = 380$ В; $U_{вх.\ пр} = 390$ В; $S_{тр.\ ном} = 18{,}7$ кВ·А; $U_{тр.\ к.\ з} = 4{,}9\%$; $U_{вых.\ пр.\ х.\ х} = 132$ В; $U_{вых.\ пр} = 114$ В (определено по внешней характеристике агрегата типа ВАКС-17,5-230); $P_{пр} = 17{,}5$ кВт; $x_л = 0{,}035$ Ом; $S_{а.\ д} = 160$ кВ·А; $k_п = 5$.

Решение. 1. По формулам (2.10.37), (2.10.38) определим

$$x_{тр.\ к.\ з} = \frac{U_{вх.\ пр.\ ном}^2 U_{тр.\ к.\ з}}{S_{тр.\ ном} \cdot 10^5} = \frac{380^2 \cdot 4{,}9}{18{,}7 \cdot 10^5} = 0{,}38 \text{ Ом};$$

$$\lambda_{ном} = \frac{U_{вых.\ пр}}{U_{вых.\ пр.\ х.\ х}} = \frac{144}{132} = 0{,}8636.$$

2. По формулам (2.10.40)—(2.10.44) найдем базисные величины:

$$U_б = \frac{\sqrt{2}\, U_{г.\ ном}}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 400}{\sqrt{3}} = 326 \text{ В};$$

$$I_б = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{n=N_г} I_{п\,г.\ ном} = \sqrt{2}\,(289 + 289) = 815 \text{ А};$$

$$S_б = \sum_{n=1}^{n=N_г} S_{п\,г.\ ном} = 200 + 200 = 4000 \text{ кВ·А};$$

$$Z_б = \frac{U_б}{I_б} = \frac{326}{815} = 0{,}4 \text{ Ом};$$

$$t_б = \frac{1}{2\pi f} = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50} = 0{,}003185 \text{ с}.$$

3. С помощью выражений (2.10.45)—(2.10.50) исходные данные выразим в относительных единицах системы:

$$P_{пр}^* = \frac{\sum_{n=1}^{n=N_{пр}} P_{п пр}}{S_б} = \frac{17{,}5 + 17{,}5}{400} = 0{,}0875;$$

$$x_d^{*''} = \frac{1}{\sum_{n=1}^{n=N_г} \left( \frac{1}{x_d''} \frac{\sqrt{2}\, I_{п\,г.\ ном}}{I_б} \right)} = \frac{1}{2\left( \frac{1}{0{,}172} \frac{\sqrt{2} \cdot 289}{815} \right)} = 0{,}172;$$

$$x_q^{*''} = \frac{1}{\sum_{n=1}^{n=N_г} \left( \frac{1}{x_q''} \frac{\sqrt{2}\, I_{п\,г.\ ном}}{I_б} \right)} = \frac{1}{2\left( \frac{1}{0{,}19} \frac{\sqrt{2} \cdot 289}{815} \right)} = 0{,}19;$$

$$x_{а.\ д}^* = \frac{S_б}{S_{а.\ д} k_п} = \frac{400}{160 \cdot 5} = 0{,}5;$$

$$x_{тр.\ к.\ з}^* = \frac{x_{тр.\ к.\ з}}{Z_б N_{пр}} = \frac{0{,}38}{0{,}4 \cdot 2} = 0{,}475;$$

$$x_л^* = \frac{x_л}{Z_б} = \frac{0{,}035}{0{,}4} = 0{,}0875.$$

4. По формулам (2.10.51), (2.10.56), (2.10.60) вычислим значения расчетных параметров в относительных единицах:

$$x^*_г = \frac{x^{*\prime\prime}_d x^*_{а.д}}{2(x^{*\prime\prime}_d + x^*_{а.д})} + \frac{x^{*\prime\prime}_q x^*_{а.д}}{2(x^{*\prime\prime}_q + x^*_{а.д})} =$$

$$= \frac{0{,}172 \cdot 0{,}5}{2(0{,}172 + 0{,}5)} + \frac{0{,}189 \cdot 0{,}5}{2(0{,}189 + 0{,}5)} = 0{,}133;$$

$$\lambda_р = \frac{\lambda_{ном} U_{вх.пр.ном}}{U_{вх.пр}} = \frac{0{,}865 \cdot 380}{390} = 0{,}842;$$

$$S^*_{пр} = \frac{P^*_{пр}}{\lambda_р} = \frac{0{,}0875}{0{,}842} = 0{,}104;$$

$$U^*_{тр.к.з} = (x^*_л + x^*_{тр.к.з}) S^*_{пр} = (0{,}0874 + 0{,}475) \cdot 0{,}104 = 0{,}0584;$$

$$\tau^* = \frac{\tau}{t_б} = \frac{0{,}0038}{0{,}003185} = 1{,}183;$$

$$A = \frac{x^*_г + x^*_л}{x^*_г} = \frac{0{,}133 + 0{,}0874}{0{,}133} = 1{,}655.$$

5. Подставив в выражение (2.10.57) значения расчетных параметров: $x^*_г = 0{,}133$; $U^*_{тр.к.з} = 0{,}058$; $\lambda_р = 0{,}842$; $S^*_{пр} = 0{,}104$; $\tau^* = 1{,}183$, определим значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения на шинах ГРЩ:

$$k_{иск.син.ГРЩ} = -3{,}895 + 76{,}352 \cdot 0{,}133 - 77{,}208 \cdot 0{,}058 + 6{,}846 \cdot 0{,}842 + 31{,}589 \cdot 0{,}104 - 0{,}719 \cdot 1{,}183 - 151{,}98 \cdot 0{,}133^2 - 68{,}058 \cdot 0{,}133 \cdot 0{,}058 - 2{,}837 \times 0{,}133 \cdot 0{,}842 + 127{,}33 \cdot 0{,}133 \cdot 0{,}104 - 0{,}164 \cdot 0{,}133 \cdot 1{,}183 - 70{,}91 \cdot 0{,}133 \cdot 0{,}842 \times 0{,}104 + 42{,}416 \cdot 0{,}058^2 + 1{,}815 \cdot 0{,}058 \cdot 0{,}842 - 56{,}628 \cdot 0{,}058 \cdot 0{,}104 + 0{,}974 \times 0{,}058 \cdot 1{,}183 - 7{,}428 \cdot 0{,}842^2 - 3{,}525 \cdot 0{,}842 \cdot 0{,}104 + 0{,}181 \cdot 0{,}842 \cdot 1{,}183 - 15{,}724 \times 0{,}104^2 - 0{,}063 \cdot 0{,}104 \cdot 1{,}183 + 0{,}054 \cdot 1{,}183^2 = 1{,}819\%.$$

6. По выражению (2.10.59) найдем коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения на клеммах выпрямителя (точка *б* на рис. 2.10.4):

$$k_{иск.син.пр} = A k_{иск.син.ГРЩ} = 1{,}655 \cdot 1{,}819 = 3{,}01\%.$$

7. С помощью графика рис. 2.10.5 определим допустимость для данной системы полученного значения $k_{иск.син}$. На горизонтальной оси графика найдем точку, соответствующую величине собственных искажений напряжения генератора 3,5%. По расчетной кривой, соответствующей норме $k_{иск.син.доп} = 5\%$, определим максимальное для данной системы расчетное значение $k_{иск.син.пр} = 3{,}1\%$, которое может быть внесено выпрямителями. Оно больше полученных расчетных значений 1,819 и 3,01%, которые и являются допустимыми для рассматриваемой системы.

**Особенности измерения показателей качества электрической энергии.** Промышленностью разработан модулометр типа МНО-2, предназначенный для визуального измерения малых коэффициентов модуляции напряжения переменного тока. Недостатками прибора являются невозможность зафиксировать результат измерения и невозможность определить частоты огибающих модулированного напряжения, если частотных составляющих несколько.

Из применяемых для измерения коэффициента амплитудной модуляции напряжения схем наиболее рациональной является схема, приведенная на рис. 2.10.6. Она дает возможность фиксировать процесс изменения напряжения с помощью



светолучевого осциллографа типа Н-700 или ему подобного. Это способствует получению объективной оценки характера модуляции напряжения при малых ее значениях и позволяет определить частотный состав огибающей модулированного напряжения.

Коэффициент низкочастотной модуляции напряжения в процентах от номинального напряжения определяется по формуле

$$k_{мод} = \frac{a q k_{тр}}{2\sqrt{2}\, U_{ном}} \cdot 100\%, \quad (2.10.61)$$

где $a$ — разность между максимальным и минимальным значениями модулированного напряжения, найденная по осциллограмме, мм; $q$ — чувствительность схемы, определяемая по градуировочным кривым, В/мм; $k_{тр}$ — коэффициент трансформации автотрансформатора; $U_{ном}$ — номинальное напряжение (действующее значение). Частота модуляции в герцах определяется по осциллограмме с помощью формулы (2.10.6).

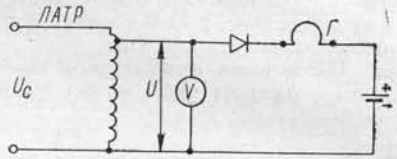



Рис. 2.10.6. Схема записи низкочастотной модуляции напряжения светолучевым осциллографом.

*Г* — гальванометр — вставка светолучевого осциллографа; *ЛАТР* — лабораторный автотрансформатор.

Замена любого из элементов схемы, представленной на рис. 2.10.6, или значительное снижение напряжения гальванической батареи требуют новой градуировки схемы и построения новой градуировочной кривой $q = f(b)$ по формуле

$$q = \frac{\Delta U}{\Delta b}, \quad (2.10.62)$$

где $q$ — чувствительность схемы, В/мм; $\Delta U$ — приращение напряжения, В; $\Delta b$ — приращение размаха луча на ленте осциллографа, мм. Нелинейность $q$ определяется нелинейностью применяемого в схеме диода. Погрешность описанного способа измерения НЧМ напряжения составляет примерно 20% измеряемой величины.

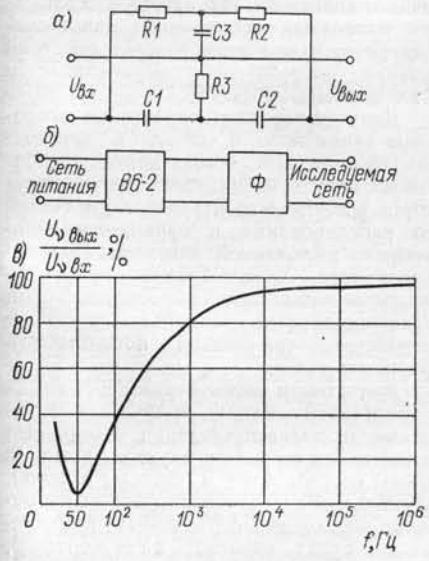



Рис. 2.10.7. Фильтр-пробка: *а* — принципиальная схема; *б* — схема включения; *в* — характеристика, где $U_\nu$ — напряжение ν-й гармоники.

Одним из методов оценки искажений формы кривой напряжения является измерение его измерителями нелинейных искажений, например, типов ИНИ-11, ИНИ-12, С6-1 и др. В связи с тем, что на работу потребителей может оказать влияние не только суммарный состав гармоник напряжения, определяемый коэффициентом искажения формы кривой, но и отдельные гармоники, иногда необходимо определять гармонический состав напряжения, что удобно делать с помощью селективных вольтметров (например, типа В6-2) и анализаторов гармоник (например, типа С5-3). При этом необходима достаточно высокая избирательность прибора. На практике часто применяется компактный селективный вольтметр типа В6-2, на вход которого для увеличения его избирательности включается фильтр-пробка для основной частоты, например двойной Т-образный фильтр, представленный на рис. 2.10.7.

Следует отметить, что применение фильтра вносит некоторую дополнительную погрешность при определении уровня измеряемой гармоники.

Для точного измерения гармоник более высоких порядков, чем 3, 5, 7-й, необходимо при пользовании прибором типа В6-2 применять дополнительный заграждающий фильтр, исключающий влияние этих гармоник на результаты измерений. Для этой цели можно применить, например, активный $R$—$C$-фильтр верхних частот (рис. 2.10.8) с частотой среза 3 кГц (т. е. включая 7-ю гармонику при основной частоте 400 Гц).

**Обеспечение необходимого качества электроэнергии на клеммах потребителей — одна из задач проектирования СЭЭС.** Допустимые длительные отклонения напряжения на клеммах потребителей могут быть получены путем правильного выбора уставки напряжения генератора с учетом влияния системы регулирования напряжения генератора, потерь напряжения до потребителей и режимов работы потребителей и СЭЭС в целом.

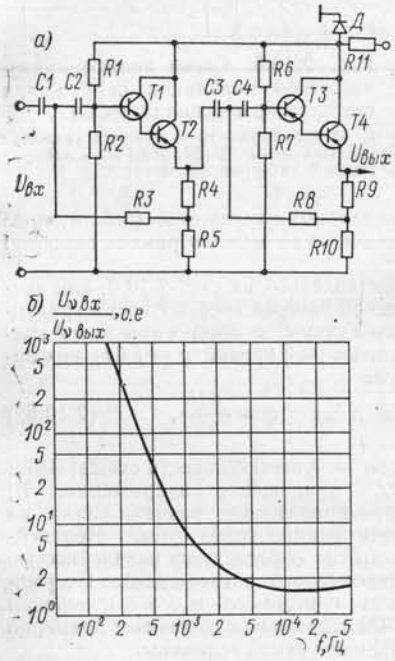



Рис. 2.10.8. Фильтр верхних частот: *а* — принципиальная схема; *б* — характеристика.

*Д* — диод типа Д-810; *Т1—Т4* — триоды типа П-402; *С1* = *С2* = *С3* = *С4* = 1800 пФ; *R1* = *R2* = *R6* = *R7* = 200 кОм; *R3* = *R8* = 10 кОм; *R4* = 1,7 кОм; *R5* = 3,3 кОм; *R9* = 1,25 кОм; *R10* = 3,75 кОм; *R11* = 1,2 кОм.

Допустимые длительные отклонения частоты обеспечиваются выбором источника электроэнергии с необходимой точностью поддержания частоты переменного тока и выбором соответствующего значения уставки генераторного агрегата по частоте с учетом характеристик системы регулирования частоты вращения первичного двигателя генератора и скольжения приводных асинхронных двигателей электромашинных преобразователей, если питание потребителей осуществляется с их помощью.

Допустимые кратковременные отклонения напряжения и частоты в переходных режимах СЭЭС обеспечиваются подбором соответствующих соотношений параметров источника электроэнергии и систем его регулирования и параметров одновременно включаемой нагрузки. При необходимости целесообразно применять для пуска асинхронных короткозамкнутых электродвигателей специальные пусковые устройства, снижающие потребляемый при пуске ток.

Допустимая несимметрия напряжения в трехфазной системе получается путем равномерного распределения однофазных потребителей по фазам с учетом режимов работы потребителей и системы в целом. С целью уменьшения несимметрии напряжения необходимо ограничивать применение на судах однофазных потребителей, особенно мощностью более 2—5 кВт.

Допустимая амплитудная низкочастотная модуляция напряжения обеспечивается путем подбора соответствующих соотношений мощности генератора и параметров импульсно-циклических потребителей электроэнергии, определяющих изменения напряжения генератора.

Допустимая величина искажений формы кривой напряжения обеспечивается путем подбора соответствующих соотношений мощностей и параметров источника и одновременно работающих статических преобразователей. Эффективным способом уменьшения искажений напряжения в системе являются параллельные фильтры, однако их параметры необходимо согласовывать с режимами одновременной работы статических преобразователей во избежание перегрузки элементов фильтра и нежелательных резонансных явлений.



При выборе статических преобразователей необходимо учитывать, что увеличение фазности преобразования и уменьшение глубины регулирования его выходного напряжения способствуют уменьшению создаваемых преобразователем искажений напряжения. Несколько уменьшают искажение напряжения в СЭЭС асинхронные электродвигатели, работающие одновременно со статическими преобразователями.

При построении систем распределения электроэнергии в СЭЭС целесообразно мощные асинхронные электродвигатели и статические преобразователи (или их группы) питать отдельными фидерами непосредственно от ГРЩ, чтобы исключить общие участки токопроводов этих потребителей и потребителей, чувствительных к резким изменениям напряжения и искажениям его формы кривой.

Из всех судовых потребителей электроэнергии наиболее чувствительными к качеству электроэнергии являются системы и устройства РЭТ. Учитывая относительно малую долю мощности, потребляемой РЭТ в СЭЭС, целесообразно разрабатывать РЭТ, рассчитанную на качество электроэнергии общесудовых ЭЭС при используемых в настоящее время источниках электроэнергии. Это обусловлено тем, что фильтрация и стабилизация напряжения более экономичны и эффективны в маломощных (до 0,1—1 кВт) цепях постоянного тока в схемах РЭТ, чем в мощных разветвленных многорежимных СЭЭС переменного тока, так как функциональные устройства РЭТ работают на постоянном токе. Из этого целесообразно исходить при выдаче технических заданий на разработку РЭТ и решении вопросов улучшения качества электроэнергии в СЭЭС.

# Глава 2.11. УСТОЙЧИВОСТЬ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## § 2.11.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Под устойчивостью судовой электроэнергетической системы понимают ее способность восстанавливать свое равновесие при изменении режима работы. Различают статическую и динамическую устойчивость. Способность системы возвращаться к своему исходному режиму или пребывать в области этого режима после малых изменений параметров или координат системы называется статической устойчивостью (устойчивостью в малом, или устойчивостью установившегося режима). Способность системы восстанавливать установившийся режим после внезапных и резких возмущений называется динамической устойчивостью (устойчивостью в большом или устойчивостью переходного режима).

Устойчивость СЭЭС включает в себя два взаимосвязанных понятия: устойчивость параллельной работы генераторов и устойчивость нагрузки. В зависимости от структуры, параметров элементов и особенностей системы функционирование ее может определяться устойчивостью параллельной работы генераторов, устойчивостью нагрузки или тем и другим.

В общем случае регулируемых электроэнергетических систем при сложной комплексной нагрузке устойчивость СЭЭС зависит от ряда ее параметров и условий. На устойчивость влияют:

— электрические параметры генераторов, сети и нагрузки;

— механические параметры генераторных агрегатов и приводов;

— законы регулирования моментов первичных двигателей, характеристики нагрузки и законы изменения моментов сопротивления приводов;

— законы регулирования возбуждения;

— устройства автоматического распределения активной и реактивной мощности генераторов;

— характеристики электрической защиты;

— начальные условия системы и соотношение номинальных мощностей элементов системы.

Особенности СЭЭС как автономной высокоавтоматизированной системы с жесткими требованиями к качеству электроэнергии обусловливают специальный подход к оценке ее устойчивости и методам, используемым для этой оценки.

В судовых условиях устойчивость параллельной работы генераторов при набросах нагрузки вполне обеспечена, а при коротких замыканиях, несинхронных включениях генераторов, сложных авариях возможны и неблагоприятные последствия, которые требуют в отдельных случаях оценки устойчивости системы. Особое внимание при проектировании и эксплуатации СЭЭС следует уделять обеспечению устойчивости нагрузки при резких изменениях режима. Оценка ее и меры по ее обеспечению являются обязательными.

С введением быстродействующих АРВ и АРЧ возникают проблемы, связанные с самораскачиванием и автоколебаниями, асинхронными режимами и ресинхронизацией судовых генераторов, устойчивостью систем с измененными параметрами и структурами, а также вопросы, связанные с качеством переходного процесса (характером и быстротой затухания) при качаниях роторов генераторов.

## § 2.11.2. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СУДОВЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ. ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ НАРУШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ

Независимо от структуры системы (работа генератора на мощную сеть, параллельная работа двух или более генераторов) и причин, вызывающих нарушение статической устойчивости, характер движения ротора при потере устойчивости может иметь следующие разновидности:

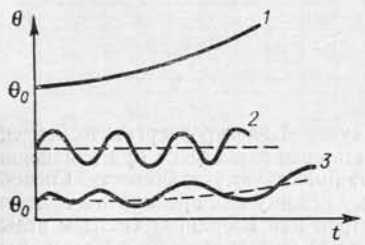


Рис. 2.11.1. Нарушения статической устойчивости.

1. Относительный угол θ монотонно возрастает и генераторы выпадают из синхронизма (кривая *1* на рис. 2.11.1). Этот случай часто называют апериодическим нарушением устойчивости или «сползанием» ротора, он имеет место при углах θ, близких к 90°.

2. Роторы совершают относительные колебания с возрастающей амплитудой около некоторого среднего положения (кривая *3* на рис. 2.11.1). Это явление называется самораскачиванием или нарушением периодической устойчивости. Иногда в силу нелинейности параметров системы колебания могут принять установившийся характер (кривая *2* на рис. 2.11.1) с определенной амплитудой и частотой (так называемый устойчивый предельный цикл колебаний). Именно с этим видом качаний генераторов (частотой 3—8 Гц) чаще всего встречаются в условиях судовых электроэнергетических систем с самого начала введения параллельной работы на судах.

3. Наблюдаются резкие колебания напряжения сети и токов при наличии относительно слабых качаний роторов. Это явление называется самовозбуждением.

По характеру возмущения нарушения статической устойчивости можно разделить на две группы:

а) малое единичное возмущение, сопровождающееся свободными колебаниями системы (в частном случае апериодический процесс);

б) возмущение периодического характера, сопровождающееся вынужденными колебаниями системы.

Опыт и исследования показывают, что причинами нарушения статической устойчивости параллельной работы судовых генераторов являются следующие:



*при апериодическом процессе*

— недопустимое перераспределение активной мощности между синхронными машинами;

*при свободных колебаниях (самораскачивание)*

— неблагоприятное соотношение параметров синхронных машин (большие активные сопротивления статоров, высокие ЭДС $e_{af0}$ и т. д.);

— большие коэффициенты усиления регуляторов возбуждения и регуляторов первичных двигателей;

— нелинейности типа «инерционность» и «люфт» в корректорах напряжения, регуляторах скорости и автоматических устройствах распределения активной и реактивной мощности между генераторами;

*при свободных колебаниях (самовозбуждение)*

— большие емкости в цепи статора генератора;

*при вынужденных колебаниях*

— периодические возмущения, вызванные дизель-генераторами;

— периодические возмущения, вызванные пульсирующей нагрузкой.

Для оценки статической устойчивости СЭЭС можно использовать несколько методов. Общим методом для решения такой задачи является метод малых колебаний. Нелинейные дифференциальные уравнения линеаризуются, записывается характеристическое уравнение и анализируются корни последнего. Оценка корней характеристического уравнения может быть произведена в общем виде для дифференциального уравнения до 3—5-го порядка. Это соответствует уравнениям одной синхронной машины без регулирования и успокоительных обмоток. Более сложные уравнения могут быть рассмотрены лишь при представлении коэффициентов в цифровом виде. Здесь используются известные методы оценки устойчивости с помощью алгебраических (Гурвица, Рауса и др.) и частотных (Михайлова, Найквиста и др.) критериев.

Уравнения высокого порядка исследуются на ЦВМ в соответствии с рекомендациями, приведенными в § 1.2.6. Для систем, порядок которых не превышает 20—25-й, можно использовать АВМ. В этом случае не анализируются корни характеристического уравнения, а производится прямое решение дифференциальных уравнений с фиксированием протекания всего процесса во времени (с линеаризацией или без линеаризации уравнений). Сложные системы могут быть исследованы на электродинамической модели.

Среди упрощенных расчетов необходимо указать на метод оценки статической устойчивости по выражениям дополнительных членов электромагнитного момента (синхронизирующие и демпферные моменты), отличающийся ясностью физической трактовки, а в ряде случаев и эффективностью.

С помощью ряда допущений можно получить приближенные методы, основанные на статических характеристиках моментов. Эти методы составляют элементарную теорию устойчивости.

Общий подход при использовании различных методов сводится к следующему: сначала применяют упрощенные методы; если статическая устойчивость оказывается недостаточно обеспеченной, то используют один из более точных методов и определяют пути улучшения устойчивости.

Для типовых СЭЭС, о которых известно, что их статическая устойчивость обеспечена, расчеты не обязательны. Однако это не означает, что в процессе наладочно-сдаточных работ не могут возникнуть качания генераторов, которые требуют знаний и навыков по их устранению.

## § 2.11.3. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ СУДОВОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНО С МОЩНОЙ БЕРЕГОВОЙ СЕТЬЮ (ЭЛЕМЕНТАРНАЯ СИСТЕМА)

Анализ корней характеристического уравнения линеаризованной системы [16] дает возможность определить условия сохранения или нарушения статической устойчивости при работе нерегулируемого, а при добавлении уравнений АРВ и АРЧ и регулируемого генератора на мощную сеть. Используются,

например, критерии Гурвица. Устойчивая работа обеспечивается, если критерии Гурвица имеют положительные знаки. Понятие же синхронизирующего (восстанавливающего) и демпферного (успокаивающего) моментов удачно поясняют физический смысл полученных критериев. Если заданные колебания ротора вызывают дополнительные составляющие электромагнитного момента, которые препятствуют исходному движению, то следует считать начальный невозмущенный режим устойчивым; в противном случае — неустойчивым.

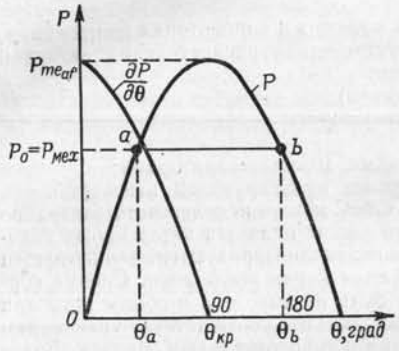



Рис. 2.11.2. Характеристика мощности элементарной системы при $e_{af} = \text{const}$.

Частное решение дифференциальных уравнений элементарной системы при заданном колебательном движении ротора дает выражение для электромагнитного момента, где его добавочные члены сводятся к двум составляющим $M_д s$ и $M_с \Delta\theta$. Коэффициенты при $s$ и $\Delta\theta$ соответственно называются демпферным или успокаивающим моментом и синхронизирующим или восстанавливающим моментом.

При $\frac{\partial M}{\partial \theta} < 0$ или $\frac{\partial P}{\partial \theta} > 0$ и $\frac{\partial M}{\partial s} < 0$ или $\frac{\partial P}{\partial s} > 0$ режим устойчивый, так как в этом случае синхронизирующий и демпферный моменты противодействуют развивающемуся процессу.

Рассматривая задачу в плане последовательного усложнения, можно получить следующие критерии.

При учете лишь механических переходных процессов анализ корней характеристического уравнения $a_0 p^2 + a_1 = 0$ дает критерий апериодической устойчивости.

При $x_d = x_q = x$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta_{\theta=\theta_0}} = \frac{e_{af_0} u_0}{z} \cos(\theta_0 - \beta) > 0; \qquad (2.11.1)$$

При $r = 0$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta_{\theta=\theta_0}} = \frac{e_{af_0} u_0}{x} \cos\theta_0 > 0. \qquad (2.11.2)$$

Критерием устойчивости является знак синхронизирующей мощности $\frac{\partial P}{\partial \theta}$.

При положительном знаке $\frac{\partial P}{\partial \theta}$ система устойчива, при отрицательном знаке — неустойчива. Иллюстрацией критериев (2.11.1) и (2.11.2) для нерегулируемого генератора является рис. 2.11.2. Например, для $P_0$ в точке $a$ $\frac{\partial P}{\partial \theta} > 0$ и система устойчива, для той же мощности $P_0$ в точке $b$ $\frac{\partial P}{\partial \theta} < 0$ и система неустойчива.

При угле $\theta_{кр}$, когда $P = P_{me_{af}}$, $\frac{\partial P}{\partial \theta} = 0$.

Заметим, что если ротор генератора имеет малые колебания около установившегося режима ($\Delta\theta = \Delta\theta_m \sin \chi\omega_s t$), то синхронизирующая мощность (при $r = 0$) определяется формулой [16]

$$P_с = -M_с = \frac{e_{af_0} u_0}{x} \cos\theta_0 + \frac{\mu u_0^2}{x'} \frac{\chi^2}{\chi^2 + \rho_f'^2} \sin^2\theta_0.$$



Второй член является дополнительным и обусловлен наличием малых колебаний. При углах $\theta_0$, близких к 90°, т. е. при больших загрузках машины, эта составляющая не только не мала, но и значительно превосходит величину основного момента. При $s = 0$, когда $\chi = 0$, дополнительный синхронизирующий момент исчезает и сохраняется первый член, совпадающий с выражением (2.11.1).

Учет дифференциального уравнения цепи возбуждения приводит к системе линейных уравнений 3-го порядка, решение которого дает следующую формулу относительного движения ротора [16]:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_m \left[ \frac{B}{A+B} e^{\alpha_y \omega_s t} + \frac{A}{A+B} e^{\beta_y \omega_s t} \left( \cos \chi\omega_s t - \frac{3\beta_y}{\sqrt{A+B}} \sin \chi\omega_s t \right) \right], \qquad (2.11.3)$$

где $A$, $B$ — величины, зависящие от параметров системы и режима.

Из формулы (2.11.3) следует, что в данном случае движение ротора складывается из монотонного по показательному закону и колебательного с угловой частотой собственных колебаний ротора $\chi\omega_s$ (их период для судовых машин равен 0,5—1,0 с).

Анализ корней характеристического уравнения $a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0$ по Гурвицу дает три критерия:

$$\left.\begin{aligned} &\Delta_1 \approx \rho_f' > 0; \quad \Delta_2 \approx k_1 \sin(\theta_0 - \beta) > 0; \\ &\Delta_3 \approx k_3 \frac{\partial P}{\partial \theta_{\theta=\theta_0}} > 0. \end{aligned}\right\} \qquad (2.11.4)$$

Третий критерий (2.11.4) определяет условия сохранения апериодической устойчивой и совпадает с (2.11.1). Сопоставление $\Delta_3$ с выражением для $\alpha_y$ показывает, что $\Delta_3 \equiv (-\alpha_y)$. При $\Delta_3 > 0$ синхронизирующая мощность положительна, и поэтому апериодический процесс затухает. Второй критерий дает

$$\theta_{кр} = \operatorname{arctg} \frac{r}{x}. \qquad (2.11.5)$$

Сопоставление выражений для $\Delta_2$ и $\beta_y$ устанавливает, что $\Delta_2 > 0$ соответствует $\beta_y < 0$ и колебательный процесс затухает. При $r = 0$ $\Delta_2$ всегда положителен.

Здесь уместно заметить, что демпферный момент генератора, выведенный в предположении наличия малых колебаний ($\Delta\theta = \Delta\theta_m \sin \chi\omega_s t$) при $r = 0$ [16] определяется формулой

$$-M_д = P_д = \frac{\mu u_0^2}{x'} \frac{\rho_f'}{\chi^2 + \rho_f'^2}.$$

При $r = 0$ демпферная мощность является положительной величиной, и потому содействует сохранению устойчивости на всем диапазоне углов $\theta_0$. При учете же активного сопротивления статора при малых углах $\theta_0$ возможно отрицательное значение $P_д$, а следовательно, и самораскачивание системы.

Сопоставление $\Delta_2$, $\beta_y$ и $P_д$ дает $P_д \equiv \Delta_2 \equiv (-\beta_y)$.

Таким образом, причиной самораскачивания нерегулируемого синхронного генератора, работающего на мощную сеть, является наличие активного сопротивления $r$ в цепи статора, что связано с возможностью появления отрицательных значений демпферной мощности.

Необходимо подчеркнуть, что для нерегулируемого генератора, работающего на мощную сеть, характерно следующее: условие $\Delta_2 > 0$ может быть нарушено лишь при малых углах $\theta_0$, а условие $\Delta_3 > 0$ — при углах $\theta_0$, близких к 90°.

Наконец, первый критерий $\Delta_1 \approx \rho_f' > 0$ подчеркивает необходимость некоторого рассеяния энергии в цепи возбуждения. Этот критерий может принять отрицательное значение при введении емкости в цепь статора. При $x_г' < x_{лС} < x_г$

$\rho'_г < 0$. Это явление, называемое самовозбуждением, сопровождается резким колебанием напряжения, ЭДС, токов. Область самовозбуждения при заданном емкостном сопротивлении $x_{лC}$ ограничивается наличием активного сопротивления в статоре. Границей такой области в плоскости координат $x$, $r$ является полуокружность с радиусом $\frac{x_г - x'_г}{2} = \frac{x - x'}{2}$, что иллюстрируется рис. 2.11.3.

Учет переходных колебаний в статоре приводит к системе уравнений 5-го порядка. Ее решение [16] уточняет выражение (2.11.3) и добавляет к рассмотренным видам движения ротора составляющие колебательного движения с частотой, близкой к синхронной частоте приложенного напряжения. Угол $\theta_{0кр}$ оказывается несколько большим, чем вычисленный с помощью формулы (2.11.5); амплитуда же высокочастотных колебаний угла $\Delta\theta$ составляет ничтожную величину, и сами колебания быстро затухают [10]. В соответствии с [7]

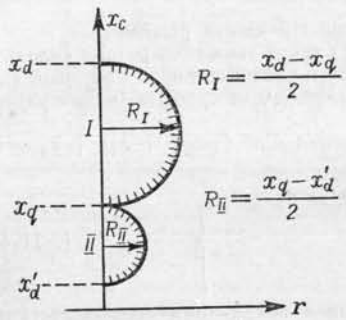



Рис. 2.11.3. Границы области самовозбуждения.

*I* — зона синхронного самовозбуждения; *II* — зона асинхронного самовозбуждения

$$\theta_{кр} = k\,\mathrm{arctg}\,\frac{r}{x}, \qquad (2.11.6)$$

где $k = 2 \div 3{,}5$.

Учет поперечного контура при пренебрежении переходными колебаниями в цепи статора приводит систему дифференциальных уравнений к 4-му порядку.

Анализ корней характеристического уравнения $a_0p^4 + a_1p^3 + a_2p^2 + a_3p + a_4 = 0$ по Гурвицу дает следующее.

Первый критерий $\Delta_1 = a_1 > 0$ характеризует самовозбуждение системы. Обращает на себя внимание увеличение зоны самовозбуждения при наличии поперечного контура. В данном случае самовозбуждение возможно при соблюдении неравенства

$$x''_{qг} < x_{лC} < x_г. \qquad (2.11.7)$$

Четвертый критерий $\Delta_4 \equiv a_4$ определяет условие апериодической устойчивости. Оно аналогично условию без успокоительной обмотки (2.11.4) $\Delta_3 > 0$.

Второй $\Delta_2 = a_1a_2 - a_3 > 0$ и третий $\Delta_3 = (a_1a_2 - a_3)\,a_3 - a_1^2a_4 > 0$ критерии характеризуют условия самораскачивания системы. Анализ этих критериев в общем виде для произвольного угла $\theta_0$ произвести не удается. Однако, имея в виду, что самораскачивание нерегулируемого генератора, как это отмечено выше, возможно при малых углах $\theta_0$, достаточно ограничиться рассмотрением выражения $\Delta_2$ и $\Delta_3$ при $\theta_0 = 0$. Их анализ показывает, что условие $\Delta_3 > 0$ является более жестким, чем $\Delta_2 > 0$, и позволяет определить

$$r^2_{кр} = -x^2\frac{p}{2} \pm x^2\sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}, \qquad (2.11.8)$$

где

$$\left.\begin{aligned} \frac{p}{2} &= \frac{\sigma}{2}\left[\frac{\mu_q\,(e_{af} - 1)}{\mu\,(e_{af} - 1) + \rho'_f\rho_{rq}T_J x} + 1\right]; \\ q &= -\frac{\sigma^2\mu_q}{\mu\,(e_{af} - 1) + \rho'_f\rho_{rq}T_J x}. \end{aligned}\right\} \qquad (2.11.9)$$

При грубых расчетах допустимо пользоваться формулой

$$r_{кр} = x\sqrt{\frac{\sigma\mu_q}{e_{af}\,(1 + \mu) - \mu}}.$$



Расчеты показывают, что поперечная успокоительная обмотка в области малых нагрузок (углов $\theta_0$) создает существенную демпферную мощность и является надежным средством для недопущения самораскачивания нерегулируемого генератора.

Учет продольного успокоительного контура содействует успокоению колебаний ротора при больших углах $\theta_0$ и несколько ухудшает условия сохранения колебательной устойчивости в области малых углов $\theta_0$. Это связано с созданием положительной демпферной мощности в области углов $\theta_0$, близких к 90°, и при соответствующих условиях — отрицательной в области $\theta_0 \approx 0$.

Некоторое влияние на статическую устойчивость элементарной системы оказывает регулирующий эффект первичных двигателей.

При наличии регулирования возбуждения в функции отклонения напряжения, если пренебречь запаздыванием в действии регулятора, уравнение регулирования можно принять в виде

$$\Delta u_f = -k_u\,\Delta u_г, \qquad (2.11.10)$$

где $k_u$ — постоянный коэффициент; $u_г$ — напряжение на зажимах генератора.

Если пренебречь активным сопротивлением статора, переходными колебаниями в статоре и успокоительными контурами генератора, то при работе его на мощную сеть процесс описывается линейным уравнением 3-го порядка и анализ характеристического уравнения дает следующие критерии:

$$k_u = k_{u\,max} = \frac{u_{г0}\mu}{\left(1 - \frac{x_г}{x_г + x_л}\right)\left[\left(\frac{x_г}{x_г + x_л} - \mu\right)e_{af0} - \mu\,\frac{x_г}{x_г + x_л}\,u_0\cos\theta_0\right]}; \qquad (2.11.11)$$

$$a_3 = \cos\theta_0 + \frac{k_u}{u_{г0}}\left(1 - \frac{x_г}{x_г + x_л}\right)\left[\frac{x_г}{x_г + x_л}\,u_0 + \left(1 - \frac{x_г}{x_г + x_л}\right)e_{af0}\cos\theta_0\right] > 0. \qquad (2.11.12)$$

Условие (2.11.12) характеризует предельный угол устойчивой работы (по сползанию). Из него следует, что при увеличении $k_u$ предельный угол $\theta_0$ возрастает. Однако величина $k_u$ ограничивается условием (2.11.11). При $k_u \geqslant k_{u\,max}$ создаются условия перерегулирования и раскачивания системы. Математически это означает переход при $k_u > k_{u\,max}$ от отрицательных к положительным значениям вещественных частей комплексных корней характеристического уравнения. Физический смысл условия (2.11.11) означает, что в результате действия АРН приращение тока возбуждения $\Delta i_f$ оказывается настолько велико, что новое отклонение напряжения станет больше первоначального. Поэтому регулятор получит новый импульс, больший по величине, но другого знака. Таким образом, создаются условия для раскачивания системы.

Для выяснения условий сохранения устойчивости при регулировании возбуждения по закону нормального компаундирования используем выражение для $u_f$ в виде [9]

$$u_f = i_f = k_u u + k_i i \approx 1 + k_i i_d,$$

откуда

$$\Delta u_f = k_i\,\Delta i_d. \qquad (2.11.13)$$

При допущениях, принятых выше, процесс описывается также уравнением 3-го порядка, и анализ характеристического уравнения дает критерии

$$k_{iкр} = \mu x; \qquad (2.11.14)$$

$$a_3 = \rho'_f\,\frac{u_0}{T_J x}\left[e_{af0}\left(1 - \frac{k_i}{x}\right)\cos\theta_0 + k_i\,\frac{u_0}{x}\sin^2\theta_0\right] > 0. \qquad (2.11.15)$$

Из (2.11.15) следует, что в области больших углов $\theta_0$ увеличение $k_i$ обеспечивает положительный знак $a_3$, т. е. апериодическую устойчивость. Условие сохранения периодической устойчивости не зависит от значения угла $\theta_0$ и определяется критерием (2.11.14).

Если учесть действие поперечной успокоительной обмотки, то при регулировании возбуждения по закону нормального компаундирования имеем критерии

$$k_{i\text{кр}} = x \text{ при } \theta_0 \approx 0; \tag{2.11.16}$$

$$k_{i\text{кр}} = \frac{\mu x}{1 + \dfrac{\mu u_0^2}{\rho''^2_{rq} T_J x}} \text{ при } \theta_0 \approx 90°. \tag{2.11.17}$$

Из сравнения (2.11.16) и (2.11.14) следует, что поперечная обмотка позволяет предельно использовать возможности нормального компаундирования. Однако такое заключение справедливо лишь для малых углов $\theta_0$. При $\theta_0 \approx 90°$ поперечный успокоительный контур может даже способствовать самораскачиванию, так как требование (2.11.17) более жесткое, чем (2.11.14). Необходимо отметить, что в СЭЭС начальные углы лежат, как правило, в пределах до 30°. Исключение составляет работа синхронной машины в двигательном режиме, где угол $\theta_0$ превышает 45—50°.

Критерий (2.11.16) означает, что даже при наличии поперечной демпферной обмотки для обеспечения устойчивой работы генератора внешняя характеристика генератора (при неучете корректора напряжения) должна быть падающей с ростом нагрузки. Это обеспечивается соответствующей настройкой трансформатора фазового компаундирования. Указанный момент подтверждается результатами расчетов и практикой [4]. Корректор напряжения, как известно, должен компенсировать изменение напряжения и поддерживать его неизменным.

Однако вместе с этим корректор напряжения может оказаться причиной появления автоколебаний при параллельной работе генераторов. В ряде случаев корректор напряжения необходимо рассматривать не как безынерционное звено, а как апериодическое звено первого порядка [9]. При этом изменение режима генератора существенно влияет на значение постоянной времени корректора напряжений $T_u$ и коэффициент усиления $k_к$. Запаздывания в действии корректора напряжения, обусловленные постоянной времени $T_u$, могут вызвать незатухающие колебания угла $\theta$ (а как следствие, и мощности генератора) при $\theta_0 < 90°$ и самораскачивание при $\theta_0 > 90°$. Обеспечение устойчивой работы по контуру регулирования достигается снижением коэффициента усиления $k_i$ ($k_i$ должен быть меньше $k_{i\text{пред}}$), уменьшением постоянной времени обмотки управления корректора напряжения, введением в корректор напряжения сигнала по активной мощности путем включения емкости к вторичной обмотке трансформатора параллельной работы.

Включение в систему регулятора скорости первичного двигателя усиливает колебательность системы и может явиться причиной самораскачивания или установившихся качаний генераторного агрегата. Это очевидно из рассмотрения уравнения моментов в малом (2.11.1) при наличии идеального регулятора прямого действия, уравнение которого является предельно простым [9]

$$\eta = -\frac{s}{\delta} = -\frac{p\,\Delta\theta}{\delta}.$$

Уравнение (2.11.10) в этом случае преобразуется к виду

$$T_J p^2 \Delta\theta + \Delta P + \left(D - \frac{1}{\delta}\right) p\,\Delta\theta = 0. \tag{2.11.18}$$

Если саморегулирование $D$ первичного двигателя и регулятор скорости при положительном статизме способствуют сохранению устойчивости, то при



отрицательном статизме регулятор скорости способствует созданию отрицательного демпферного эффекта и, следовательно, приводит к нарушению устойчивости.

Исследование устойчивости элементарной системы с регулятором скорости без нелинейностей показывает, что катаракт регулятора скорости незначительно влияет на устойчивость, а инерционность измерителя скорости существенно улучшает устойчивость при уменьшении постоянной времени регулятора $T_r$; введение в регулятор скорости дополнительного импульса по ускорению, как и ожидалось, благоприятно сказывается на устойчивости — существенно влияние поперечной успокоительной обмотки.

Как следует из теории автоматического регулирования, одной из причин автоколебаний в элементарной системе являются люфты в регуляторе скорости. Они вызывают автоколебание частотой 3—5 Гц. Интересно, что в ряде случаев неустойчивая система в малом при наличии люфта становится устойчивой с колебаниями. Это объясняется появлением дополнительных членов в выражениях для $P_д$ и $P_с$.

Увеличение постоянной вязкого трения может привести к уменьшению автоколебаний: катаракт слабо влияет на автоколебания.

Таким образом, уменьшение люфтов в регуляторе скорости и изменение ряда параметров элементарной системы позволяют обеспечить устойчивость в малом. Для определения параметров, которые следует изменять, целесообразно либо использовать АВМ, либо строить амплитудно-фазовые характеристики с варьированием параметров системы. При этом наиболее эффективным для подавления автоколебаний в системе, обусловленных регулятором скорости, является уменьшение его инерционности, увеличение постоянной вязкого трения и введение в регулятор сигналов по производной скорости или мощности генератора.

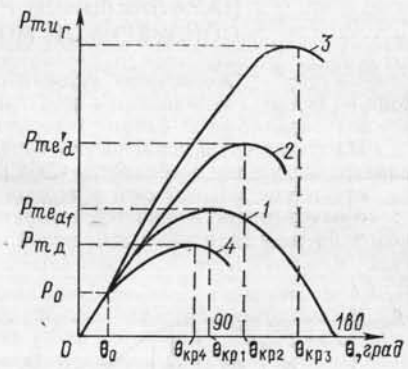



Рис. 2.11.4. Характеристики мощности элементарной системы.

*1* — $e_{af}$ = const; *2* — $e'_d$ = const; *3* — $u_г$ = = const; *4* — $u_s \neq$ const.

Если условия сохранения периодической устойчивости обеспечены, то оценка устойчивости сводится к определению апериодической устойчивости, т. е. знака синхронизирующей мощности. Этот критерий применяется с учетом различных условий работы системы. Различают характеристики мощности, которые существуют при постоянстве ЭДС $e_{af}$, $e'_d$ или напряжения на зажимах генератора $u_г$ (кривые *1*, *2*, *3* на рис. 2.11.4). Им соответствуют максимальные значения мощности $P_{me_{af}}$, $P_{me'_d}$, $P_{mu_г}$ и предельные углы $\theta_{кр1}$, $\theta_{кр2}$ и $\theta_{кр3}$. Две последние характеристики могут быть получены лишь при надлежащем регулировании тока возбуждения и специальных средствах создания демпферных моментов, не допускающих качания роторов. Наконец, на рис. 2.11.4 (кривая *4*) представлена характеристика мощности с максимумом $P_{mд}$ и предельным углом $\theta_{кр4}$, соответствующая системе, в которой напряжение приемной сети, ограниченной по мощности, уменьшается по мере увеличения угла $\theta$.

Рассмотренные процессы характеризуются свободными колебаниями ротора генератора, работающего на мощную сеть. Не в меньшей степени возможны качания, из-за периодических возмущений, создаваемых дизель-генераторами, импульсной нагрузкой и др. Здесь задачей проектирования системы является создание максимального разрыва между частотой вынужденных внешних сил и собственной частотой агрегата. Вынужденные колебания в большинстве случаев имеют частоту $\gamma$, не совпадающую с собственной частотой системы $\omega_0$. Однако

принципиально это возможно, и в этом случае в системе возникает резонанс колебаний, что проявляется в росте амплитуды по величине [7]:

$$\Delta\theta_m \approx \frac{P_{\text{вын}}}{P_{\text{д}}\gamma},$$

где $\Delta\theta_m$ — амплитуда колебаний ротора; $P_{\text{вын}}$, $\gamma$ — соответственно амплитуда и частота вынуждающей силы; $P_{\text{д}}$ — демпферный коэффициент.

Обычно частота собственных колебаний $\omega_0$, зависящая от генератора системы и инерции $T_J$, лежит в пределах 0,2—2 Гц.

## § 2.11.4. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СУДОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ СОИЗМЕРИМОЙ МОЩНОСТИ

Обеспечение устойчивого режима работы синхронного генератора на мощную сеть является необходимым, но недостаточным условием для надежной параллельной работы генераторов соизмеримой мощности.

На статическую устойчивость параллельной работы нескольких генераторов влияют следующие особенности СЭЭС:

отсутствие мощной сети и возможность изменения напряжения и частоты;

соизмеримость мощностей генераторов, возможность применения неодинаковых по типу первичных двигателей и регуляторов скорости, большая разница в значениях инерционных постоянных;

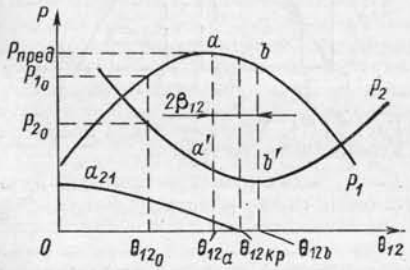



Рис. 2.11.5. К расчету предела устойчивости позиционной системы.

относительно большие активные и незначительные реактивные сопротивления цепи, соединяющей генераторы между собой; отсутствие деления генераторов на близкие и удаленные и, как следствие, незначительный начальный угол $\theta_{12_0}$ при равномерной загрузке машин в генераторном режиме и большой угол $\theta_{12_0}$ при переводе одной из машин в двигательный режим;

незначительный статизм регуляторов скорости и возможность наличия нелинейностей типа «люфт» в регуляторах каждого агрегата;

использование самовозбуждающихся генераторов и возможность запаздывания в действии корректора напряжения;

наличие автоматических систем распределения активной и реактивной мощности;

значительная асинхронная нагрузка и возможность воздействия периодической мощной нагрузки.

Наличие двух или нескольких генераторов, работающих параллельно, усложняет исследование статической устойчивости системы. В общем виде задача до сих пор не решена.

В предположении зависимости активных мощностей генераторов $P_1$ и $P_2$ только от угла $\theta_{12}$ (позиционная система) получен приближенный критерий апериодической устойчивости для системы с двумя генераторами [7]

$$a_{21} = \frac{1}{T_{J_1}}\frac{\partial P_1}{\partial\theta_{12}} - \frac{1}{T_{J_2}}\frac{\partial P_2}{\partial\theta_{12}} > 0. \qquad (2.11.19)$$

Иллюстрацией критерия является рис. 2.11.5. Предел устойчивости системы лежит между углами $\theta_{12a}$ и $\theta_{12b}$, изменяясь в этих пределах в зависимости от соотношения $T_{J_1}$ и $T_{J_2}$. Заметим, что если для элементарной системы предел устойчивости и предел мощности совпадают, то в данном случае они различны и отличаются на угол $2\beta_{12}$. В судовых условиях он составляет 10—30°.



Для судовых систем, в задачу которых не входит передача максимальной мощности, работа генераторов происходит при углах $\theta_{12}$, значения которых меньше предельных, и потому апериодическая устойчивость хорошо обеспечивается. Однако существенную роль играет режим работы генераторов. Представление об оценке апериодической устойчивости можно получить, сопоставив два случая: в первом — обе машины в генераторном режиме, во втором — одна из машин работает в двигательном режиме. Если $u$ — напряжение мощной сети, то апериодическая устойчивость в обоих случаях обеспечивается, когда углы $\theta_1$ и $\theta_2$ меньше 90°. Если же мощная сеть отсутствует, то апериодическая устойчивость определяется углом $\theta_{12}$ и при тех же $\theta_1$ и $\theta_2$ превышение относительного угла в 90° вполне возможно.

Статическая устойчивость параллельной работы генераторов нерегулируемой системы в наиболее полной и доступной форме проанализирована в работе [15], где использован метод малых колебаний и критерии Гурвица. Получено характеристическое уравнение 8-го порядка. Учитывая разницу в порядке величин, входящих в выражения для коэффициентов этого уравнения $a_0 - a_8$, при положительности всех коэффициентов $a_0 - a_8$ условия Гурвица можно свести к следующим трем критериям:

$$\Delta_2 = a_1a_2 - a_0a_3 > 0;$$

$$\Delta_5 = a_5\left(a_3a_4 - a_2a_5\right) - a_3^2a_6 > 0; \quad \Delta_2^0 = a_6a_7 - a_5a_8 > 0.$$

Анализ полученных условий и расчеты конкретных систем позволяют сделать следующие выводы:

а) из выражения для свободного члена следует, что ни магнитная, ни механическая инерция роторов не влияют на границу области апериодической устойчивости; заметное влияние на выражение свободного члена оказывает моментно-скоростная характеристика первичного двигателя;

б) при нарушении условия $\Delta_2^0 > 0$ наступает самораскачивание (по терминологии Горева — самораскачивание первого рода), которое зависит главным образом от механической инерции роторов, а также магнитной инерции, индуктивной нагрузки и других параметров. Период колебания в этом случае зависит от режима и достигает десятков и сотен секунд. Это явление отсутствует при работе одного генератора на мощную сеть;

в) при нарушении условия $\Delta_5 > 0$ возникает самораскачивание второго рода (рассмотрено подробно в § 2.11.3 для элементарной системы). Оно возможно при наличии активного сопротивления статора хотя бы одной машины и учете электромагнитных переходных процессов ротора. Период колебания составляет десятые доли секунды. Область самораскачивания соответствует малым нагрузкам;

г) отрицательный знак $\Delta_2$ связан с появлением высокочастотного самораскачивания, которое, как было установлено в § 2.11.3, можно не принимать во внимание.

Анализ показывает, что при рассмотрении статической устойчивости можно не учитывать переходные колебания в цепи статора, как это было отмечено в § 2.11.3.

Наконец, заметим, что самовозбуждение возникает, если не выполняется условие

$$\Delta_1 = \rho'_{f1} + \rho'_{f2} + \frac{\frac{P_{\text{нг}}}{Q_{\text{нг}}}\left(\frac{\partial P_{\text{нг}}}{\partial u} - 1\right) + \frac{Q_{\text{нг}}}{P_{\text{нг}}}\left(\frac{\partial Q_{\text{нг}}}{\partial u} - 1\right) + \frac{u^2}{x^2}}{\left(\frac{\partial P_{\text{нг}}}{\partial u} - 1\right)\frac{\partial Q_{\text{нг}}}{\partial\omega} - \left(\frac{\partial Q_{\text{нг}}}{\partial u} - 1\right)\frac{\partial P_{\text{нг}}}{\partial\omega}} > 0.$$

Из работы [15] следует, что самораскачивание в данном случае определяется главным образом статическими характеристиками нагрузки (см. ниже).

Периодическая устойчивость при параллельной работе нерегулируемых генераторов соизмеримой мощности по сравнению с элементарной системой может ухудшиться из-за увеличения активного сопротивления цепи статоров генераторов, появления качественно нового явления — самораскачивания генераторов 1-го рода, влияния поведения нагрузки.

Введение регуляторов напряжения и скорости увеличивает порядок линеаризованных уравнений с учетом демпферных контуров до 16—20-го, что еще больше затрудняет исследования статической устойчивости СЭЭС. Введение автоматизированных устройств распределения активной и реактивной мощности между генераторами вносит свои особенности в процесс. Здесь наиболее рационально использовать АВМ и ЦВМ в сочетании с приближенными методами.

Автоматизированные СЭЭС в последние годы исследованы с помощью метода структурного анализа [4], метода дополнительных членов электромагнитных моментов синхронных генераторов, получившего развитие в работе [61], метода Рауса [30], с использованием ЦВМ и АВМ. Эти работы показали, что статическая устойчивость элементарной системы выше устойчивости параллельной работы генераторов соизмеримой мощности. Наиболее распространенными причинами нарушения статической устойчивости СЭЭС являются повышенные коэффициенты усиления регулирующих устройств, нелинейности типа «люфт» регуляторов скорости.

Исследования подтвердили необходимость увеличения демпфирующего действия генераторов (демпферных контуров), разумного снижения коэффициентов усиления регуляторов различного назначения при одновременном введении в случае необходимости корректирующих обратных связей для обеспечения требований статической точности поддержания регулируемых параметров, недопущения нелинейностей типа «люфт» и запаздываний в действии корректоров напряжений ССВ. Подчеркнем, что положение, согласно которому считается обеспеченной статическая устойчивость двух параллельно работающих генераторов, если обеспечена устойчивость работы генератора на мощную сеть, является ошибочным.

## § 2.11.5. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР — КОМПЛЕКСНАЯ НАГРУЗКА (УСТОЙЧИВОСТЬ НАГРУЗКИ)

При автономной работе генератора на нагрузку статическая устойчивость системы сводится к устойчивости нагрузки. При этом неблагоприятным обстоятельством в СЭЭС для обеспечения устойчивости нагрузки является соизмеримость суммарной мощности приводов и генераторов.

В *нерегулируемой системе* генератор — асинхронная нагрузка при протекании свободного процесса принципиально не могут возникнуть самораскачивания 1-го и 2-го рода. Самораскачивания не может быть потому, что ротор асинхронной машины не связан жестко с магнитным полем, как у синхронной машины, у которой в установившемся режиме угол $\theta_0 = \text{const}$. У асинхронного двигателя ротор скользит по отношению к синхронно вращающемуся полю и в процессе перехода асимптотически изменяет свою скорость от одного значения к другому. Поэтому в рассматриваемой системе нарушение устойчивости может иметь характер лишь апериодического процесса. Критерием устойчивости в этом случае является знак свободного члена характеристического уравнения. Это условие лежит в основе всех практических критериев устойчивости отдельного привода и комплексной нагрузки системы: $\frac{\partial M}{\partial s}$, $\frac{\partial Q}{\partial u}$, $\frac{\partial e_{af}}{\partial u}$ [7]. Удобным для использования в СЭЭС является критерий $\frac{\partial M}{\partial s}$.

При работе двигателя от сети $u = \text{const}$ и $f = \text{const}$ устойчивость электропривода определяется условием

$$a = \frac{\partial M_\Sigma}{\partial s} = \frac{\partial M}{\partial s} + \frac{\partial M_т}{\partial s} > 0. \qquad (2.11.20)$$



Если пренебречь электромагнитными переходными процессами в электродвигателе, то в предположении $M_т = \text{const}$ критерий (2.11.20) дает возможность определить $s_{кр}$ и $M_{max}$:

$$\left.\begin{aligned} s_{кр} &= \frac{\rho_r}{\sigma}; \\ M_{max} &= u^2 \frac{\mu}{2x\sigma}, \end{aligned}\right\} \qquad (2.11.21)$$

где $\mu$, $\sigma$, $x$ — параметры асинхронного двигателя.

Для нарушения устойчивости асинхронного двигателя необходимо, чтобы момент $M_т$ был больше момента $M_{max}$. При $u = \text{const}$ это может быть лишь при значительной (в два и больше раза) перегрузке двигателя. Фактически такие длительные перегрузки маловероятны, и проблема устойчивости асинхронного двигателя при $u = \text{const}$ не возникает.

Иные условия создаются при питании привода от сети соизмеримой мощности. Нарушение устойчивости системы генератор—асинхронная нагрузка выражается в самопроизвольном понижении напряжения в системе, сначала медленном, потом более быстром, что дало повод назвать его «лавиной напряжения». Это может быть следствием снижения тока возбуждения генератора или роста нагрузки или наличия обоих обстоятельств. Напряжение в данном случае $u \neq 0$, и потому пользоваться формулами (2.11.21) нельзя. Необходимо ввести неизменную величину ЭДС $e_{af}$. Тогда при тех же допущениях получаем

$$\left.\begin{aligned} s_{кр} &= \frac{\rho_r}{\sigma_D}; \\ M_{\min D} &= e_{af} \frac{\mu_D}{2x_D\sigma_D}. \end{aligned}\right\} \qquad (2.11.22)$$

Здесь

$$\rho_r = \frac{r_r}{x_r}; \quad \sigma_D = \frac{x_d + x'}{x_d + x} = \frac{x_d + x'}{x_d + x_1 + x_м};$$

$$\mu_D = 1 - \sigma_D;$$

$$x_D = x_d + x_1 + x_м = x_d + x;$$

$$x_r = x_2 + x_м;$$

где $x_d$ — продольное синхронное индуктивное сопротивление генератора; $x$, $x_1$, $x_2$, $x_м$ — параметры асинхронного двигателя.

Момент двигателя при этом определяется по формуле

$$M_D = e_{af}^2 \frac{\mu_D s \rho_r}{x_D (\rho_r^2 + \sigma_D^2 s^2)}. \qquad (2.11.23)$$

Увеличение индуктивного сопротивления цепи статора двигателя на величину $x_d$ приводит к значительному уменьшению $s_{кр}$, а максимальный момент $M_{max}$ зависит как от $x_d$, так и от ЭДС $e_{af}$.

Заметим, что при использовании (2.11.22) для системы с явнополюсным генератором можно принимать $x = x_d$. Ошибка в вычислении $s_{кр}$ не превышает 3%, а $M_{max}$ — 6% при самых неблагоприятных соотношениях параметров системы.

Устойчивость *регулируемой системы* не может быть полностью оценена с помощью практических (приближенных) критериев. Однако в предположении отсутствия запаздывания и люфтов в регуляторах напряжения и скорости и фактически имеющих место коэффициентов усиления регуляторов в инженерной практике можно ограничиваться критерием апериодической устойчивости.

В предположении безынерционности регулятора возбуждения работа системы при увеличении асинхронной нагрузки протекает сначала по характеристике *3* при $u = \text{const}$ (внешней) (рис. 2.11.6) до момента достижения ЭДС $e_{af\,max}$, определяемого потоком возбуждения, а потом по характеристикам *1* или *2* (внутренним) при $e_{af} = e_{af\,max} = \text{const}$.

При $s_{кр} < s_{c1}$ (кривая *1*)

$$M_{пред} = \frac{1}{\frac{x}{\mu}\left(\frac{\rho_r}{s_c} + \sigma^2 \frac{s_c}{\rho r}\right)} = M_{совм1}. \qquad (2.11.24)$$

При $s_{кр} > s_{c2}$ (кривая *2*)

$$M_{пред} = M_{max} = e_{af\ max}^2 \frac{\mu_D}{2x_D\sigma_D}. \qquad (2.11.25)$$

Скольжение $s_{c1,2}$ определяется по формуле

$$s_{c1,2} = s_{крD}\sqrt{\frac{1 - ae_{af\ max}^2}{be_{af\ max}^2 - 1}}, \qquad (2.11.26)$$

где

$$a = \frac{\mu_D x}{\mu x_D}; \quad b = a\frac{\sigma^2}{\sigma_D^2}; \quad s_{крD} = \frac{\rho_r}{\sigma_D}.$$

Таким образом, если индуктивное сопротивление генератора и линии значительно сдвигает $s_{кр}$ в сторону уменьшения его значения и снижает $M_{пред}$ (понижает запас динамической устойчивости), то АРВ, наоборот, переводит работу на внешнюю характеристику, увеличивает $M_{пред}$, и это увеличение тем больше, чем выше потолок возбуждения генератора. Запас статической устойчивости определяется по формуле

$$k_c = \frac{M_{пред} - M_0}{M_0}.$$

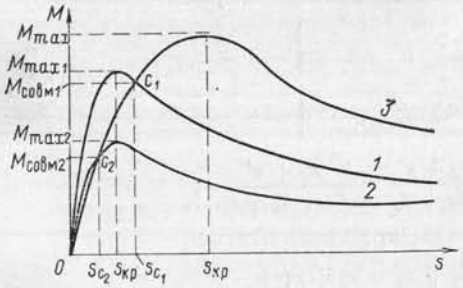



Рис. 2.11.6. К использованию критерия $\frac{\partial M}{\partial s}$ при наличии АРВ.

Рассмотренные выше вопросы относятся к системе генератор — асинхронный двигатель (исследуемый или эквивалентный). В практических расчетах фигурирует, как правило, комплексная нагрузка. В этом случае используют так называемые статические характеристики нагрузки $\frac{\partial P_{нг}}{\partial u}$ и $\frac{\partial Q}{\partial u}$ (по напряжению) и $\frac{\partial P_{нг}}{\partial \omega}$ и $\frac{\partial Q_{нг}}{\partial \omega}$ (по частоте). В литературе часто статическими характеристиками нагрузки называют сами зависимости $P_{нг}$ и $Q_{нг}$ от частоты и напряжения (рис. 2.11.7). Такие характеристики рассчитываются для типовой комплексной нагрузки. С помощью их могут рассчитываться статическая устойчивость как эквивалентной нагрузки, так и отдельного привода. При этом используется критерий $\frac{\partial e_{af}}{\partial u}$ или $\frac{\partial Q}{\partial u}$. Когда применяется критерий $\frac{\partial e_{af}}{\partial u}$, строится зависимость $e_{af} = f(u)$ с использованием статических характеристик нагрузки (кривая *1* на рис. 2.11.8) и определяется предельный режим по устойчивости (точка *c*), т. е. устойчивый режим, соответствующий максимальной нагрузке всей системы или ее части. Если $\frac{\partial e_{af}}{\partial u} > 0$, то режим устойчивый (например, точка *a* на кривой *1*). Это иллюстрируется кривой *2*. Если же $\frac{\partial e_{af}}{\partial u} < 0$, то режим неустойчивый (например, точка *b* на кривой *1*).



Аналогично критерию $\frac{\partial Q}{\partial u} < 0$ соответствует устойчивый режим (например, точка *a* на рис. 2.11.8, *б*), а $\frac{\partial Q}{\partial u} > 0$ — неустойчивый режим (например, точка *b*).

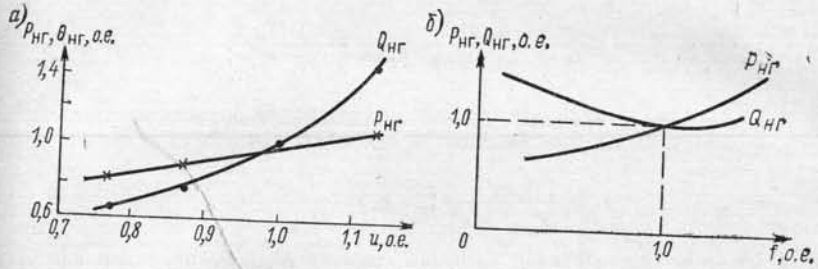



Рис. 2.11.7. Статические характеристики судовой нагрузки по напряжению (*а*) и частоте (*б*).

Если можно определить параметры эквивалентного асинхронного привода, тогда для оценки статической устойчивости можно использовать критерий $\frac{\partial M}{\partial s}$ (см. рис. 2.11.6).

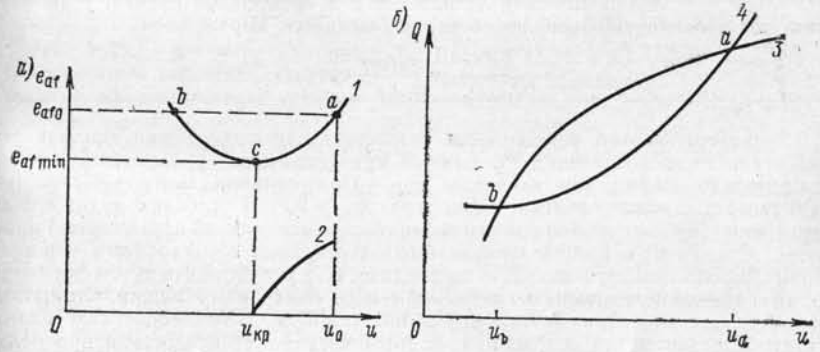



Рис. 2.11.8. К использованию критериев $\frac{\partial e_{af}}{\partial u}$ и $\frac{\partial Q}{\partial u}$.

*1* — $e_{af} = f(u)$; *2* — $\frac{\partial e_{af}}{\partial u} = f(u)$; *3* — характеристика генератора; *4* — характеристика нагрузки.

Для нагрузки, состоящей из асинхронной и осветительной $r_{осв}$, предельные значения $s_{кр}$ и $M_{max}$ асинхронного эквивалентного двигателя определяются по формулам

$$s_{кр} = \rho_r k_R; \qquad (2.11.27)$$

$$M_{max} = e_{af}^2 \frac{\mu_D k_R}{x_D[(1 - k_2 k_R)^2 + (k_1 + \sigma_D k_R)^2}, \qquad (2.11.28)$$

где

$$\rho_r = \frac{r^2}{x_к + x_{0R}}; \quad k_R = \sqrt{\frac{1 + k_1^2}{\sigma_D^2 + k_2^2}};$$

$$x_D = x_d + x_{0R}; \quad x_{0R} = kx_0; \quad k = \frac{r_0^2}{x_0^2} + 1;$$

$$x_r = x_к + x_{0R}; \quad k_2 = \frac{r_0}{x_0}\frac{x_к}{x_r}\frac{x_d}{x_D};$$

$$k_1 = \frac{r_0}{x_0}\frac{x_d}{x_D}; \quad \sigma_D = \frac{x_1 + x_d}{x_d + x_{0R}};$$

$$r_0 = \frac{r_{осв}x_м^2}{x_{осв}^2 + x_м^2}; \quad x_0 = \frac{r_{осв}^2 x_м}{r_{осв}^2 + x_м}.$$

Включение осветительной нагрузки снижает $M_{max}$ асинхронной нагрузки.

Аналогично могут быть определены $M_{max}$ и $s_{кр}$ при включении статической емкостной и индуктивной нагрузок.

## § 2.11.6. ПРИМЕРЫ ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СЭЭС. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СТАТИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

Апериодическая устойчивость в простейшем случае, если опустить составляющую явнополюсности, определяется выражением

$$\frac{\partial P}{\partial\theta_{\theta=\theta_0}} = \frac{e_{af0}u_0}{x_d}\cos\theta_0.$$

Запас статической устойчивости возрастает при уменьшении синхронного индуктивного сопротивления $x_d$, а также при увеличении уровня возбуждения и пропорциональной ему величины $e_{af0}$. При наличии быстродействующих АРВ генератор может работать и при углах $\theta_0 > 90°$. В условиях судна в силу специфики СЭЭС нет необходимости добиваться максимальной передаваемой мощности. Совершенно неоправданным было стремление в синхронных машинах серии МС обеспечивать высокую апериодическую устойчивость путем снижения $x_d$, что привело к увеличению габаритов и масс синхронных машин. Отсутствие значительных индуктивных сопротивлений линий в СЭЭС обеспечивает благоприятные условия для сохранения апериодической устойчивости и при бо́льших $x_d$.

Например, для судового агрегата типа МСС102-4 ($S_{ном} = 200$ кВт, $u_1 = 1$, $\cos\varphi_{ном} = 0{,}8$)

$$P_{me\,af} = \frac{e_{af0}u_0}{x_d} = \frac{2{,}54 \cdot 1{,}0}{2{,}23} = 1{,}14.$$

Запас устойчивости

$$k_c = \frac{P_{me\,af} - P_{ном}}{P_{ном}} = \frac{1{,}14 - 0{,}8}{0{,}8} = 0{,}425.$$

Начальный угол $\theta_0 = 37° 10'$. Работа системы происходит в области углов $\theta_0$, значительно отличающихся от предельного. Поэтому совершенно правильно в последующих сериях судовых генераторов приняты пониженные ОКЗ ($\approx 0{,}6$), что соответствует значениям $x_d$ в пределах 2,0—2,20.



Влияние различных факторов на периодическую устойчивость (самораскачивание) наглядно определяется с помощью формулы (2.11.4) для $\Delta_2$, если принять $\Delta_2 = 0$. Тогда

$$\sin(\theta_0 - \beta)\left[\sin(\theta_0 - \beta) + 2\frac{e_{af0}}{u_0}\sin\beta\right] \leqslant$$

$$\leqslant \frac{\sigma^2}{\mu}\frac{\chi}{\rho_f}\left(\frac{e_{af0}}{u_0}\right)^2 \sin\beta \approx \frac{\sigma}{\mu}\frac{\rho\chi}{\rho_f'}\left(\frac{e_{af0}}{u_0}\right)^2.$$

Из анализа данного неравенства следует, что явление самораскачивания более вероятно при большем активном и меньшем индуктивном сопротивлении

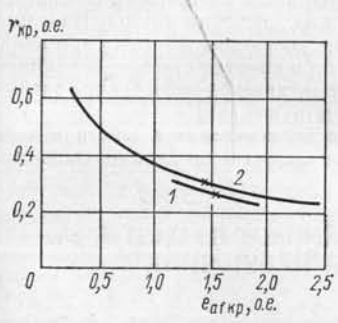



Рис. 2.11.9. К учету влияния поперечной успокоительной обмотки на статическую устойчивость.

*1* — по полному выражению критерия Гурвица; *2* — по приближенной формуле; × — эксперимент на ЭДМ.

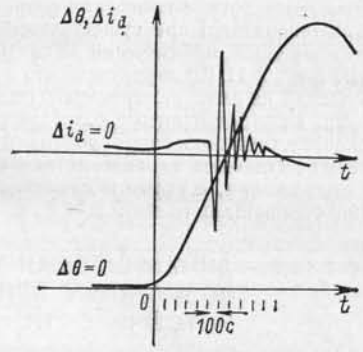



Рис. 2.11.10. К учету высокочастотных колебаний.

статора $\left(\rho = \frac{r}{x}\right)$, большей постоянной времени цепи ротора $T_{d0} = \frac{1}{\rho_f}$, большем уровне возбуждения $e_{af0}$ и большей собственной частоте ротора $\chi$.

Влияние параметров статорной цепи на самораскачивание хорошо характеризуется и приближенным выражением (2.11.5) для $\theta_{кр}$. При малых углах $\theta_0$ в силу относительно больших значений активных сопротивлений цепи статора судового генератора могут быть условия для самораскачивания. Так, для генератора МСС 102-4 $r = r_г + r_д = 0{,}027 + 0{,}02 = 0{,}047$ и $x_q = 1{,}13$. Такие условия с учетом переходных колебаний в цепи статора могут возникнуть при углах в пределах до $\theta_{кр} = (3{,}5 \div 2)\,\mathrm{arctg}\frac{r}{x} = (3{,}5 \div 2)\,\mathrm{arctg}\,0{,}0416 = 8{,}05 \div 4{,}8°$. Это достаточно большой угол $\theta_0$.

Полученный угол существенно возрастает при увеличении уровня возбуждения $e_{af0}$. Поэтому необходимо обеспечить мероприятия по недопущению самораскачивания судовых генераторов. Наиболее эффективным средством в этом отношении является поперечная успокоительная обмотка на роторе генератора.

На рис. 2.11.9 приведены результаты расчета статической устойчивости по самораскачиванию для системы с генератором типа МСК-1850 и эксперимента на электродинамической модели для начального угла $\theta_0 = 0$ при учете поперечной успокоительной обмотки. Кривые показывают, что формулы (2.11.8) и (2.11.9) дают результат, хорошо совпадающий с экспериментальным, а поперечная

обмотка обеспечивает периодическую устойчивость генератора при значительных активных сопротивлениях в цепи статора. В то же время необходимо констатировать, что при повышении $e_{af}$ существенно понижается $r_{кр}$, а следовательно, при наличии других факторов, ведущих к самораскачиванию генератора, этот источник ухудшения периодической устойчивости нельзя упускать из рассмотрения.

Поперечная успокоительная обмотка повышает и допустимый коэффициент $k_i$ регулирования возбуждения по закону нормального токового компаундирования (2.11.16). Так, для неявнополюсного генератора без учета поперечной обмотки $k_{i\,max} = \mu_x = 0{,}897 \cdot 1{,}94 = 1{,}74$ с учетом — $k_{i\,max} = \mu = 1{,}94$. В то же время поперечная успокоительная обмотка расширяет область самовозбуждения, которая для данной машины соответствует неравенству $0{,}20 < x_{лС} < 1{,}94$ при отсутствии демпферной обмотки и $0{,}13 < x_{лС} < 1{,}94$ при наличии этой обмотки.

Высокочастотные колебания ротора (при учете переходных колебаний в цепи статора генератора) при существующих инерционных постоянных генераторных агрегатов в СЭЭС практически не сказываются на движении ротора. На осциллограмме (рис. 2.11.10) зафиксировано изменение координат $\Delta\theta$ и $\Delta i_d$ при наличии возмущений на валу синхронного генератора и в обмотке статора: возникающие в статоре электромагнитные колебания за счет активных потерь быстро затухают, высокочастотные колебания ротора $\Delta\theta$ отсутствуют [11].

Количественные характеристики влияния запаздывания в действии корректора напряжения, а также нелинейности типа «люфт» в регуляторе скорости подробно освещены в главе 2.5.

## § 2.11.7. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ. ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ НАРУШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ

Обеспечение статической устойчивости является необходимым условием существования установившегося режима работы системы. Однако это не гарантирует хорошую работу системы при резких возмущениях в системе.

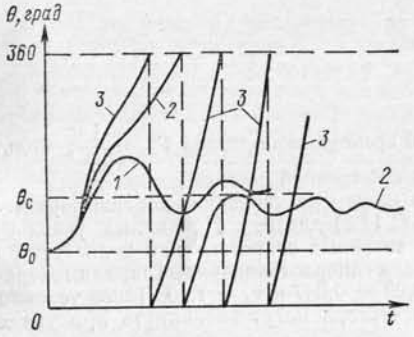



Рис. 2.11.11. Изменение угла θ при сохранении динамической устойчивости по первому полуциклу качаний (*1*), сохранении результирующей устойчивости (*2*) и нарушении результирующей устойчивости (*3*).

В начальном (установившемся) режиме СЭЭС моменты, развиваемые первичными двигателями, уравновешиваются моментами генераторов (нагрузки) $M_{мех\,k0} + M_{k0} = 0$, а вращающие моменты асинхронных двигателей — моментами сопротивления приводов $M_{дk0} + M_{тk0}$. Внезапное резкое нарушение начального режима приводит к нарушению указанного равновесия моментов, качаниям роторов генераторов, резким изменениям токов и напряжения в системе, резким изменениям скольжения асинхронных приводов. Неблагоприятные условия могут вызвать нарушение синхронной работы генераторов, а также затормаживание (опрокидывание) асинхронных приводов. В таких случаях говорят о нарушении динамической устойчивости параллельной работы и динамической устойчивости нагрузки.

В общем случае характер возникающих колебаний генераторов и изменение режима нагрузки зависят от целого ряда факторов и приводят в итоге к сохранению или нарушению динамической устойчивости системы. При этом процесс может иметь следующие особенности:



а) сохранение устойчивости генераторов в первом полуцикле качаний (кривая *1* на рис. 2.11.11) и устойчивости нагрузки, т. е. сохранение устойчивости системы;

б) сохранение синхронной работы генераторов в первом полуцикле качаний и нарушение устойчивости нагрузки (части или всей) с последующим восстановлением или без восстановления режима работы асинхронной нагрузки;

в) нарушение синхронной работы генераторов с последующим ее восстановлением (ресинхронизация генераторов — кривая *2* на рис. 2.11.11) и нарушение устойчивости нагрузки (части или всей) с дальнейшим ее восстановлением или без восстановления;

г) длительный асинхронный режим генераторов, нарушение устойчивости нагрузки — развал системы (кривая *3* на рис. 2.11.11).

Динамическую устойчивость по первому полуциклу качаний генераторов иногда называют синхронной динамической устойчивостью. Динамическую устойчивость с ресинхронизацией генераторов называют результирующей устойчивостью. Динамическая устойчивость нагрузки различается по условиям «опрокидывания» асинхронного привода и по условию самозапуска асинхронной нагрузки.

Указанные качания синхронных генераторов и изменения в режиме работы асинхронных двигателей в СЭЭС могут возникнуть, когда наблюдается внезапный скачок нагрузки (включение нагрузки или части ее, отключение части синхронных генераторов); самосинхронизация и несинхронные включения генераторов; короткое замыкание и его отключение.

Как показывают результаты экспериментов и расчетов, при набросе нагрузки устойчивость генераторной установки в судовых условиях не нарушается. Короткое замыкание и несинхронные включения генераторов, сопровождающиеся ослаблением или прекращением связи между генераторами, могут привести к нарушению динамической устойчивости генераторов и нормальной работы нагрузки.

Особо неблагоприятные условия для динамической устойчивости системы создаются при к. з. с одновременным нарушением нормальной работы регулятора напряжения или скорости.

Общим методом расчета динамической устойчивости системы является численное интегрирование уравнений [9]. При этом рассчитывается сложный переход: при $t < 0$ система находится в некотором установившемся режиме, затем, при $t = 0$, в системе происходит авария (к. з.), в результате которой установившийся режим системы нарушается. Этот аварийный режим в общем случае может как допускать, так и не допускать новое установившееся движение. Например, длительное к. з. вблизи ГРЩ теоретически сопровождается нарушением синхронной работы. После отключения поврежденного участка в момент $t = t_m$ наступает послеаварийный режим и появляется возможность сохранения устойчивости системы. Однако, как и в случае простого перехода, здесь возможно нарушение устойчивости. Поэтому решение вопроса об устойчивости СЭЭС при сложном переходе сводится к интегрированию уравнений [9] в два этапа: а) при действии возмущающей силы (аварийный режим); б) после ее устранения (послеаварийный режим). В результате расчета должно быть определено предельное время отключения к. з. $t_{пред}$.

Задача в полном объеме может решаться либо на ЭВМ, либо на ЦВМ с помощью алгоритмов, приведенных в главе 1.2. При определенных допущениях ее можно решать и на базе упрощенного алгоритма, рассмотренного в § 1.2.7 с последующей реализацией на статической модели или ЦВМ. Если систему удается привести к трем-четырем машинам, можно использовать АВМ в соответствии с принципами, изложенными в § 1.2.5. Наконец, для грубой оценки динамической устойчивости генераторной установки или нагрузки существует ряд методов, справедливых лишь в ограниченных пределах.

Необходимо подчеркнуть, что в настоящее время в связи с повышением требований к качеству электроэнергии расчеты динамической устойчивости должны сопровождаться обязательной оценкой качества электроэнергии в СЭЭС, которую можно осуществить на ЭДМ, ЦВМ или АВМ. Приближенные методы здесь не пригодны.

## § 2.11.8. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ ПО ПЕРВОМУ ПОЛУЦИКЛУ КАЧАНИЙ. МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Определение устойчивости СЭЭС по первому полуциклу качаний независимо от средств расчета (исключение составляет метод при $e'_{dk} = \text{const}$) сводится к вычислению зависимости относительного угла $\theta_{12}$ в функции времени для первого полупериода колебаний роторов генераторов.

Если угол $\theta_{12}$ после достижения некоторого максимального значения $\theta_{12\,\text{пред}}$ (кривая *1* на рис. 2.11.11) начинает уменьшаться, то считают, что система не теряет устойчивости. Если угол значительно возрастает и превосходит некоторое предельное значение, то система теряет так называемую синхронную устойчивость (кривая *2* на рис. 2.11.11). Изменяя время отключения к. з., определяют предельный угол $\theta_{12\,\text{пред}}$ и предельное время $t_{\text{пред}}$, соответствующие переходу от устойчивого поведения системы к неустойчивому.

Одним из распространенных методов расчета синхронной динамической устойчивости является метод, учитывающий изменение ЭДС, который базируется на упрощенном алгоритме (см. § 1.2.7). При расчете по этому методу не учитываются: насыщение магнитопроводов электрических машин, переходные колебания в координатах $i_d$, $i_q$ и $e_{af}$, влияние успокоительных обмоток, трение в подшипниках, потери в железе, потери на возбуждение и трение о воздух, влияние изменения скорости на величину моментов, в ряде случаев изменение момента первичного двигателя, асинхронный момент синхронных машин.

В результате расчета получают время $t_{\text{к. з}(m)}$, при котором устойчивость сохраняется, и время $t_{\text{к. з}(m+1)}$, при котором устойчивость нарушается. Очевидно, что точность расчета $t_{\text{пред}}$ лежит в интервале численного интегрирования $h$. При учете скольжения нагрузки в каждом интервале вводится новое значение эквивалентного сопротивления нагрузки. При учете действий АРВ для каждого интервала определяются значения $u_f$ и вводятся в расчет.

По сравнению с практикой расчетов для береговых систем в расчетах для СЭЭС установлена необходимость дополнительного учета активных сопротивлений цепи статора генератора, переходных колебаний в координатах $i_d$, $i_q$ и $e_{af}$ в первом интервале после ломки режима, введения ненасыщенных параметров.

Учет активных сопротивлений до точки присоединения нагрузки предусмотрен упрощенным алгоритмом расчета переходного процесса (см. § 1.2.7) и никаких трудностей не представляет. Пренебрежение активными сопротивлениями ведет не только к количественным ошибкам, но и к качественным изменениям процесса.

Учет переходных колебаний в цепи статора генератора необходимо производить для первого интервала после к. з. и только для систем, в которых генераторы имеют отличные друг от друга инерционные постоянные.

Поправка сводится к вычислению дополнительного приращения угла $\Delta\theta''$ по формуле

$$\Delta\theta''_k = \frac{m_k}{T_{Jk}x'_{dk}}\left[\frac{A_k^2}{4}\cos\alpha_{0k} - \frac{A_k}{m_k}\cos\alpha_{0k}\right]h, \qquad (2.11.29)$$

где $A_k$ и $\alpha_{0k}$ — определяются из начальных условий

$$\left.\begin{aligned} A_k\cos\alpha_{0}k &= \psi_{dk0};\\ A_k\sin\alpha_{0k} &= \psi_{qk0};\\ m_k &= 1 - \frac{x_{dk}}{x_{qk}}. \end{aligned}\right\} \qquad (2.11.30)$$

При неучете поправки (2.11.29) ошибка в вычислении $\theta_{12}$ может достигать 20—30%, что ведет к переоценке динамической устойчивости. Изложенный метод позволяет оценивать и качество электроэнергии.



Метод расчета синхронной динамической устойчивости, принимающий неизменной ЭДС за переходным индуктивным сопротивлением, применим для оценки предельного времени $t_{\text{пред}}$ при наличии безынерционного регулятора напряжения. В методе не учитываются все электромагнитные переходные процессы. Генераторы во всех режимах (начальном, аварийном, послеаварийном) замещаются по продольной и поперечной осям индуктивными сопротивлениями $x'_{dk}$ и неизменной ЭДС $e'_{dk}$, определенной из начального режима. Это дает возможность вычислять электромагнитные мощности в функции угла $\theta_{12}$ для любого режима при наличии значений параметров схемы системы в этих режимах по формулам

$$\left.\begin{aligned} P_1 &= \frac{e'^2_{d1}}{z'_{11}}\sin\beta'_{11} + \frac{e'_{d1}e'_{d2}}{z'_{12}}\sin(\theta_{12} - \beta'_{12});\\ P_2 &= \frac{e'^2_{d2}}{z'_{22}}\sin\beta'_{22} - \frac{e'_{d1}e'_{d2}}{z'_{12}}\sin(\theta_{12} + \beta'_{12}). \end{aligned}\right\} \qquad (2.11.31)$$

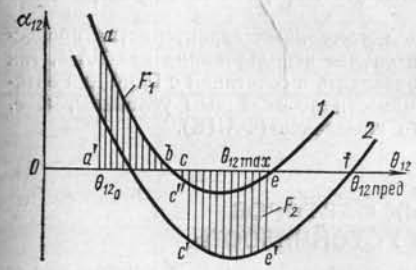



Рис. 2.11.12. Кривые ускорения в аварийном (*1*) и послеаварийном (*2*) режимах.

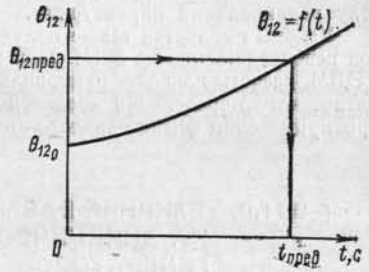



Рис. 2.11.13. К определению предельного времени отключения к. з. по условию сохранения динамической устойчивости генераторов.

Используя же дифференциальные уравнения моментов, определяют избытки мощностей $\Delta P_1$ и $\Delta P_2$ в функции угла $\theta_{12}$ и строят кривую относительного ускорения $\alpha_{12} = \frac{\Delta P_1}{T_{J1}} - \frac{\Delta P_2}{T_{J2}}$ в функции угла $\theta_{12}$ (см. рис.2.11.12). Это позволяет определить максимальный или предельный угол $\theta_{12}$, используя правило площадей:

$$F_1 = \int_{\theta_{120}}^{\theta_{12b}} \alpha_{12}\,d\theta_{12} \equiv A_{\text{уск}} \text{ — работа ускорения;}$$

$$F_2 = \int_{\theta_{12b}}^{\theta_{12e}} \alpha_{12}\,d\theta_{12} \equiv A_{\text{торм}} \text{ — работа торможения;}$$

$F_{2\,\max} = F_{bceb} \equiv A_{\text{торм max}}$ — максимальная площадь торможения.

Если $F_{\text{торм}} < F_{\text{уск}}$, то система теряет устойчивость. При достаточно быстром отключении поврежденного участка сети можно достигнуть значительного увеличения устойчивости.

Для режима работы после отключения к. з. совершенно так же, как и при к. з., можно построить кривую относительного ускорения $\alpha_{12}$ в зависимости от $\theta_{12}$ (кривая *2*, рис. 2.11.12). Предельный угол отключения к. з. определяется равенством площадей ускорения и торможения ($F_{abaa'a}$ должна быть равна $F_{bcfe'c'c''b}$). Таким образом, $\theta_{12\,\text{пред}}$ определяется графически без использования метода численного интегрирования. Для определения предельного времени

отключения к. з. $t_{пред}$ рассчитывают изменение угла $\theta_{12}$ в функции времени методом последовательных интервалов. Поскольку $\alpha_{12}$ известны, определение $\theta_{12} = f(t)$ не представляет затруднений. Получив закон изменения $\theta_{12пред}$ во времени и имея значение $\theta_{12пред}$, определяют предельное время отключения к. з. $t_{пред}$ (рис. 2.11.13).

Указанный метод отличается простотой расчета $\theta_{12пред}$ и $t_{пред}$. Для СЭЭС с самовозбуждающимися генераторами он дает достаточно приемлемые на практике результаты. Естественно, определения изменения напряжения, токов и т. д. этот метод не предусматривает.

Расчеты устойчивости по полным уравнениям Горева—Парка для двух и более генераторов, совмещенные с оценкой динамической устойчивости нагрузки и качества электроэнергии, можно производить с помощью алгоритмов, приведенных в главе 1.2. Необходимым дополнением здесь должен быть блок автоматического поиска $t_{пред}$, максимальной запускаемой асинхронной нагрузки и т. д.

Расчеты устойчивости по полным уравнениям без разветвленной сети с теми же законами, что и на ЦВМ, можно осуществлять на специализированной ЭАМ. Здесь можно получить исключительно большую информацию благодаря удобству варьирования параметрами.

Удобным является также получение количественных характеристик процессов непосредственно на ЭДМ. При этом в случае использования как ЭАМ, так и ЭДМ, расчеты наиболее рационально производить в сочетании с ЦВМ для автоматического определения пределов устойчивости по заданным условиям, т. е. при применении физико-аналого-цифрового комплекса (ФАЦК).

## § 2.11.9. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ГЕНЕРАТОРОВ ПО ПЕРВОМУ ПОЛУЦИКЛУ КАЧАНИЙ

Исследования синхронной динамической устойчивости показывают, что изменение угла $\theta_{12}$ в СЭЭС связано с несимметрией Т-образной схемы системы в параметрах, уровнях возбуждения, начальных режимах и пр. При этом в общем случае не исключено, что ряд факторов, которые при к. з. способствуют рассогласованию роторов машин, после отключения к. з. могут содействовать достижению нового установившегося режима.

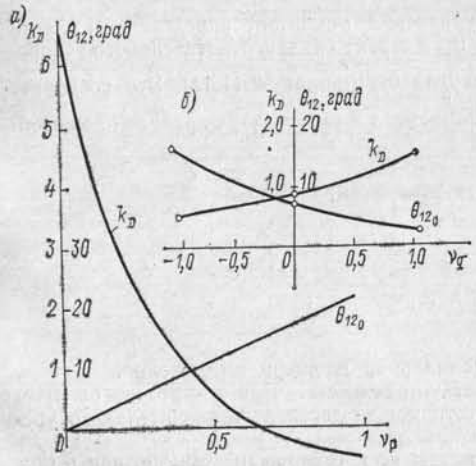



Рис.2.11.14. Зависимости коэффициента $k_D$ от начальных условий системы при неравномерном распределении активной мощности (*а*) и неравномерном распределении реактивной мощности (*б*).

Расчеты на статической модели, АВМ и ЦВМ, эксперименты на ЭДМ позволяют оценить влияние различных факторов на динамическую устойчивость системы. Для иллюстрации указанного влияния приводятся зависимости коэффициента запаса устойчивости от различных факторов $k_D = f(П)$ или непосредственно угла $\theta_{12} = f(П)$, где $k_D = \dfrac{t_{пред} - t_{фид}}{t_{фид}}$; $t_{фид}$ — время срабатывания фидерного автомата, отключающего к. з.

Влияние начального режима характеризуется кривыми на рис. 2.11.14. Для систем малой мощности, где режим к. з. сопровождается торможением всех генераторов или хотя бы одного из них, неблагоприятными наиболее тяжелыми начальными условиями системы являются: наибольшее нарушение пропорционального (по отношению к $P_{k\,ном}$) распределения активной мощности; наибольшая неравномерность распределения реактивной мощности при наименьшем $\cos\varphi_0$ менее загруженного активной мощностью генератора; наименьший $\cos\varphi_0$;

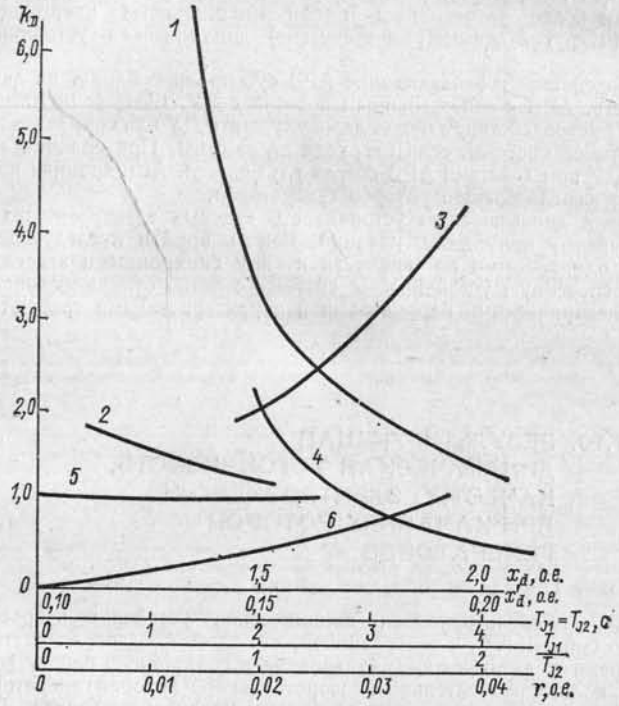



Рис. 2.11.15. Зависимость коэффициента $k_D$ от значений параметров системы.

$1 - k_D = f(r)$ при $\nu_p = 0$; $2 - k_D = f(r)$ при $\nu_p = 0{,}33$;
$3 - k_D = f(T_J)$ при $\nu_p = 0{,}33$; $4 - k_D = f\left(\dfrac{T_{J1}}{T_{J2}}\right)$ при $\nu_p = 0{,}33$;
$5 - k_D = f(x_d)$ при $\nu_p = 0{,}33$; $6 - k_D = f(x'_d)$ при $\nu_p = 0{,}33$.

наибольшая загрузка станции. Эти факторы ведут к большему $\theta_{i20}$ в установившемся режиме и бо́льшим $\alpha_{i2}$ в переходном режиме.

Влияние параметров генераторных агрегатов иллюстрируется кривыми, изображенными на рис. 2.11.15. Неодинаковые активные сопротивления генераторов и инерционные постоянные агрегатов существенно снижают запас динамической устойчивости. Наоборот, увеличение инерционных постоянных $T_{Jk}$ обоих агрегатов и повышение значений $x'_{dk}$ увеличивает коэффициент $k_D$. Индуктивные сопротивления $x_{dk}$ и $x_{qk}$ практически не влияют на динамическую устойчивость.

Анализ влияния начальных условий и параметров на $k_D$ показывает, что наиболее тяжелым режимом является режим системы, когда соблюдаются неравенства $T_{J1} > T_{J2}$; $r_1 \leqslant r_2$; $P_{10} > P_{20}$; $Q_{10} \leqslant Q_{20}$; $x'_{d1} > x'_{d2}$; $x''_{d1} > x''_{d2}$.

В этом случае второй генератор оказывается наиболее податливым к изменению скорости и угол $\theta_{12}$ нарастает с наибольшей интенсивностью.

Режим еще более утяжеляется, если точку к. з. выбрать не сразу после фидерного автомата, а за сопротивлением фидера $r_{фид} = 0{,}03 \div 0{,}09$ (в относительных единицах генератора). В этом случае режим торможения генераторов становится еще более интенсивным и при неодинаковых инерционных постоянных (или другой асимметрии в системе) динамическая устойчивость ухудшается.

Быстродействие и запаздывание АРВ существенно влияет на динамическую устойчивость. АРВ с запаздыванием повышает ДУ. Безынерционный регулятор с большим быстродействием может даже ухудшить ДУ или сохранить ее на уровне нерегулируемой системы, если нагрузка $z_{нг} = \text{const}$. При наличии асинхронной нагрузки ДУ при действии АРВ всегда улучшается. Асинхронная нагрузка способствует рассогласованию роторов генераторов.

Оценивая динамическую устойчивость судовых электроэнергетических систем по первому полуциклу качаний, можно прийти к следующему выводу: системы с одинаковыми по мощности и типу синхронными агрегатами имеют вполне обеспеченную устойчивость; системы с резко отличающимися механическими и электрическими параметрами и характеристиками требуют оценки запаса ДУ.

## § 2.11.10. РЕЗУЛЬТИРУЮЩАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ. КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ КАЧАНИЯХ РОТОРОВ ГЕНЕРАТОРОВ

Результирующая динамическая устойчивость рассчитывается аналогично синхронной, с той разницей, что здесь $t_{пред}$ определяется как наибольшее время к. з. по условию втягивания в синхронную работу после одного, двух и т. д. полных относительных поворотов на 360° роторов генераторов.

Расчет в этом случае ведется по полным уравнениям Горева—Парка. Роль допущений, принятых при расчете синхронной устойчивости, значительно меняется, ошибка получается недопустимой, что иллюстрируется кривыми на рис. 2.11.16.

Рассчитывать результирующую устойчивость практически стало возможно лишь с появлением АВМ и ЦВМ при использовании рекомендаций, данных в § 1.2.5, и алгоритмов, упомянутых в § 1.2.7. Расчеты процессов с ресинхронизацией генераторов показывают, что хотя судовые генераторы, как правило, и синхронизируются (за счет действия регуляторов скорости и напряжения и отсутствия больших реактивностей в цепи), но резкие изменения токов, напряжения, а следовательно, и моментов оказываются недопустимыми. Поэтому при проектировании необходимо обеспечивать устойчивость параллельной работы генераторов по первому полуциклу качаний.

Опасность нарушения динамической устойчивости генераторной установки, даже с последующим восстановлением синхронной работы генераторов, состоит в значительном увеличении продолжительности послеаварийного режима, что немедленно отражается на работе судовых потребителей. Более того, в ряде случаев даже сохранение синхронной устойчивости не обеспечивает необходимого качества электроэнергии. Наглядными примерами являются сложные аварийные ситуации — одновременное к. з. и выход из строя регулятора скорости или напряжения.



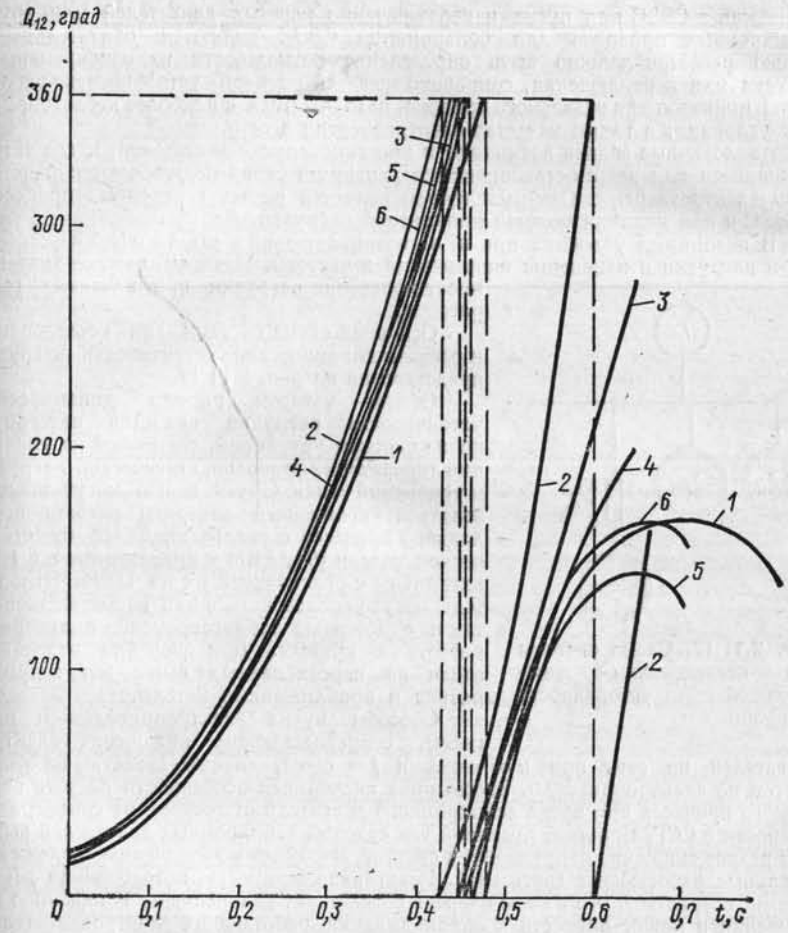



Рис. 2.11.16. Кривые изменения $\theta_{12}$ при ресинхронизации генераторов.
*1* — эксперимент; *2* — упрощенный алгоритм; *3* — введены моменты вместо мощностей; *4* — введен средний асинхронный момент; *5* — учтены переходные колебания; *6* — учтена переменная составляющая асинхронного момента.

## § 2.11.11. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАТОР — КОМПЛЕКСНАЯ НАГРУЗКА (УСТОЙЧИВОСТЬ НАГРУЗКИ)

Характерным для СЭЭС является наличие значительной асинхронной нагрузки. Одновременный пуск мощных короткозамкнутых двигателей, имеющих большие пусковые токи, в условиях СЭЭС приводит к значительному изменению напряжения и частоты сети, а при неблагоприятных условиях может явиться причиной нарушения устойчивости работающих приводов. В последнем случае одновременный пуск двигателей оказывается невозможным.

Специфические условия возникают и при автоматическом переключении нагрузки на другой источник электроэнергии. Поэтому расчеты переходных

процессов в СЭЭС при пуске и переключении мощных двигателей или групп асинхронных приводов для большинства СЭЭС являются обязательными. Целью расчетов должно быть определение возможности их одновременного запуска или переключения, сопровождающееся оценкой устойчивости работающих приводов или отдельного привода, находящегося в наиболее неблагоприятных условиях, а также качества электроэнергии в сети.

Аналогичные задачи возникают и при самозапуске двигателей, когда затормозившиеся или даже остановившиеся двигатели снова подключаются к источнику электроэнергии. Особым случаем является расчет переходных процессов в СЭЭС и при наличии мощной импульсной нагрузки.

В аварийных условиях при к. з. возникает также задача оценки устойчивости нагрузки и изменения напряжения и частоты. Наконец, важное значение имеет поведение нагрузки при качаниях генераторов.

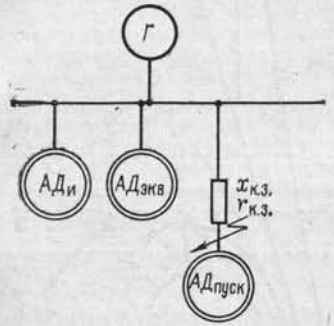



Рис. 2.11.17. Схема системы при исследовании динамической устойчивости нагрузки.

Основная схема системы для исследования и расчета динамической устойчивости нагрузки представлена на рис. 2.11.17.

Общим методом расчета динамической устойчивости нагрузки является интегрирование системы уравнений, состоящей из уравнений генератора, приводов, статической нагрузки и уравнений связи. С этой целью могут использоваться упрощенный алгоритм расчета переходного процесса с реализацией его на статической модели [9], АВМ и приведенные в § 1.2.7 алгоритмы с реализацией их на ЦВМ. Эти методы могут использоваться как непосредственно, так и с помощью заблаговременно полученных расчетных кривых. Для решения отдельных задач из перечисленных выше могут применяться и приближенные методы.

Способы пуска электроприводов и процессы, сопровождающие включение электродвигателей на сеть при $u = \text{const}$ и $f = \text{const}$, хорошо известны из общих курсов по электроприводам. Здесь лишь подчеркнем особенности расчета переходного процесса при пуске асинхронного двигателя от генератора соизмеримой мощности с ССГ. Большой пусковой ток судовых асинхронных двигателей вызывает резкое снижение напряжения в системе. Это ведет к увеличению скольжения остальных работающих двигателей. Реактивная мощность, потребляемая двигателями, возрастает, что в свою очередь содействует дальнейшему понижению напряжения и может привести к опрокидыванию работающих электродвигателей. В том же случае, когда пускаемый двигатель не вызывает нарушения устойчивости нагрузки, из-за существенного понижения напряжения происходит увеличение времени пуска двигателя.

Расчеты переходных процессов при пуске асинхронных двигателей (как и при к. з. в сети) делятся на две группы:

расчеты устойчивости нагрузки с одновременным определением изменения напряжения и частоты;

расчеты, ограничиваемые определением условий сохранения динамической устойчивости нагрузки.

Расчеты первой группы осуществляются главным образом с помощью статистической модели, АВМ и ЦВМ. Однако численное интегрирование при определенных упрощающих допущениях можно произвести и без моделирующих устройств. Расчет является частным случаем упрощенного алгоритма (§ 1.2.7).

Если скольжение эквивалентной нагрузки после соответствующего увеличения при пуске мощного привода или к. з. и его отключения начинает уменьшаться, то устойчивость системы восстанавливается. Если после отключения к. з. или достаточно продолжительного пуска двигателя скольжение эквивалентного двигателя сохраняет тенденцию к увеличению, то динамическая устойчивость оказывается нарушенной и невосстанавливаемой.



В зависимости от задачи исследования расчет ведется для различных условий — при к. з. определяется $t_{пред}$, при пуске электропривода — наибольшая мощность пускаемого привода. Возможна и задача определения мощности неотключаемой нагрузки по условию самозапуска.

Если эквивалентная нагрузка после отключения к. з. или пуска мощного привода восстанавливает свое установившееся скольжение, а исследуемый привод теряет устойчивость, то определяются условия возможности восстановления устойчивости исследуемого привода. Как правило, при сохранении устойчивости эквивалентной нагрузки устойчивость даже самых мощных судовых приводов либо не нарушается, либо восстанавливается. В таких расчетах наибольший интерес приобретает время восстановления нормального режима указанных приводов.

В процессе всех этих расчетов определяются интересующие проектантов токи и напряжения в узловых точках.

Для оценки устойчивости регулируемой системы при пуске асинхронного привода и к. з. пренебрегают переходными электромагнитными процессами в генераторе. Такие допущения возможны, если в качестве системы автоматического возбуждения используются ССГ.

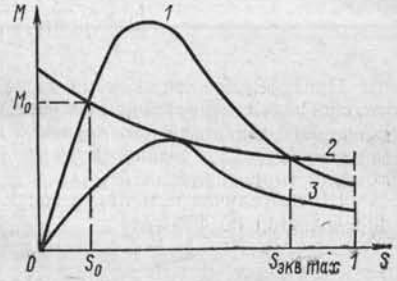



Рис. 2.11.18. К использованию приближенных методов расчета динамической устойчивости нагрузки.
*1* — внешняя характеристика момента; *2* — момент сопротивления на валу электропривода; *3* — внешняя характеристика момента при включении затормож нного асинхронного двигателя

При пуске мощного привода или к. з. момент сопротивления эквивалентного двигателя $M_{т.\,экв}$ (кривая *2* на рис. 2.11.18) оказывается больше его вращающего момента (кривая *3*), и эквивалентный двигатель тормозится, увеличивая скольжение $s_{экв}$. Ненагруженный пускаемый двигатель при достижении установившегося режима $s_{пуск.\,х.\,х}$ незначительно деформирует характеристику системы $M_{экв}$ (кривая *1*). Поэтому с некоторым приближением можно считать скольжение $s_{экв\,max}$, соответствующее пересечению кривых $M_{экв}$ и $M_{т.\,экв}$, предельным. Если эквивалентный привод достигает скольжения $s_{экв\,max}$ раньше, чем пускаемый двигатель скольжения $s_{пуск.\,х.\,х}$, то устойчивость системы нарушается и пуск не может быть осуществлен. Аналогичное явление наблюдается при к. з., если $t_{к.\,з}$ оказывается больше времени достижения эквивалентным двигателем $s_{экв\,max}$.

Таким образом, критерием устойчивости являются неравенства

$$t_{пуск} < t_{s_{max}}; \tag{2.11.32}$$

$$t_{к.\,з} < t_{s_{max}}. \tag{2.11.33}$$

Время $t_{пуск}$ и $t_{s_{max}}$ получают путем интегрирования соответствующих дифференциальных уравнений моментов

$$t_{пуск} = T_{J пуск} \int_{s_{х.\,х}}^{1} \frac{ds}{M_{пуск}}; \tag{2.11.34}$$

$$t_{s_{max}} = T_{J экв} \int_{s_{max}}^{s_0} \frac{ds}{M_{экв} + M_{т.\,экв}}. \tag{2.11.35}$$

При к. з. вблизи шин ГРЩ

$$t_{к.\,з} \leqslant T_{J\,экв} \int_{s_{max}}^{s_0} \frac{ds}{M_{т.\,экв}}. \qquad (2.11.36)$$

Если $M_{т.\,экв} = \text{const} = M_{т0}$, то получаем простейшую зависимость

$$t_{к.\,з} \leqslant \frac{T_{J\,экв}}{M_{т.\,экв}} (s_{экв0} - s_{экв\,max}). \qquad (2.11.37)$$

При пренебрежении всеми переходными процессами в системе принимается, что динамическая устойчивость системы нарушается, если при включении заторможенного двигателя (см. кривые *2* и *3* на рис. 2.11.18) максимальное значение момента $M_{экв\,max}$, развиваемого эквивалентным двигателем, оказывается меньше момента сопротивления $M_{т.\,экв}$.

В этом случае при $M_т = \text{const}$ предельная мощность пускового двигателя определяется по формуле

$$P_{пред} = \frac{\eta_{ном} \cos \varphi_{ном}}{k_i x_{к.\,пуск}} P_{б}, \qquad (2.11.38)$$

где $x_{к.\,пуск} = \frac{x_{м.\,экв} x_0}{x_{м.\,экв} - x_0}$ — предельное значение сопротивления $x_к = x_1 + x_2$ пускаемого двигателя; $x_{м.\,экв}$ — сопротивление намагничивания эквивалентного двигателя; $x_0$ — эквивалентное сопротивление цепи намагничивания системы, равное

$$x_0 = \frac{M_т x'_d (x'_d + 2x_к)}{e'^2_d - 2M_т (x'_d + 2x_к)} \pm$$

$$\pm \sqrt{\frac{M_т^2 x'^2_d (x'_d + 2x_к)^2}{\left[e'^2_d - 2M_т (x'_d + x_к)\right]^2} + \frac{2M_т x'^2_d x_к}{\left[e'^2_d - 2M_т (x'_d + x_к)\right]}}. \qquad (2.11.39)$$

Приведенный метод дает грубую оценку динамической устойчивости нагрузки. Однако простота расчета и погрешность в сторону недооценки динамической устойчивости обусловливают возможность применения его для практических расчетов.

Рассмотренные методы предполагали наличие одного генератора в системе или нескольких без учета качаний. Качания роторов генераторов при набросе нагрузки незначительны, и их можно не учитывать. В случае же к. з. в системах, имеющих генераторные агрегаты с неодинаковыми электромеханическими параметрами, качания роторов генераторов могут в определенной степени ухудшить условия восстановления нормальной работы асинхронных приводов. Это связано с тем, что при качаниях генераторов, несмотря на быстродействующее регулирование напряжения, последнее после отключения к. з. восстанавливается не сразу, а постепенно вслед за изменением угла $\theta_{12}$.

Основываясь на данных положениях, можно сделать следующий вывод: для судовых условий целесообразно проектировать систему так, чтобы не только не допускать нарушения динамической устойчивости генераторов по первому полуциклу качаний, но и максимально уменьшить возможность качаний генераторов. Последнее обеспечивает повышение устойчивости нагрузки и качества электроэнергии в СЭЭС.



# Глава 2.12. РАСЧЕТ КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ, ЧАСТОТЫ, РОТОРОВ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СЭЭС

## § 2.12.1. РАСЧЕТ НАЧАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ

Для расчета переходных режимов в электроустановках с синхронными генераторами наряду с конструктивными параметрами электроустановки необходимо знать параметры предварительного статического режима. Последние рассчитываются при помощи зависимостей, получаемых из векторных диаграмм.

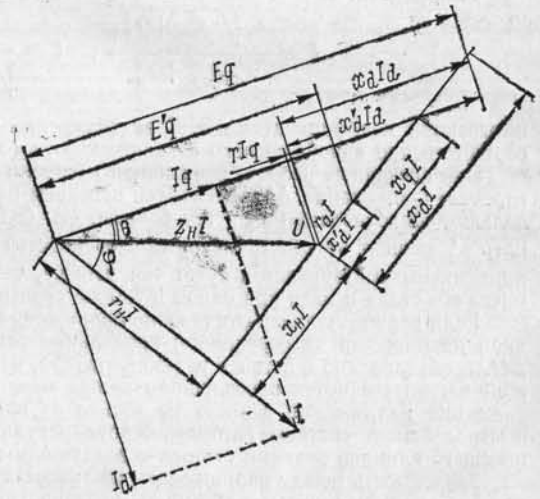



Рис. 2.12.1. Векторная диаграмма синхронного явнополюсного генератора типа МСС 375-500А. $U = 231$ В; $I = 542$ А; $x_d = 0{,}945$; $x_q = 0{,}61$; $x'_d = 0{,}21$; $r_a = 0{,}012$; $z_н = 1$; $E_q = 1{,}7$; $E'_q = 1{,}13$; $\theta = 19{,}3$ эл. град

Полная векторная диаграмма явнополюсного синхронного генератора представлена на рис. 2.12.1. Диаграмма построена для генератора при нагрузке 300 кВт, напряжении 400 В, коэффициенте мощности $\cos \varphi = 0{,}8$, частоте вращения 500 об/мин в параметрах, приведенных к системе относительных единиц.

На векторной диаграмме обозначено:

$U$, $I$ — соответственно напряжение и ток фазы статора;

$E_q$, $E'_q$ — ЭДС за продольным синхронным и продольным переходным индуктивными сопротивлениями;

$x_d$, $x'_d$, $x_q$ — продольное синхронное, продольное переходное и поперечное синхронное индуктивные сопротивления;

$z_н$, $r_н$, $x_н$, $r_a$ — полное, активное, реактивное сопротивления нагрузки и активное сопротивление обмотки статора;

$\theta$, $\varphi$ — угол отклонения продольной оси ротора от оси магнитного поля статора (угол вылета ротора) и угол, определяющий коэффициент мощности нагрузки.

Из векторной диаграммы явнополюсной машины следует:

$$\left.\begin{aligned} E_q &= U\cos\theta + x_d I_d + r_a I_q; \\ \operatorname{tg}\theta &= \frac{x_q \cos\varphi - r_a \sin\varphi}{z_н + r_a\cos\varphi + x_q \sin\varphi}. \end{aligned}\right\} \qquad (2.12.1)$$

Эти выражения позволяют найти зависимость напряжения явнополюсного генератора от величины и вида нагрузки при данной величине возбуждения:

$$U = \frac{z_н\sqrt{x_{qн}^2 + r_{aн}^2}}{x_{dн}x_{qн} + r_{aн}^2} E_q = \xi E_q. \qquad (2.12.2)$$

Аналогично для неявнополюсного генератора:

$$U = \frac{z_н}{\sqrt{x_{dн}^2 + r_{aн}^2}} E_q = \zeta E_q. \qquad (2.12.3)$$

В формулах (2.12.2) и (2.12.3) $x_{dн} = x_d + x_н$; $x_{qн} = x_q + x_н$; $r_{aн} = r_a + r_н$. Коэффициенты

$$\xi = \frac{z_н\sqrt{x_{qн}^2 + r_{aн}^2}}{x_{dн}x_{qн} + r_{aн}^2}; \quad \zeta = \frac{z_н}{\sqrt{x_{dн}^2 + r_{aн}^2}} \qquad (2.12.4)$$

называются коэффициентами ЭДС за синхронным продольным сопротивлением соответственно явнополюсного и неявнополюсного генератора.

При внезапном набросе реактивной нагрузки первоначальное отклонение — «провал» напряжения $\Delta U$ обусловлен падением напряжения на переходном продольном сопротивлении $x'_d$ и тем больше, чем больше это сопротивление. Параметр $x'_d$ зависит от конструктивных особенностей генератора, свойств и качеств применяемых материалов и будет тем меньше, чем больше размеры генератора, масса его стали и меди при одном и том же значении мощности.

Если первоначальное отклонение напряжения генератора обусловлено падением напряжения на переходном продольном сопротивлении, то максимальное $\Delta U_{max}$ обусловлено действием реакции статора, которая уменьшает результирующий магнитный поток в воздушном зазоре машины. Величина и длительность снижения напряжения зависят не только от параметров генератора, но и от быстродействия системы автоматического регулирования возбуждения, уменьшающего влияние реакции статора в воздушном зазоре машины.

Зависимость между напряжением на зажимах генератора и его ЭДС за переходным сопротивлением может быть найдена также из векторной диаграммы:

для явнополюсного генератора

$$U = \frac{z_н\sqrt{x_{qн}^2 + r_{aн}^2}}{x'_{dн}x_{qн} + r_{aн}^2} E'_q = \xi' E'_q; \qquad (2.12.5)$$

для неявнополюсного генератора

$$U = \frac{z_н\sqrt{x_{dн}^2 + r_{aн}^2}}{x'_{dн}x_{dн} + r_{aн}^2} E'_q = \zeta' E'_q. \qquad (2.12.6)$$

Здесь

$$\xi' = \frac{z_н\sqrt{x_{qн}^2 + r_{aн}^2}}{x'_{dн}x_{qн} + r_{aн}^2}; \quad \zeta' = \frac{z_н\sqrt{x_{dн}^2 + r_{aн}^2}}{x'_{dн}x_{dн} + r_{aн}^2} \qquad (2.12.7)$$



— коэффициенты ЭДС за переходным сопротивлением соответственно для явнополюсного и неявнополюсного генератора.

Мощность электроприводов вспомогательных механизмов судна и силовой установки соизмерима с мощностью генератора, поэтому при запуске электроприводов происходит резкое изменение режима генераторов, сопровождающееся быстрым снижением напряжения и частоты. Мощность отдельных электродвигателей обычно составляет 20—25% мощности генераторов электростанций. На малых судах эта величина может достигать 40—50%. При запуске таких электродвигателей в судовой сети резко и значительно изменяется реактивный ток, значение которого определяется их пусковыми параметрами.

Для уменьшения пусковых токов, а следовательно, и снижения колебаний напряжения могут быть использованы специальные способы пуска асинхронных короткозамкнутых электродвигателей: с активным сопротивлением в цепи статора, с переключением обмоток статора электродвигателя со звезды на треугольник с помощью автотрансформатора (реактора) и с применением конденсаторных батарей. Все эти способы уменьшают потребляемый электродвигателем ток при пуске, но требуют применения специальной коммутационной аппаратуры. В табл. 2.12.1 помещены сравнительные данные для различных способов пуска электродвигателя [37].

*Таблица 2.12.1*

**Показатели, характеризующие пуск различными способами электродвигателя мощностью 50 кВт от дизель-генератора мощностью 100 кВт**

| Показатели переходного процесса | Способ пуска | | | |
|---|---|---|---|---|
| | прямой | с сопротивлением в цепи статора | переключением обмоток со звезды на треугольник | с опережением перевозбуждения генератора |
| Изменение напряжения в момент $t = 0$, % | 28 | 12 | 10 | 23,5 |
| Максимальное изменение напряжения, % | 43 | 28,5 (34,5) | 19,5 (22,8) | 35,7 |
| Время наступления максимального изменения напряжения, с | 0,27 | 0,28 (0,12) | 0,175 (0,1) | 0,18 |
| Длительность изменения напряжения до номинального значения, с | 1,1 | 1,55 | 0,8 (0,4) | 0,77 |
| Максимальное уменьшение частоты, % | 10 | 14 | 8 | 13,2 |
| Время наступления максимального уменьшения частоты, с | 0,975 | 0,9 | 0,7 | 0,63 |
| Длительность изменения частоты до номинального значения, с | 2,1 | 1,85 | 2,5 | 1,5 |
| Длительность разбега электродвигателя, с | 1 | 1,7 | 2 (0,13) | 0,7 |

Примечание. В скобках указаны значения соответствующих величин с момента шунтирования пускового сопротивления или включения обмоток электродвигателя по схеме «треугольник».

Пусковой ток асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, как известно, равен 5—7-кратному значению номинального тока, а коэффициент

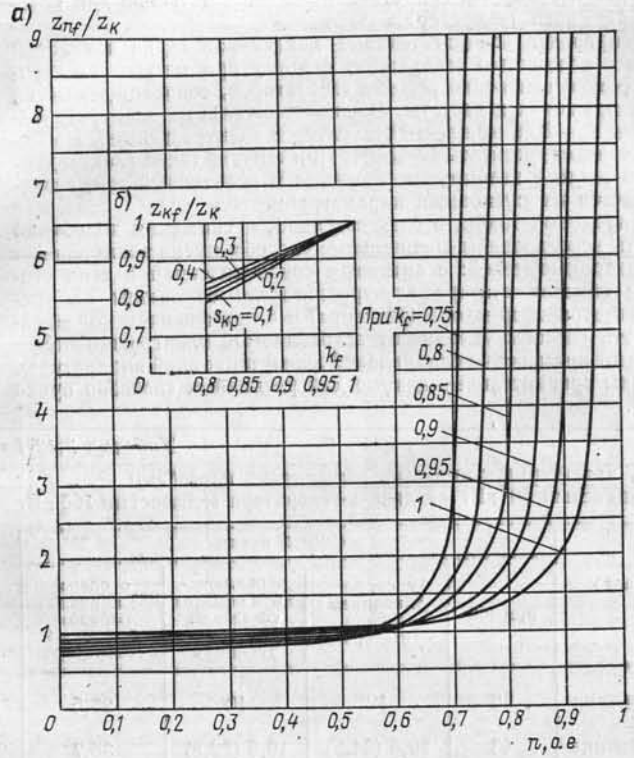



Рис. 2.12.2. Зависимости полного сопротивления асинхронного электродвигателя (с критическим скольжением 0,2) от его частоты вращения при различной частоте питающей сети (*а*) и сопротивления короткого замыкания от частоты сети при различном критическом скольжении (*б*).

мощности при пуске уменьшается до 0,4—0,45. Активная и реактивная мощность, которую потребляет электродвигатель от сети в период пуска, определяется его полным сопротивлением $z_э$ и пусковым значением $\cos\varphi_{пуск}$. Полное сопротивление электродвигателя рассчитывается по формуле

$$\frac{z(n, f)}{z_{к.з}} = \frac{f}{f-n}\sqrt{\frac{(f-n)^2+s_{кр}^2}{1+s_{кр}^2}}, \qquad (2.12.8)$$

где $n$, $f$ — соответственно частота вращения электродвигателя и частота сети, о. е.; $s_{кр}$ — критическое скольжение, о. е.; $z_{к.з} = x_{к.з}\sqrt{1+s_{кр}^2}$ — полное сопротивление электродвигателя при заторможенном роторе (сопротивление короткого замыкания).

На рис. 2.12.2 построены зависимости по формуле (2.12.8). Видно, что полное сопротивление электродвигателя при пуске до момента достиже-

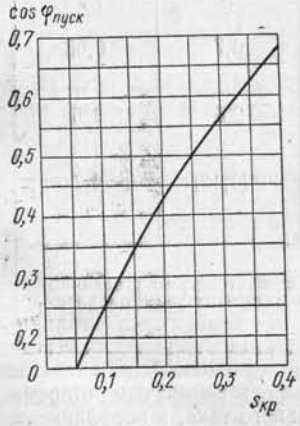



Рис. 2.12.3. Зависимость пускового значения коэффициента мощности короткозамкнутого асинхронного электродвигателя от критического скольжения.



ния им критической частоты вращения, соответствующей частоте сети, сохраняется постоянным, а затем резко возрастает.

Коэффициент мощности электродвигателя при изменении его частоты вращения и частоты сети определяется формулой

$$\cos\varphi_f = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{f(f-n)}{s_{кр}(2f-n)}}}. \qquad (2.12.9)$$

Можно считать, что составляющие полного сопротивления электродвигателя в течение переходного процесса остаются постоянными; коэффициент мощности определяется по рис. 2.12.3.

## § 2.12.2. РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ НА ШИНАХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПРИ ПУСКАХ И САМОЗАПУСКАХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Расчет указанных параметров электроэнергии должен производиться на основе дифференциальных уравнений переходного процесса синхронного агрегата, описываемого системой уравнений Горева—Парка, уравнений для энергетического двигателя, автоматических регуляторов частоты, напряжения, а также для пускаемого электродвигателя и ранее включенной нагрузки. Составленная общая система уравнений может быть решена при помощи вычислительных машин, и достоверность результата будет зависеть от правильности исходных данных. Однако для приближенных расчетов, используемых при эскизном проектировании и предварительной проработке вариантов электроустановки, состав которой однозначно не определен, задача может быть упрощена. Решающее влияние на переходный процесс генератора при резком и значительном изменении реактивной нагрузки, когда магнитные потоки в машине претерпевают значительные изменения, оказывает обмотка ротора генератора.

Демпферная обмотка не оказывает существенного влияния на процесс, и потому влиянием ее в первом приближении можно пренебречь.

Включение электродвигателя на генератор в период разгона его до частоты вращения, равной примерно 80% номинальной, — это включение на зажимы генератора нагрузки, эквивалентной приведенному сопротивлению короткого замыкания электродвигателя:

$$z_э = \frac{\eta_э \cos\varphi_э P_г}{k_i \cos\varphi_г P_э}\left(\frac{U_э}{U_г}\right)^2, \qquad (2.12.10)$$

где $\eta_э$ — КПД электродвигателя; $k_i$ — кратность пускового тока; $\cos\varphi_г$, $\cos\varphi_э$ — соответственно номинальный коэффициент мощности генератора и пусковой коэффициент мощности электродвигателя; $U_г$, $U_э$ — номинальные напряжения на зажимах генератора и электродвигателя; $P_г$, $P_э$ — номинальные активные мощности на зажимах генератора и валу электродвигателя.

При этих условиях для постоянной величины включаемой или отключаемой нагрузки и постоянной частоты вращения уравнение электромагнитного переходного процесса генератора, определяющее изменение его напряжения во времени, на основе уравнений Горева—Парка записывается так:

$$\dot{U} + k_2 U = k_1 [U_в(t) - U_{в.нас}], \qquad (2.12.11)$$

где $U_в(t)$ — зависимость изменения возбуждения генератора под действием автоматической системы регулирования напряжения с начала нарушения режима генератора; $U_{в.нас}$ — часть напряжения возбуждения, необходимая для «преодоления» насыщения стали; коэффициенты $k_1$ и $k_2$:

для явнополюсного генератора

$$k_1 = \frac{\xi'}{T_{d0}}; \quad k_2 = \frac{\xi'}{\xi T_{d0}} = \frac{1}{T'_d}; \tag{2.12.12а}$$

для неявнополюсного генератора

$$k_1 = \frac{\zeta'}{T_{d0}}; \quad k_2 = \frac{\zeta'}{\zeta T_{d0}} = \frac{1}{T'_d}. \tag{2.12.12б}$$

Влияние насыщения следует учитывать при расчете режима отключения индуктивной нагрузки (или включения емкостной). При расчете включения индуктивной нагрузки — пуска асинхронного электродвигателя — им можно пренебречь.

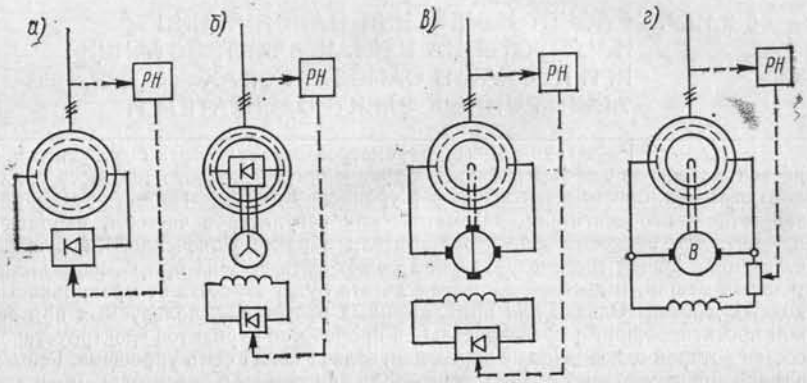



Рис. 2.12.4. Принципиальные схемы систем возбуждения и автоматического регулирования напряжения синхронных генераторов: *а* — система самовозбуждения и саморегулирования; *б* — система возбуждения бесщеточного генератора; *в* — система возбуждения с электромашинным возбудителем (или усилителем) и электромагнитным регулятором; *г* — система возбуждения с электромашинным возбудителем и электромеханическим регулятором.

В первый момент нарушения режима напряжение и ток в цепи статора соответственно явнополюсного и неявнополюсного генераторов определяются так:

$$U_0 = \xi' E'_q; \quad U_0 = \zeta' E'_q; \quad I_0 = \frac{\xi'}{z_н} E'_q; \quad I_0 = \frac{\zeta'}{z_н} E'_q, \tag{2.12.13}$$

где $E'_q = 1$, если нагрузка включалась на ненагруженный генератор, и $E'_q = \frac{1}{\xi'_п}$ или $E'_q = \frac{1}{\zeta'_п}$, если генератор нес предварительную нагрузку и его напряжение поддерживалось номинальным; коэффициенты $\xi'_п$, $\zeta'_п$ вычисляются по формулам (2.12.7) для параметров предварительной нагрузки.

Если в первый момент нарушения режима изменение напряжения и тока определяется параметрами нагрузки и генератора, то их последующее изменение зависит от тока возбуждения генератора и его частоты вращения.

Применяемые в настоящее время для судовых генераторов системы возбуждения, схемы которых приведены на рис. 2.12.4, можно разделить по принципу сочетания входящих в них элементов на три вида:

система прямого компаундирования (без машинного возбуждения), конструктивное исполнение которой может быть различным;



система возбуждения, состоящая из электромашинного возбудителя и автоматического электромагнитного регулятора напряжения *РН*, с выхода которого сигнал управления подается в цепь возбуждения возбудителя; электромашинным возбудителем может быть и обычный быстродействующий возбудитель, и возбудитель-регулятор (ррототрол, магникон), и возбудитель бесщеточного генератора;

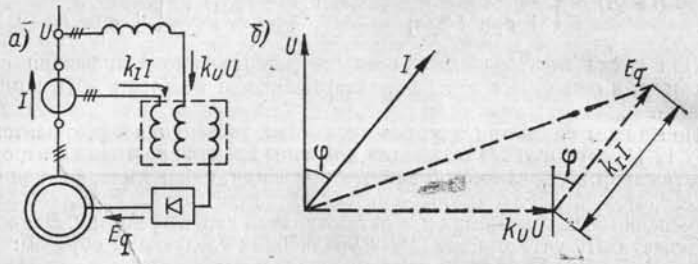



Рис. 2.12.5. Принципиальная схема системы саморегулирования (*а*) и ее векторная диаграмма (*б*).

система возбуждения, состоящая из электромашинного возбудителя и электромеханического регулятора напряжения, который воздействует на переменное сопротивление в цепи возбуждения возбудителя.

Переходный процесс в этих трех системах возбуждения с учетом переходного процесса генератора в общем случае описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений.

Однако для практических расчетов действие системы возбуждения может быть определено вольт-секундной характеристикой $U_в(t)$, входящей в уравнение (2.12.11). Напряжение возбуждения генератора с прямым компаундированием определяется из векторной диаграммы, приведенной на рис. 2.12.5:

$$U_в(t) = U_{в0} \cdot 1(t) + U_{вi} \cdot 1(t) = U_{в\,max} \cdot 1(t), \tag{2.12.14}$$

где $U_{в0}$ — напряжение возбуждения генератора до нарушения режима:

$$U_{в0} = \frac{1}{\xi_п} \text{ и } U_{в0} = \frac{1}{\zeta_п}$$

соответственно для явно- и неявнополюсной машины; $U_{в\,max}$ — максимальное возбуждение генератора с момента включения нагрузки:

$$U_{в\,max} = \frac{1}{\xi_{max}} \text{ и } U_{в\,max} = \frac{1}{\zeta_{max}}$$

соответственно для явно- и неявнополюсной машины.

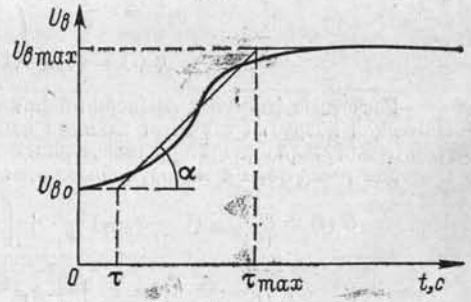



Рис. 2.12.6. Вольт-секундная характеристика для генератора с машинным возбуждением.

Вольт-секундная характеристика остальных систем возбуждения, приведенная на рис. 2.12.6, описывается зависимостью [37]:

$$U_в(t) = U_{в0} \cdot 1(t) + k(t-\tau) \cdot 1(t-\tau) - k(t-\tau_{max}) \cdot 1(t-\tau_{max}), \tag{2.12.15}$$

где $k$ — угловой коэффициент вольт-секундной характеристики, или коэффициент нарастания напряжения возбуждения генератора ($\operatorname{tg}\alpha$); $\tau$ — запаздывание в действии регулятора напряжения (если таковое имеется), или запаздывание в

нарастании возбуждения; $\tau_{max}$ — время наступления максимального (потолочного) возбуждения генератора с момента нарушения его режима.

Здесь единичные функции принимают следующие значения:

$$1(t-\tau)=\begin{cases}0 \text{ при } 0<t\leqslant\tau;\\ 1 \text{ при } t>\tau;\end{cases}\qquad 1(t-\tau_{max})=\begin{cases}0 \text{ при } 0<t\leqslant\tau_{max}\\ 1 \text{ при } t>\tau_{max}.\end{cases}$$

При пуске электродвигателя от генератора частота вращения последнего снижается, и ожидаемое изменение частоты может достигать 20% номинального значения.

При таком снижении частоты численные значения коэффициентов уравнения (2.12.11) остаются без изменения в течение времени разгона электродвигателя до достижения им критической частоты вращения, однако напряжение возбуждения генератора будет заметно изменяться. Влияние частоты вращения отражается на изменении ЭДС генератора и вольт-секундной характеристики. Это обстоятельство может быть учтено в исходных уравнениях следующим образом:

для генератора с прямым компаундированием:

$$\dot{U}+k_2U=k_1[U_в(t)-U_{в\,max}\,\varphi(t)];$$

для генератора с машинным возбуждением:

$$\dot{U}+k_2U=k_1[U_в(t)-(1+k_в)\,U_{в\,max}\varphi(t)],$$

где $k_в=\dfrac{k_c}{U_{в\,max}}=\dfrac{1}{U_{в\,max}}\operatorname{tg}\alpha$ — степень изменения максимального напряжения возбудителя при снижении частоты вращения.

В этих уравнениях изменение частоты вращения энергетического двигателя учитывается зависимостью [37]

$$\varphi(t)=\varphi_{max}\left(1-e^{-\frac{t}{T_\psi}}\right).$$

Расчетные формулы изменения напряжения генератора при включении динамической нагрузки с учетом влияния изменения частоты вращения энергетического двигателя генератора имеют вид:

для генератора с компаундированием

$$U(t)=U_{в\,max}(1-\varphi_{max})\frac{k_1}{k_2}+\left[U_0-U_{в\,max}(1-\varphi_{max})\frac{k_1}{k_2}+\right.$$

$$\left.+U_{в\,max}\frac{k_1\varphi_{max}}{k_\psi-k_2}\right]e^{-k_2t}-U_{в\,max}\frac{k_1\varphi_{max}}{k_\psi-k_2}e^{-k_\psi t};\qquad (2.12.16)$$

для генератора с бесщеточным или машинным возбуждением

$$U(t)=(U_{в0}-k_{max}-k\tau)\frac{k_1}{k_2}+k\frac{k_1}{k_2}t+$$

$$+\left[U_0-\left(U_{в0}-k_{max}-\frac{k}{k_2}e^{k_2t}\right)\frac{k_1}{k_2}+\frac{k_1k_{max}}{k_\psi-k_2}\right]e^{-k_2t}-$$

$$-\frac{k_1k_{max}}{k_\psi-k_2}e^{-k_\psi t}-k\frac{k_1}{k_2}\left[\frac{1}{k_2}e^{-k_2(t-\tau_{max})\cdot1(t-\tau_{max})}+\right.$$

$$\left.+(t-\tau_{max})\cdot1(t-\tau_{max})\right]\text{ для } t>\tau,\qquad (2.12.17)$$

где $k_{max}=(1+k_в)\,U_{в\,max}\varphi_{max}$; $k_\psi=T_\psi^{-1}$.



Особенности расчета для случаев пуска электродвигателя различными способами следующие:

а) при пуске прямым включением эквивалентное сопротивление электродвигателя рассчитывается по формуле (2.12.10);

б) при пуске с активным сопротивлением в цепи статора $r_п$ полное сопротивление включаемой динамической нагрузки рассчитывается по формулам

$$\left.\begin{aligned}&\bar{z}_н=\bar{z}_э+\bar{z}_п=r_э+r_п+jx_э=r_н+jx_э;\\ &z_н=\sqrt{r_н^2+x_э^2};\ \cos\varphi_п\equiv\cos\varphi_н=\frac{r_н}{z_н};\end{aligned}\right\}\qquad (2.12.18)$$

в) при пуске электродвигателя способом переключения его обмоток со звезды на треугольник эквивалентное сопротивление рассчитывается по формуле (2.12.10) с подстановкой значения напряжения $U_э=\sqrt{3}U_{э.\,ном}$;

г) при пуске электродвигателя с помощью автотрансформатора или реактора в цепи статора эквивалентное сопротивление включаемой динамической нагрузки рассчитывается по формулам

$$\left.\begin{aligned}&\bar{z}_н=\bar{z}_э+\bar{z}_{ат}=r_э+j(x_э+x_{ат})=r_э+jx_н;\\ &z_н=\sqrt{r_э^2+x_н^2};\quad\cos\varphi_п\equiv\cos\varphi_н=\frac{r_э}{z_н}.\end{aligned}\right\}\qquad (2.12.19)$$

Здесь приведенное сопротивление фазы автотрансформатора $x_{ат}$ равно

$$x_{ат}=\frac{U_к(\%)}{100}\frac{U_{ф.т}}{I_{ф.т}}\frac{I_{ф.г}}{U_{ф.г}},$$

где $U_к$ — напряжение короткого замыкания автотрансформатора; $U_{ф.т}$, $I_{ф.т}$, $U_{ф.г}$, $I_{ф.г}$ — фазные значения соответственно напряжения и тока автотрансформатора и генератора. Первоначальное снижение напряжения $\Delta U_0=1-U_0$ вычисляется по формулам (2.12.13).

Максимальное снижение напряжения генератора в период переходного процесса определяется из равенства $\dot{U}(t)=0$.

Для генератора с прямым компаундированием

$$t_{min}=\frac{1}{k_\psi-k_2}\ln\frac{bk_\psi}{ak_2}.\qquad (2.12.20)$$

Здесь и ниже $a$ — коэффициент в расчетной формуле изменения напряжения (2.12.16) перед $e^{-k_2t}$; $b$ — коэффициент перед $e^{-k_\psi t}$.

Как следует из (2.12.16), у генератора при снижении частоты вращения может оказаться, что первоначальный провал напряжения не будет представлять собой максимальный провал, как это имеет место при постоянной частоте вращения (в случае включения на генератор реактивной нагрузки). Из формулы (2.12.20) можно установить, что при условии

$$\Delta U_0\leqslant\varphi_{max}\frac{k_\psi}{k_\psi-k_2}\qquad (2.12.21)$$

максимальный провал напряжения генератора будет больше первоначального.

Для генератора с машинным возбуждением можно получить два выражения: первое для случая, когда максимальное уменьшение напряжения генератора наступает раньше, чем напряжение его возбуждения достигнет потолочного значения, т. е. когда $t_{min}<\tau_{max}$, и второе, когда максимальное уменьшение напряжения имеет место после достижения напряжения возбуждения потолочного значения, т. е. когда $t_{min}>\tau_{max}$.

В первом случае выражение, из которого можно определить время наступления максимального провала напряжения, имеет вид

$$K_1 e^{-k_2 t_{\min}} = 1 + K_2 e^{-k_\psi t_{\min}}, \qquad (2.12.22)$$

где $K_1 = \frac{ak_2^2}{kk_1}$; $K_2 = \frac{bk_\psi k_2}{kk_1}$.

Найти $t_{\min}$ из этого трансцендентного уравнения можно графическим путем, построив две экспоненциальные кривые, как показано на рис. 2.12.7.

Для второго случая время наступления максимального провала напряжения выражается в явном виде

$$t_{\min} = \frac{1}{k_\psi - k_2} \ln \frac{K_2}{K_1 - e^{k_2 \tau_{\max}}}. \qquad (2.12.23)$$

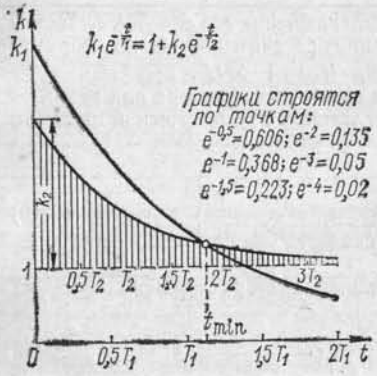



Рис. 2.12.7. Графическое построение для определения времени наступления максимального снижения напряжения.

Если установлено, что изменение частоты вращения генератора в переходном процессе не превышает 5%, то влиянием этого фактора на изменение его напряжения можно пренебречь. Расчетные формулы для данного случая можно получить из выражений (2.12.16), (2.12.17), полагая в них $\varphi_{\max} = 0$.

Погрешность расчета изменения частоты (для первых трех случаев пуска электродвигателя) не превышает 3%, изменения напряжения — 5—7%. Погрешность в определении первоначального и минимального напряжений генератора не превышает 4%. Расчетное время наступления максимального провала напряжения почти не отличается от значения, полученного экспериментально.

Во многих практических случаях возникает необходимость быстро оценить снижение напряжения на клеммах генератора при пуске от него обычного короткозамкнутого электродвигателя известной мощности. Такую оценку для генератора с компаундированием можно получить по формуле

$$\Delta U_0 = \frac{k_T x'_d}{k_T x'_d + 1}, \qquad (2.12.24)$$

если известно отношение пускового тока электродвигателя к номинальному току генератора $k_T$, или по формуле

$$\Delta U_0 = \frac{k_0 x'_d}{k_0 x'_d + k_p}, \qquad (2.12.25)$$

где $k_0 = \frac{P_э}{P_г}$ — коэффициент соизмеримости мощностей электродвигателя и генератора, указанных в паспорте; $k_p = 0{,}9 \frac{\eta_э \cos\varphi_э}{k_i \cos\varphi_г}$ — расчетный коэффициент, определяемый по табл. 2.12.2. Этот коэффициент вычислен для средних значений номинальных КПД электродвигателей $\eta_э$ и коэффициента мощности $\cos\varphi_э$, принятых равными соответственно 0,88 и 0,85.

Оценка снижения напряжения генератора с прямым компаундированием при включении на него реактивной и динамической нагрузки с пусковым коэффициентом мощности до 0,45 может быть произведена по графикам, построенным на рис. 2.12.8.



*Таблица 2.12.2*

**Значения коэффициента $k_p$ для расчета провала напряжения генератора с компаундированием**

| $\cos\varphi_г$ | Кратность пускового тока электродвигателя | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 4 | 4,5 | 5 | 5,5 | 6 | 6,5 | 7 | 7,5 |
| 0,8 | 0,21 | 0,19 | 0,17 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,12 | 0,11 |
| 0,7 | 0,24 | 0,21 | 0,19 | 0,17 | 0,16 | 0,15 | 0,14 | 0,13 |

**Пример 1.** Рассчитать изменение напряжения и частоты синхронного дизель-генератора с компаундированием при пуске электродвигателя прямым включением.

Исходные данные. Дизель мощностью $N_m = 165$ л. с.; $n_{ном} = 1500$ об/мин; $T_к = 0{,}0175$ с; $\alpha_0 = 25°$ (0,436 рад); $\delta_r = 0{,}02$.

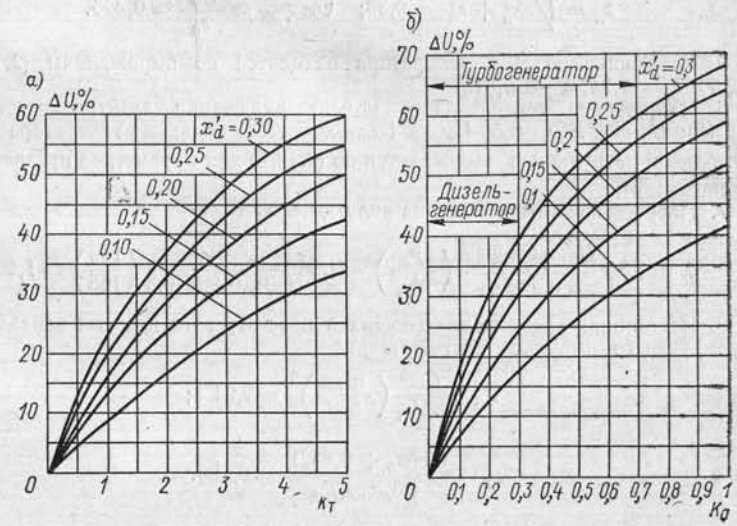



Рис. 2.12.8. Графики для оценки провала напряжения генератора с саморегулированием, имеющего номинальный коэффициент мощности 0,8 при постоянной частоте вращения: *а* — при включении реактивной нагрузки; *б* — при включении асинхронного короткозамкнутого электродвигателя.

Генератор мощностью $P_г = 100$ кВт; $U_г = 230$ В; $I_г = 314$ А; $\cos\varphi_г = 0{,}8$; $\eta_г = 0{,}907$; $x_d = 1{,}25$; $x'_d = 0{,}1$; $x_q = 0{,}701$; $r_a = 0{,}02$; $T_{d0} = 1{,}63$ с; напряжение возбуждения при холостом ходе по спрямленной характеристике 5,5 В ($U_{в0} = 1$); предварительная нагрузка отсутствует.

Система компаундирования: реактивное сопротивление $x_c = 0{,}05$, $r_c = 0{,}01$. Маховой момент вращающихся масс генераторного агрегата $GD^2 = 44{,}2$ Н·м².

Электродвигатель мощностью $P_э = 41$ кВт; $U_э = 220$ В; $\cos\varphi_э = 0{,}875$; $s_{ном} = 0{,}02$; $\eta_э = 0{,}87$; $k_i = 6{,}5$; кратности пускового и максимального моментов соответственно $m_п = 1$, $m_{max} = 2{,}1$; соединение обмоток — в треугольник; сопротивление цепи $x_ц = 0$, $r_ц = 0{,}03$.

Расчет. 1. Приведенное к генератору сопротивление короткого замыкания фазы электродвигателя определяется по формуле (2.12.10):

$$z_э = \frac{0{,}87 \cdot 0{,}875 \cdot 100}{6{,}5 \cdot 0{,}8 \cdot 41} \left(\frac{220}{230}\right)^2 = 0{,}33.$$

2. Пусковое значение коэффициента мощности электродвигателя $\cos\varphi_п = 0{,}32$ определяется по графику, приведенному на рис. 2.12.3 для $s_{кр} = 0{,}143$. Последняя величина вычисляется по формуле (2.12.30), в которую подставляются значения расчетных коэффициентов: $a = 1{,}078$, $b = 0$, $c = -0{,}022$.

3. Реактивная и активная составляющие сопротивления электродвигателя

$$x_э = z_э \sin\varphi_п = 0{,}31; \quad r_э = z_э \cos\varphi_п = 0{,}105.$$

4. Полное сопротивление набрасываемой нагрузки и генератора

$$x_н = x_э + x_с = 0{,}36; \quad r_н = r_э + r_с + r_ц = 0{,}145;$$

$$x_{dн} = x_d + x_н = 1{,}61; \quad x'_{dн} = x'_d + x_н = 0{,}46;$$

$$x_{qн} = x_q + x_н = 1{,}06; \quad r_{aн} = r_a + r_н = 0{,}165;$$

$$z_н = \sqrt{x_н^2 + r_н^2} = 0{,}39; \quad \cos\varphi_{aн} = \frac{r_{aн}}{z_н} = 0{,}425.$$

5. Коэффициенты ЭДС генератора находятся по выражениям (2.12.4) и (2.12.7): $\xi = 0{,}24$, $\xi' = 0{,}81$.

6. Напряжение генератора в момент включения электродвигателя по (2.12.13); $U_0 = \xi' E'_q = 0{,}81$ [$E'_q = 1$ для холостого хода; для генератора с предварительной нагрузкой $E'_q$ вычисляется по (2.12.5) для параметров предварительной нагрузки].

7. Набрасываемая нагрузка на валу дизеля

$$\lambda = 1{,}36 \frac{U_{ном}^2 \cos\varphi_{aн}}{z_н \eta_г \cos\varphi_г} \left(\frac{P_г}{N_m}\right) = 1{,}36 \frac{1^2 \cdot 0{,}425}{0{,}39 \cdot 0{,}907 \cdot 0{,}8} \left(\frac{100}{165}\right) = 1{,}25.$$

8. Постоянная времени вращающихся масс агрегата и время запаздывания регулирующего импульса соответственно

$$T_a = \frac{GD^2}{N_m} \left(\frac{\eta_{ном}}{518}\right)^2 = 2{,}24 \text{ с};$$

$$\tau_р = \frac{30\,(\alpha_0 + 0{,}872)}{\pi \delta_r n_{ном} T_a} = 0{,}186.$$

9. Расчетные коэффициенты механического процесса

$$D_д = T_к T_a = 0{,}0392 \text{ с}^2;$$

$$E_{τд} = \delta_r T_a = (1 - \tau_р) = 0{,}036\,5 \text{ с};$$

$$a_0 = \delta_r T_a = 0{,}0448; \quad \alpha = \frac{E_{τд}}{2D_д} = 0{,}465;$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{D_д} - \alpha^2} = 5; \quad \rho = \sqrt{\left(\frac{1 - \alpha a_0}{\beta a_0}\right)^2 + 1} = 4{,}47.$$

10. Фазовые углы механического процесса

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{1 - \alpha a_0}{\beta a_0} = 1{,}35 \text{ рад};$$

$$\psi_0 = \operatorname{arctg} \frac{\beta}{\alpha} = 1{,}5 \text{ рад}.$$



11. Максимальное отклонение частоты вращения дизеля и постоянная времени затухания механического процесса соответственно

$$\varphi_m = \rho \lambda \delta_r \left[ e^{-\frac{\alpha}{\beta}\left(\frac{\pi}{2} - \psi + \psi_0\right)} \sin\psi_0 + \cos\psi \right] = 0{,}12;$$

$$T_\psi = \frac{0{,}396}{\beta} \left(\frac{\pi}{2} - \psi + \psi_0\right) = 0{,}135 \text{ с}.$$

12. Напряжение возбуждения генератора для включаемой нагрузки по (2.12.14)

$$U_{в\,max} = \frac{1}{\xi_{max}} = \frac{1}{0{,}24} = 4{,}16.$$

13. Расчетные коэффициенты уравнения переходного процесса генератора по (2.12.12)

$$k_1 = \frac{\xi'}{T_{d0}} = 0{,}5; \quad k_2 = \frac{\xi'}{\xi T_{d0}} = \frac{k_1}{\xi} = 2{,}1;$$

$$k_\psi = \frac{1}{T_\psi} = 7{,}4.$$

14. Изменение напряжения генератора по (2.12.16)

$$U(t) = 0{,}88 - 0{,}02e^{-2{,}1t} - 0{,}05e^{-7{,}4t}.$$

## § 2.12.3. РАСЧЕТ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ПУСКЕ И САМОЗАПУСКЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ СЕТИ

Резкое и значительное снижение напряжения и частоты генераторов электростанции приводит к затормаживанию включенных электродвигателей и увеличению длительности разбега пускаемого электродвигателя. Характер и величина изменения частоты вращения электродвигателей зависят как от длительности и величины изменения напряжения и частоты, так и от параметров электропривода в целом. С некоторым приближением разбег пускаемого и поведение включенного электродвигателя до момента достижения ими критического скольжения, а также поведение их пускателей в практических исследованиях можно рассматривать при данном изменении напряжения и частоты в судовой энергосистеме. Это изменение устанавливается с помощью расчетных формул, приведенных в § 2.12.2.

При указанных условиях электромеханический переходный процесс асинхронного электродвигателя определяется уравнением

$$T_э \frac{dn}{dt} = m_э(n, U, f) - m_с(n), \qquad (2.12.26)$$

где $T_э = \frac{GD^2 n_0}{375 M_{ном}}$ — постоянная времени вращающихся масс электродвигателя и приводного механизма ($GD^2$ — маховой момент вращающихся частей электродвигателя и приводного механизма; $M_{ном}$ — номинальный вращающий момент электродвигателя); $m_э(n, U, f)$ — вращающий момент электродвигателя в функции частоты вращения, напряжения и частоты; $m_с(n)$ — момент сопротивления приводного механизма, определяемый по формуле

$$m_с(n) = m_{с.нач} + \Delta m_у n^k. \qquad (2.12.27)$$

При резком изменении скольжения изменение вращающего момента электродвигателя имеет очень сложный характер вследствие возникновения дополнительных электромагнитных моментов. В судовых системах благодаря относительно малой скорости изменения скольжения электродвигателя влияние этих моментов невелико и потому при анализе электромеханического переходного процесса электродвигателя используется статическая механическая характеристика по формуле М. П. Костенко

$$m_э = \frac{2m_{max}(1+s_{кр})}{s_{кр}s^{-1} + s_{кр}^{-1}s + 2s_{кр}}, \qquad (2.12.28)$$

или

$$m_э = \frac{2m_{max}(1+\varepsilon_э)}{s_{кр}s^{-1} + s_{кр}^{-1}s + 2\varepsilon_э}. \qquad (2.12.29)$$

Для расчетов разгона электродвигателя во время пуска и самозапуска, когда определяется изменение частоты вращения от нуля до критического значения $n_{кр}$, механическую характеристику следует принимать по (2.12.29). Значения величин $s_{кр}$ и $\varepsilon_э$, отсутствующих обычно в каталогах, можно рассчитать по формулам

$$s_{кр} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \qquad (2.12.30)$$

где

$$a = (m_{max} - m_п) - s_{ном}m_п(m_{max} - 1);$$
$$b = 2s_{ном}m_{max}(m_п - 1);$$
$$c = s_{ном}[s_{ном}(m_{max} - m_п) - m_п(m_{max} - 1)],$$

и

$$\varepsilon_э = \frac{m_п(1 + s_{кр}^2) - 2m_{max}s_{кр}}{2s_{кр}(m_{max} - m_п)}. \qquad (2.12.31)$$

При расчетах затормаживания электродвигателя, когда определяется изменение частоты вращения от нормального значения до критического, соответствующий участок механической характеристики следует принимать по формуле (2.12.28) при значении $s_{кр}$, рассчитываемом по формуле

$$s_{кр} = \frac{m_{max} + \sqrt{m_{max}(m_{max} + 2s_{ном}) - (1 + 2s_{ном})}}{s_{ном}^{-1} - 2(m_{max} - 1)}. \qquad (2.12.32)$$

Для изменяющихся значений напряжения и частоты механическая характеристика электродвигателя не остается постоянной и зависимость вращающего момента электродвигателя (2.12.29) будет такой:

$$m_э = \frac{2m_{max}s_{кр}(f + \varepsilon_э)(f - n)}{(f-n)^2 f^2 + 2\varepsilon_э s_{кр}(f - n) + s_{кр}^2}\left(\frac{U}{f}\right)^2. \qquad (2.12.33)$$

Очевидно, что решение уравнения динамического равновесия электродвигателя (2.12.26) в случае представления вращающего момента и момента сопротивления на его валу сложными нелинейными зависимостями, подобными (2.12.27) — (2.12.33), возможно лишь методом численного интегрирования. В этом случае известные графики изменения напряжения и частоты разбиваются по интервалам времени $\Delta t_i$, в каждом из которых напряжение и частота принимаются неизменными, равными среднему значению в этом интервале, как показано на рис. 2.12.9.

В любом интервале времени $\Delta t_i$ независимо от типа характеристики момента сопротивления изменение избыточного момента $m_{изб}$ наиболее точно можно представить в виде линейной зависимости

$$m_{изб} = m_i \pm b_i t,$$



где $m_i$ — избыточный момент в начале интервала; $b_i = \operatorname{tg}\alpha_i = \frac{m_i}{\Delta t_i}$ — угловой коэффициент, знак которого соответствует наклону прямой избыточного момента относительно оси времени.

Тогда в каждом расчетном интервале уравнение (2.12.26) может быть представлено в виде

$$T_э\dot{n} = \pm(m_i \pm b_i t), \qquad (2.12.34)$$

где знаки перед скобками соответствуют положительному или отрицательному избыточному моменту.

Решение этого уравнения дает зависимость изменения частоты вращения электродвигателя во времени в любом рассматриваемом интервале $\Delta t_i$:

$$n(t) = n(0) \pm \frac{m_i}{T_э}t \pm \frac{b_i}{2}t^2,$$

где $n(0)$ — частота вращения электродвигателя в начале интервала. Приращение частоты вращения электродвигателя в каждом данном интервале времени $\Delta t_i$ определяется в виде

$$\pm \Delta n_i = n(t) - n(0) =$$
$$= (1 \pm 0{,}5)\frac{m_i}{T_э}\Delta t_i, \qquad (2.12.35)$$

где знак в скобках соответствует знаку углового коэффициента.

При расчетах разгона, когда частота вращения электродвигателя изменяется в пределах от нуля до критической, целесообразно воспользоваться следующим выражением для определения ее приращения:

$$\pm \Delta n_i = \frac{m_i}{T_э}\Delta t_i, \qquad (2.12.36)$$

где избыточный момент принимается неизменным во всем интервале времени.

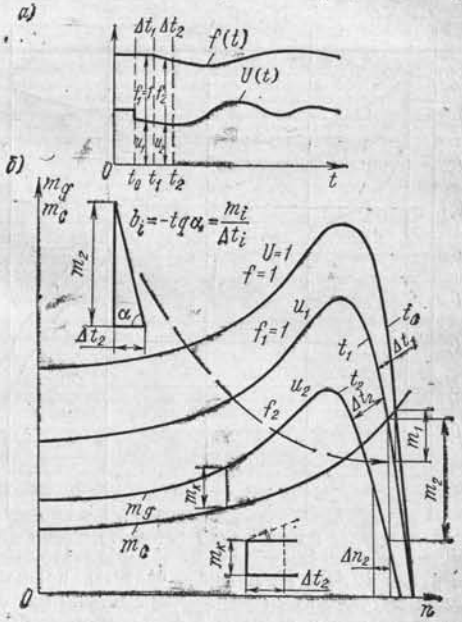



Рис. 2.12.9. Иллюстрация графоаналитического способа расчета при известном изменении напряжения и частоты (*а*) избыточного момента асинхронного электродвигателя по его изменяющейся механической характеристике (*б*).

Точность расчета изменения частоты вращения электродвигателя при заданном изменении напряжения и частоты в судовой сети иллюстрируется рис. 2.12.10. Максимальная погрешность при расчете затормаживания электродвигателя не превышает 8%.

Графики изменения вращающего момента электродвигателя в функции напряжения и частоты, построенные по формуле (2.12.33), показывают, что при расчете разгона электродвигателя его механическую характеристику в пределах изменения частоты вращения от нуля до критической можно приближенно заменить прямой линией:

$$m_э(n) = m_п + kn, \qquad (2.12.37)$$

где

$$k = \operatorname{tg}\beta = \frac{m_{max} - m_п}{n_{кр}}.$$

В обычных для судовых электростанций пределах изменения частоты величина $k$ почти не изменяется и при постоянном напряжении имеет место равенство

$$\frac{m_{max}/f^2 - m_{nf}}{f - s_{кр}} = k = \text{const}.$$

Отсюда

$$m_{nf} = \frac{m_{max}}{f^2} - k(f - s_{кр}).$$

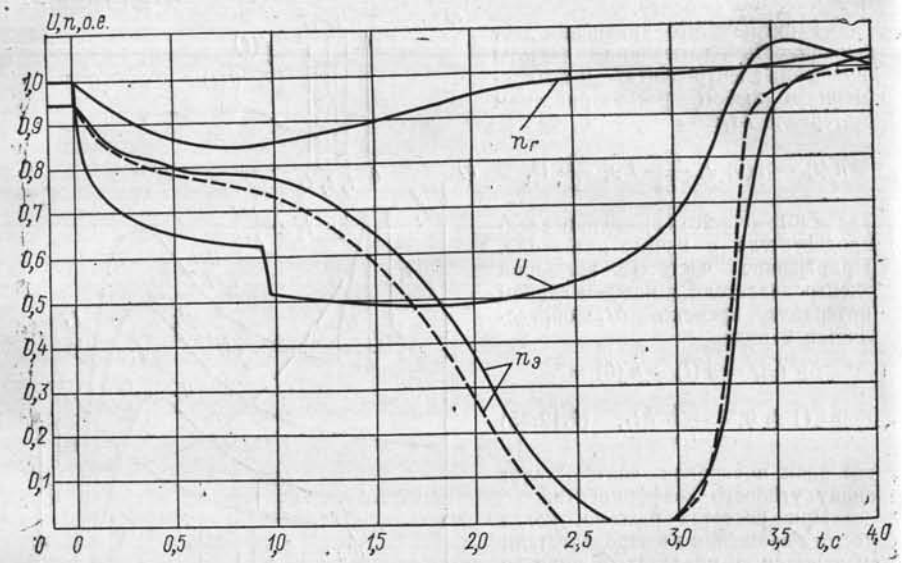



Рис. 2.12.10. Изменение частоты вращения асинхронного электродвигателя мощностью 5 кВт при $n = 965$ об/мин при длительном и значительном снижении напряжения и частоты в энергосистеме буксирного теплохода.

Поэтому вращающий момент электродвигателя по (2.12.37) при изменении напряжения и частоты сети может быть представлен как

$$m_э(n, U, f) = \left[\frac{m_{max}}{f^2} - k(f - s_{кр} - n)\right] U^2. \qquad (2.12.38)$$

Расчет разгона асинхронного электродвигателя при помощи выражения (2.12.38) проще, а погрешность, как видно из сравнения графиков, полученных экспериментальным и расчетным путем, на рис. 2.12.11 невелика.

**Пример 2.** Рассчитать разбег асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, пускаемого от синхронного генератора.

Исходные данные. Электродвигатель мощностью $P_э = 50$ кВт при $n_{ном} = 1470$ об/мин является приводом центробежного насоса и пускается от генератора прямым включением. Кратности пускового и опрокидывающего моментов соответственно равны $m_п = 1,6$, $m_{max} = 2,3$. Механическая характеристика насоса $m_c(n) = 0,13 + 0,905n^2$. Постоянная времени выбега привода $T_э = 0,9$ с. Механическая характеристика электродвигателя не известна.

Генератор мощностью 100 кВт с машинным возбуждением приводится во вращение дизелем с частотой вращения $n_{ном} = 1500$ об/мин. Графики изменения напряжения $U(t)$ и частоты $f(t)$ агрегата при пуске от него электродвигателя представлены на рис. 2.12.11.



Расчет. 1. Критическое скольжение электродвигателя для построения механической характеристики по (2.12.30) для вычисленных значений $a = 0,66$; $b = 0,055$; $c = 0,04$ $s_{кр} = 0,21$.

2. Коэффициент поправки характеристики по (2.12.31) $\varepsilon_э = 2,4$.

3. Механическая характеристика электродвигателя по (2.12.29)

$$m_э = \frac{4,6 \cdot 3,4}{0,21s^{-1} + 4,76s + 4,8}.$$

4. Уточненное значение критического скольжения по (2.12.32) $s_{кр} = 0,12$.

5. Угловой коэффициент спрямленной механической характеристики электродвигателя $k = 0,8$.

Рассматриваем первый интервал времени $\Delta t_1 = 0,05$ с.

6. Напряжение и частота генератора по графикам, приведенным на рис. 2.12.11, $U_1 = 0,7$; $f_1 = 0,98$.

7. Вращающий момент электродвигателя по (2.12.38)

$$m_{э1} = \left[\frac{2,3}{0,98^2} - 0,8(0,98 - 0,12 - 0)\right] \cdot 0,7^2 = 0,84.$$

8. Момент сопротивления на валу насоса по (2.12.27) $m_{c1} = 0,13$.

9. Избыточный момент $m_1 = m_{э1} - m_{c1} = 0,71$.

10. Приращение частоты вращения электродвигателя по (2.12.36)

$$\Delta n_1 = \frac{m_1}{T_э}\Delta t_1 = \frac{0,71}{0,9} \cdot 0,05 = 0,039.$$

11. Частота вращения электродвигателя

$$n_1 = n(0) + \Delta n_1 = 0,039.$$

Рассматриваем второй интервал времени $\Delta t_2 = 0,05$ с.

12. Напряжение и частота генератора по графикам, приведенным на рис. 2.12.11, соответственно $U_2 = 0,64$, $f_2 = 0,96$.

13. Вращающий момент электродвигателя по (2.12.38)

$$m_{э2} = \left[\frac{2,3}{0,96^2} - 0,8(0,96 - 0,12 - 0,039)\right] 0,64^2 = 0,79.$$

14. Момент сопротивления по (2.12.27)

$$m_{c2} = 0,13 + 0,905 \cdot 0,039^2 = 0,132.$$

15. Избыточный момент

$$m_2 = m_{э2} - m_{c2} = 0,79 - 0,132 = 0,658.$$

16. Приращение частоты вращения по (2.12.36)

$$\Delta n_2 = \frac{m_2}{T_э}\Delta t_2 = \frac{0,658}{0,9} 0,05 = 0,037,$$

17. Частота вращения

$$n_2 = n_1(0) + \Delta n = 0,076.$$

Продолжая подобным образом расчет, вычисляем весь график разгона электродвигателя с центробежным насосом (см. рис. 2.12.11). Расчет затормаживания и самозапуска асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором при значительном снижении напряжения и частоты судовой сети помещен в работе [36].

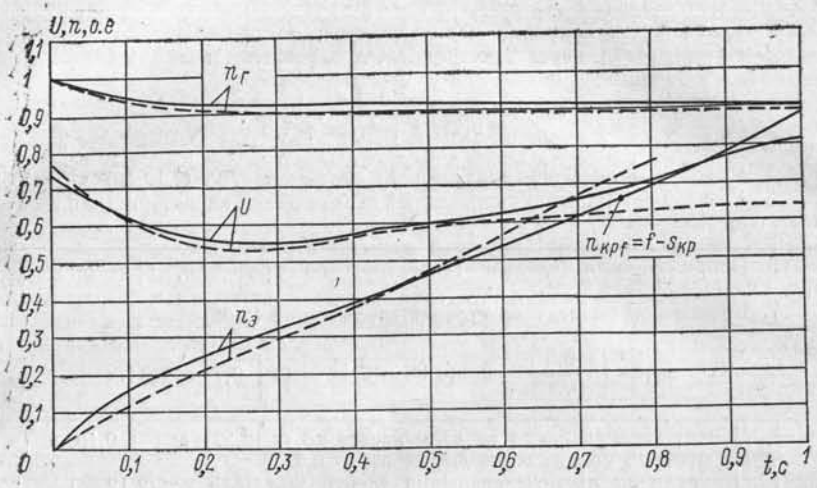



Рис. 2.12.11. Экспериментальная (———) и расчетная (— — — —) кривые разбега асинхронного электродвигателя мощностью 50 кВт при изменении напряжения и частоты.

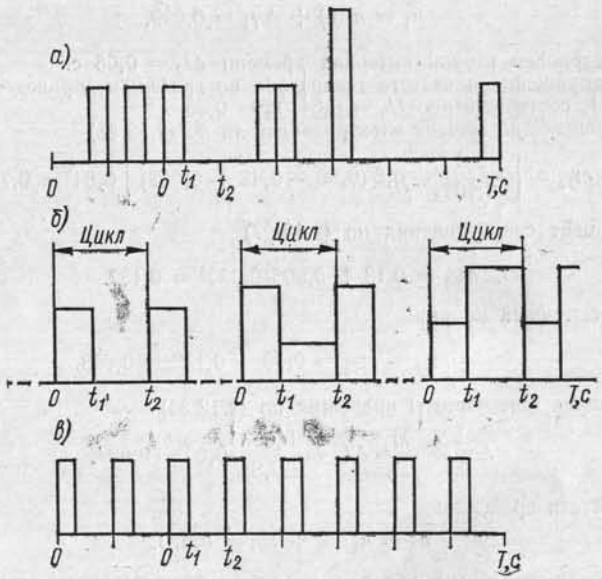



Рис. 2.12.12. Графики ударного случайного (*а*), циклического (*б*) и строго периодического (*в*) изменения нагрузки.



## § 2.12.4. РАСЧЕТ КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ РАБОТЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГРУЗОВЫХ ЛЕБЕДОК И КРАНОВ

При повторно-кратковременном режиме работы электроприводов судовых механизмов включения последних могут быть представлены графиками ударной нагрузки генератора различного характера (см. рис. 2.12.12). Для судовых погрузочно-разгрузочных устройств частота включения их электроприводов устанавливается по осциллограммам потребляемого тока.

Включение на генератор, например, полюсопереключаемого электродвигателя грузовой лебедки можно рассматривать в виде прямоугольного импульса пускового тока обмотки третьей скорости длительностью 0,45 с.

Рассматривая «пики» включений одного электродвигателя как поток случайных величин, можно установить закон распределения последних и вероятность одного включения. По формуле математического ожидания (среднего значения) случайной величины определяется наиболее вероятное число включений:

$$MX = \sum_{i=1}^{q} X_i P(X_i).$$

Для трехскоростного полюсопереключаемого электродвигателя типа МАП 612-6/12/24 эти значения равны: $P_в = 0{,}39$, $MX = 1{,}67$.

Степень рассеяния рассматриваемой дискретной случайной величины $X$ — числа включений электроприводов — около ее величины математического ожидания оценивается дисперсией, т. е. средним значением квадрата отклонения

$$DX = MX^2 - (MX)^2$$

и средним квадратическим отклонением этой случайной величины

$$\sigma_x = \sqrt{DX}.$$

Для указанного выше электропривода эти значения равны соответственно: $DX = 0{,}75$ и $\sigma_x = 0{,}866$ вкл., что свидетельствует о концентрации ожидаемого наибольшего числа включений грузового электропривода около значения 1,67.

Теперь, если рассматривается режим грузовых операций, то необходимо определить количество электроприводов, которые будут иметь включения за данный промежуток времени из общего числа $s$ электроприводов, находящихся в работе при погрузочно-разгрузочных операциях. Это количество определяется по формуле вероятнейшего числа

$$k_0 = [(s+1)\,p_в]. \qquad (2.12.39)$$

Представляя цикл включения электропривода продолжительностью $t_2$ состоящим из пика и паузы, соответственно $t_1$ и $t_2 - t_1$, следует условиться о дискретности циклов, т. е. рассматривать случаи либо их совпадения, либо следования друг за другом без какого-либо частичного наложения (рис. 2.12.12, *б*, *в*).

Переходный режим синхронного генератора с компаундированием при циклическом изменении нагрузки будет определяться системой двух дифференциальных уравнений соответственно для первой и второй частей цикла:

$$\dot{U}_I + k_{2I}U_I = k_{1I}U_{вI}1(t) \text{ для } 0 \leqslant t \leqslant t;$$

$$\dot{U}_{II} + k_{2II}U_{II} = k_{1II}U_{вII}1(t - t_1) \text{ для } t_1 \leqslant t \leqslant t_2.$$

Единичная функция $1(t)$ характеризует скачкообразное изменение напряжения возбуждения генератора в первой части цикла, а единичная функция

запаздывания 1 $(t - t_1)$ — во второй части цикла, через интервал времени $t_1$. Решение этих уравнений имеет вид

$$\left.\begin{aligned} U_I(t) &= U_{вI}\frac{k_{1I}}{k_{2I}}\left(1 - e^{-k_{2I}t}\right) + U_{I0}e^{-k_{2I}t} \quad \text{для } 0 \leqslant t \leqslant t_1; \\ U_{II}(t) &= U_{вII}\frac{k_{1II}}{k_{2II}}\left(1 - e^{-k_{2II}(t-t_1)}\right) + U_{II0}e^{-k_{2II}(t-t_1)} \\ &\qquad \text{для } t_1 \leqslant t \leqslant t_2, \end{aligned}\right\} \quad (2.12.40)$$

где $U_{I0}$, $U_{II0}$ — начальные значения напряжения в цикле при включении и отключении нагрузки.

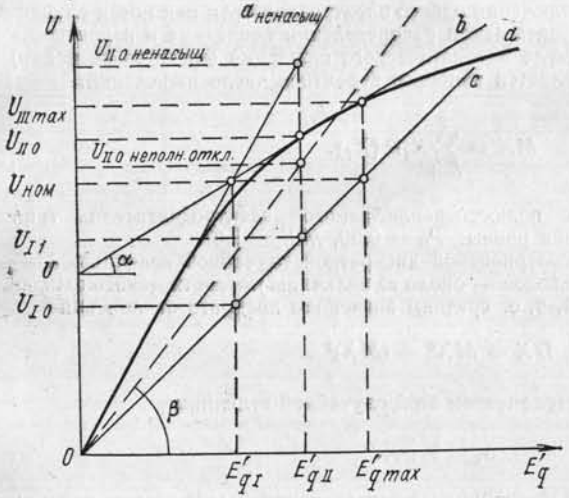



Рис. 2.12.13. Зависимости напряжения генератора от ЭДС за переходным продольным индуктивным сопротивлением: $a$ — реальная; $b$ — линеаризированная; $c$ — характеристика нагрузки.

Напряжение на клеммах генератора с учетом насыщения его стали для случая отключения нагрузки может быть найдено при помощи аппроксимации нелинейной части кривой намагничивания прямой. Находим

$$U_{II0} = v + k_v E'_{qII},$$

или, подставляя значение $E'_{qII}$ из (2.12.5),

$$U_{II0} = v + \frac{k_v}{\xi'_I} U_{Ii}, \quad (2.12.41)$$

где $v$ и $k_v = \operatorname{tg}\alpha$ — соответственно начальная ордината и угловой коэффициент аппроксимирующей прямой (рис. 2.12.13).

Если значение начального напряжения $U_{I0}$, равное $U_{I0} = \xi'_1 E'_{q1}$, определить для последующего цикла $q + 1$, то

$$U_{I0}(q+1) = \xi'_1 E'_{qI}(q+1), \quad (2.12.42)$$

где значение ЭДС определяется напряжением в момент окончания предыдущего цикла по формуле

$$E'_{qI}(q+1) = \frac{1}{\xi'_{II}} U_{II2}(q)$$



(для полного отключения нагрузки $\xi'_{II} = 1$). Тогда (2.12.42) примет вид

$$U_{I0}(q+1) = \frac{\xi'_I}{\xi'_{II}} U_{II2}(q). \quad (2.12.43)$$

Напряжение на зажимах генератора в конце $q$-го цикла равно $U_{II2}(q) = U_{II}(t_2)$. Подставляя в это равенство второе уравнение (2.12.40) для $t_2$ с учетом (2.12.41) и затем — в (2.12.43), имеем разностное уравнение первого порядка

$$U_{I0}(q+1) - aU_{I0}(q) = b, \quad (2.12.44)$$

где

$$\left.\begin{aligned} a &= \frac{k_v}{\xi'_{II}} e^{-k_{2I}t_1} e^{-k_{2II}(t_2-t_1)}; \\ b &= \frac{1}{\xi'_{II}}\left\{U_{вII}\xi_{II}\xi'_1\left(1 - e^{-k_{2II}(t_2-t_1)}\right) + \right. \\ &+ \left.\left[v\xi'_1 + k_v U_{вI}\xi_I\left(1 - e^{-k_{2I}t_1}\right)\right] e^{-k_{2II}(t_2-t_1)}\right\}. \end{aligned}\right\} \quad (2.12.45)$$

Ступенчатую функцию $\overline{\sum} U_{I0}(q)$, которая позволяет ввести в общее решение вторую независимую переменную, можно найти из равенства (2.12.44) при помощи преобразования Лапласа в виде

$$\overline{\sum} U_{I0}(q) (=) b \overline{\sum} \frac{a^q - 1}{a - 1} + U_{I0} \overline{\sum} a^q \quad \text{при } q \geqslant 0.$$

После подстановки в (2.12.40) имеем

$$\left.\begin{aligned} U_I(t) &= U_{вI}\xi_I\left(1 - e^{-k_{2I}t}\right) + \left(b\frac{a^q - 1}{a - 1} + U_0 a^q\right) e^{-k_{2I}t} \\ &\qquad \text{для } 0 \leqslant t \leqslant t_1; \\ U_{II}(t) &= U_{вII}\xi_{II}\left(1 - e^{-k_{2II}(t-t_1)}\right) + \\ &+ \left\{v + \frac{k_v}{\xi'_I}\left[U_{вI}\xi_I\left(1 - e^{-k_{2I}t_1}\right) + \right.\right. \\ &+ \left.\left.\left(b\frac{a^q - 1}{a - 1} + U_0 a^q\right) e^{-k_{2I}t_1}\right]\right\} e^{-k_{2I}(t-t_1)} \\ &\qquad \text{для } t_1 \leqslant t \leqslant t_2. \end{aligned}\right\} \quad (2.12.46)$$

В этой системе уравнений величина $q$ является второй независимой переменной, и поэтому уравнения отражают процесс изменения напряжения на клеммах генератора как во время его установления, так и после достижения установившегося состояния. По мере следования циклов изменения нагрузки друг за другом переходный процесс генератора от цикла к циклу приближается к

установившемуся состоянию и достигает его, когда число циклов $q$ достаточно велико, а именно, при $a^q \ll 1$:

$$\left.\begin{aligned} U_1(t) &= U_{в1}\xi_1\left(1-e^{-k_{21}t}\right)-\frac{b}{a-1}e^{-k_{21}t} \quad \text{для } 0 \leqslant t \leqslant t_1; \\ U_{11}(t) &= U_{в11}\xi_{11}\left[1-e^{-k_{211}(t-t_1)}\right]+ \\ &+\left\{v+\frac{k_v}{\xi_1'}\left[U_{в1}\xi_1\left(1-e^{-k_{21}t_1}\right)-\right.\right. \\ &\left.\left.-\frac{b}{a-1}e^{-k_{21}t_1}\right]\right\}e^{-k_{211}(t-t_1)} \quad \text{для } t_1 \leqslant t \leqslant t_2. \end{aligned}\right\} \quad (2.12.47)$$

Система уравнений (2.12.46) характеризует общий случай изменения нагрузки синхронного генератора с компаундированием при постоянной частоте вращения. Действительно, полагая в первом уравнении (2.12.46) $q = 0$, получаем уравнение, идентичное (2.12.16), описывающее процесс генератора при однократном изменении нагрузки для $\varphi_{max} = 0$. Второе уравнение системы (2.12.46) при том же условии $q = 0$ описывает переходный процесс генератора для случая частичного или полного отключения нагрузки с необходимым при этом учетом насыщения стали машины.

**Пример 3.** Рассчитать колебания напряжения синхронного генератора при работе 16 кранов с полюсопереключаемым электродвигателем для включения обмоток третьей (рабочей) скорости.

Исходные данные. Генератор с прямым компаундированием мощностью $S_г = 275$ кВ·А; $U_г = 400$ В; $\cos\varphi = 0{,}8$; $x_d = 1{,}336$; $x_q = 0{,}83$; $x_d' = 0{,}263$; $T_{d0} = 1{,}2$ с; предварительной нагрузки нет.

Электродвигатель многоскоростной (для третьей скорости): $P_э = 32$ кВт; $U_э = 380$ В; $\cos\varphi_э = 0{,}82$; $k_i = 6{,}55$; $\eta_э = 0{,}84$; $m_{max} = 4{,}04$; $m_п = 3{,}24$; $s_{ном} = 5{,}5\%$.

Режим работы электродвигателя крана: продолжительность пуска $t_1 = 0{,}45$ с, число включений в секунду $x = 0{,}2$ с вероятностью $p_в = 0{,}39$.

Расчет. 1. Наиболее вероятное число совместно включаемых электроприводов из $s = 16$, одновременно находящихся в эксплуатации, по (2.12.39) $k_0 = 7$.

2. Вероятность совместного включения большего количества электроприводов

$$p(7 \leqslant k \leqslant 8) = \Phi(z'') - \Phi(z') = 0{,}165,$$

где функции $\Phi(z)$ определяются по таблице для значений аргумента

$$z' = \frac{7 - 0{,}39\cdot 16}{\sqrt{0{,}39\cdot 0{,}61\cdot 16}} = 0{,}39; \quad z'' = \frac{8 - 0{,}39\cdot 16}{\sqrt{0{,}39\cdot 0{,}61\cdot 16}} = 0{,}904.$$

Соответственно имеем

$$p(8 \leqslant k \leqslant 9) = 0{,}114; \quad p(9 \leqslant k \leqslant 10) = 0{,}052.$$

По найденным значениям вероятностей число совместно включаемых электроприводов больше восьми принимать не следует.

3. Продолжительность цикла и паузы соответственно

$$t_2 = \frac{1}{Xk} = \frac{1}{0{,}2\cdot 8} \approx 0{,}65 \text{ с}; \quad t_2 - t_1 = 0{,}2 \text{ с}.$$

4. Приведенное к генератору сопротивление фазы электродвигателя по (2.12.10) $z_I = 0{,}812$.

5. Пусковое значение коэффициента мощности электродвигателя $\cos\varphi_п = 0{,}52$ определяется по рис. 2.12.3 для величины $s_{кр} = 0{,}262$, вычисляемой по формуле (2.12.30).



6. Реактивная и активная составляющие сопротивления к. з. электродвигателя

$$x_I = z_I \sin\varphi_п = 0{,}812\cdot 0{,}853 = 0{,}693;$$
$$r_I = z_I \cos\varphi_п = 0{,}812\cdot 0{,}52 = 0{,}422.$$

7. Полные сопротивления включаемого электродвигателя и генератора

$$x_{dI} = x_d + x_I = 2{,}03; \quad x_{dI}' = x_d' + x_I = 0{,}96;$$
$$x_{qI} = x_q + x_I = 1{,}52; \quad r_{aI} = r_a + r_I = 0{,}422.$$

8. Коэффициенты ЭДС для пика цикла по (2.12.4) и (2.12.7)

$$\xi_I = 0{,}392; \quad \xi_I' = 0{,}783$$

(если учитываются сопротивления цепи $r_ц$, $x_ц$ генератора до электродвигателя, то при расчете следует взять $x_I + x_ц$, $r_I + r_ц$).

9. Коэффициенты уравнения переходного процесса генератора для пика цикла

$$k_{1I} = \frac{\xi_I'}{T_{d0}} = 0{,}652; \quad k_{2I} = \frac{\xi_I'}{\xi_I T_{d0}} = 1{,}66.$$

10. Полные сопротивления предварительной нагрузки генератора при отключении электродвигателя

$$x_{dII} = x_d + x_{II}; \quad x_{dII}' = x_d' + x_{II};$$
$$x_{qII} = x_q + x_{II}; \quad r_{aII} = r_a + r_{II}$$

(в данном примере такая нагрузка отсутствует).

11. Коэффициенты ЭДС для паузы цикла вычисляются по аналогии с п. 8. При отключении электродвигателя в случае отсутствия предварительной нагрузки на генераторе коэффициенты имеют значения $\xi_{II} = 1$ и $\xi_{II}' = 1$.

12. Коэффициенты уравнения переходного процесса генератора для паузы цикла вычисляются по аналогии с п. 9; при отсутствии нагрузки на генераторе коэффициенты равны:

$$k_{1II} = k_{2II} = T_{d0}^{-1} = 0{,}833.$$

13. Коэффициенты прямой, аппроксимирующей нелинейную часть характеристики холостого хода генератора

$$v = 0{,}85; \quad k_v = \operatorname{tg}\alpha = 0{,}15.$$

14. Напряжение возбуждения генератора соответственно при пике и паузе цикла по (2.12.14)

$$U_{вI} = \frac{1}{\xi_I} = 2{,}55; \quad U_{вII} = \frac{1}{\xi_{II}} = 1.$$

15. Коэффициенты переходного процесса для второй независимой переменной по (2.12.45)

$$a = 0{,}15e^{-1{,}66\cdot 0{,}45}\, e^{-0{,}833\cdot 0{,}2} = 0{,}06;$$
$$b = 0{,}783\left(1 - e^{-0{,}833\cdot 0{,}2}\right) + \left[0{,}85\cdot 0{,}783 + 0{,}15\left(1 - e^{-1{,}66\cdot 0{,}45}\right)\right] \times$$
$$\times\, e^{-0{,}833\cdot 0{,}2} = 0{,}85.$$

16. Напряжение генератора в начале пика первого цикла включения электропривода по (2.12.46) для $t = 0$ и $q = 0$

$$U_I(0) = U_0 = \xi_{11}' E_{qI1}' = 0{,}783$$

$\left(E'_{q\,II}=\frac{1}{\xi_{II}}\right.$, если генератор имеет предварительную нагрузку, $E'_{q\,II}=1$, если генератор не нагружен).

17. Количество прошедших циклов включений электроприводов, после которых процесс можно считать установившимся, $q>3$, так как должно быть $a^q \ll 1$.

18. Напряжение в установившемся режиме генератора в момент включения $t=0$ электропривода по (2.12.47) $U_{I0}=0{,}9$.

19. Напряжение в установившемся режиме в момент отключения электропривода по первому уравнению (2.12.47) для $a^q=0$ и $t=t_1$

$$U_{1I}=1-\Delta U_{I0}e^{-k_{2I}t_1}=1-0{,}1e^{-1{,}66\cdot 0{,}45}=0{,}95.$$

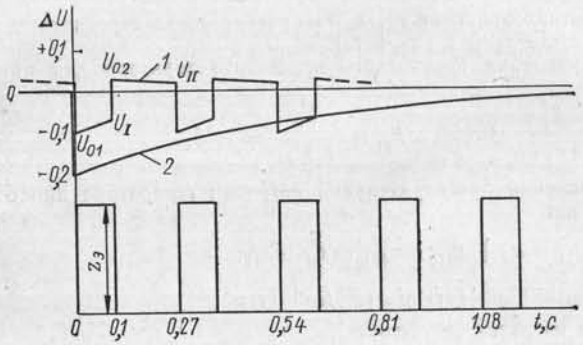



Рис. 2.12.14. Расчетное изменение напряжения генератора МСС275-500.
*1* — при циклическом графике включения электроприводов; *2* — при одиночном включении электропривода.

20. Напряжение в установившемся режиме в начале паузы по второму уравнению (2.12.47) для $a^q=0$ и $t=t_1$

$$U_{1I0}=v+\frac{k_v}{\xi'_I}\left(1-\Delta U_{I0}e^{-k_{2I}t_1}\right)=0{,}85+\frac{0{,}15}{0{,}783}\left(1-0{,}1e^{-1{,}66\cdot 0{,}45}\right)=1{,}04.$$

21. Напряжение в установившемся режиме в момент включения электропривода по второму уравнению (2.12.47) для $a^q=0$ и $t=t_2$

$$U_{1I2}=U_{вII}+(U_{1I0}-U_{вII})\,e^{-k_{2II}(t_2-t_1)}=$$

$$=1+0{,}03e^{-0{,}833\cdot 0{,}2}=1+0{,}03\cdot 0{,}84=1{,}02.$$

22. График установившихся колебаний напряжения генератора при включениях 16 крановых электродвигателей построен на рис. 2.12.14. Там же для сравнения построен график изменения напряжения генератора при одиночном включении кранового электродвигателя. График рассчитан по первой формуле (2.12.46) для $q=0$.

## § 2.12.5. РАСЧЕТ КОЛЕБАНИЙ РОТОРОВ СИНХРОННЫХ И АСИНХРОННЫХ МАШИН

Динамическое равновесие синхронной машины, у которой статорная обмотка включена на симметричное напряжение сети, а к валу ротора приложен вращающий момент, описывается в уравнениях Парка—Горева так:

$$J_c\ddot{\theta}=M_{д.\,c}-M_{эл.\,c},\qquad (2.12.48)$$



где $J_c=\frac{J}{M_{c.ном}}$; $M_{д.\,c}=\frac{M_д}{M_{c.\,ном}}$ — соответственно момент инерции вращающихся вместе с валом частей агрегата и вращающий момент на валу двигателя, приведенные к системе единиц, в которой за единицу мощности принята величина $S=\frac{3}{2}U_aI_a=M_{c.\,ном}\,\omega_c$; $M_{c.\,ном}$ — номинальный электромагнитный вращающий момент при синхронной угловой скорости $\omega_c$; $M_{эл.\,c}$ — электромагнитный момент машины:

$$M_{эл.\,c}=(U_d+E_q+U_{rd})\frac{U_q}{x_q}-(U_q+U_{rq})\frac{U_d}{x_d},\qquad (2.12.49)$$

отражает действующие на вал генератора вращающие моменты, обусловленные взаимодействием всех контуров обмоток с током.

Электродинамические силы взаимодействия контуров с токами зависят, как видно из (2.12.49), от мгновенных значений переменных и не зависят от скорости их изменения. Поэтому искомые силы взаимодействия могут быть определены на основе уравнений Парка—Горева для установившегося режима, в котором производные переменные равны нулю относительно координаты $\theta$ — угла вылета ротора. После преобразований, в процессе которых пренебрегаем обобщенной координатой второго порядка малости, увидим, что, если не учитывать активное сопротивление обмотки статора, то электромагнитный момент машины будет состоять из двух составляющих, одна из которых зависит от значения обобщенной координаты $\theta$, а другая — от производной этой координаты:

$$M_{эл.\,c}=M_{c.\,c}(\theta)+M_{a.\,c}(\dot{\theta}).\qquad (2.12.50)$$

Указанные составляющие через параметры машины выражаются так:

$$M_{c.\,c}=\frac{U_cE_{q0}}{x_d}\sin\theta+\frac{(x_d-x_q)\,U_c^2}{2x_dx_q}\sin 2\theta;\qquad (2.12.51)$$

$$M_{a.\,c}=\frac{U_c^2}{2\omega_cx_d}[(r_d+r_q)-(r_d-r_q)\cos 2\theta]\,\dot{\theta},\qquad (2.12.52)$$

где

$$r_q=\frac{\mu_qx_d}{\rho_{rq}x_q};\quad r_d=\frac{\mu_d}{\rho_r}+\frac{\mu'_d}{\rho_{rd}}.$$

После подстановки этих выражений в исходное уравнение (2.12.48) получим нелинейное дифференциальное уравнение.

Исследование колебательного движения машины около положения установившегося движения и устойчивости движения в заданном режиме может быть осуществлено, если полученное уравнение представить в вариациях, а именно:

$$J_c\Delta\ddot{\theta}+D_c\Delta\dot{\theta}+C_c\,\Delta\theta=\Delta M_{д.\,c}-\Delta M_{г.\,c},\qquad (2.12.53)$$

где по аналогии с терминами аналитической динамики коэффициент рассеяния, называемый демпферным коэффициентом, равен

$$D_c=\frac{U_c^2}{2\omega_cx_d}[(r_d+r_q)-(r_d-r_q)]\cos 2\theta_0];\qquad (2.12.54)$$

коэффициент синхронной жесткости, или синхронная жесткость,

$$C_c=\frac{U_cE_{q0}}{x_d}\cos\theta_0+\frac{(x_d-x_q)\,U_c^2}{x_dx_q}\cos 2\theta_0;\qquad (2.12.55)$$

дополнительный момент, обусловленный изменением возбуждения,

$$\Delta M_{\text{г. с}} \equiv C_{\text{в. с}} \Delta E_q = \frac{U_c}{x_d} \sin \theta_0 \, \Delta E_q. \qquad (2.12.56)$$

Синхронная жесткость $C_c$, как видно из формулы (2.12.54), представляет собой величину синхронизирующей мощности, вычисленную для координаты $\theta_0$ по угловой характеристике машины (рис. 2.12.15, *а*):

$$C_c = \operatorname{tg} \alpha = \left( \frac{\partial P}{\partial \theta} \right)_0. \qquad (2.12.57)$$

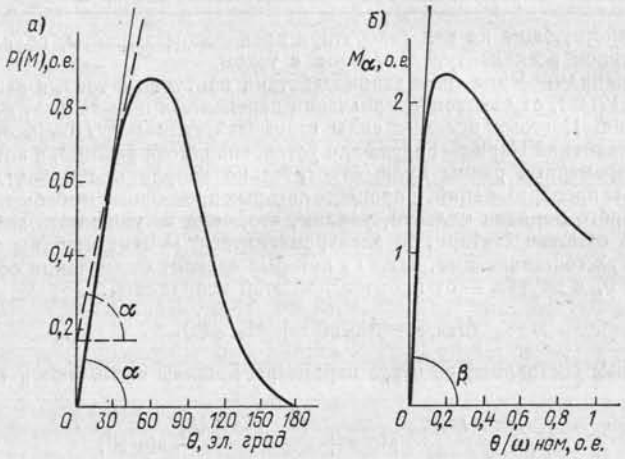



Рис. 2.12.15. Графики: *а* — угловой характеристики (при $E_q = 1$); *б* — асинхронного момента синхронного генератора.

Демпферный коэффициент $D_c$, определяемый выражением (2.12.54), представляет собой тангенс угла наклона касательной к характеристике демпферного момента машины (рис. 2.12.15, *б*):

$$D_c = \operatorname{tg} \beta = \left( \frac{\partial M_a}{\partial \dot{\theta}} \right)_0. \qquad (2.12.58)$$

Уравнение движения синхронной машины в вариациях (2.12.53) имеет вид уравнения движения Лагранжа второго рода. Колебательное движение роторов двух параллельно включенных машин около положения установившегося равновесия, или относительно вектора, вращающегося с синхронной угловой скоростью, может иметь различную амплитуду, но отклонения роторов должны быть в противофазе. В противном случае синхронное вращение машин нарушится, и их частота вращения будет либо увеличиваться, либо уменьшаться. Следовательно, потенциальная энергия двух параллельно включенных машин, обладающих синхронными жесткостями $C_1$, $C_2$, при отклонении координаты $\theta$ соответственно на величины $\Delta\theta_1$ и $\Delta\theta_2$ определяется суммой

$$V = \frac{1}{2} \left( C_1 \Delta\theta_1^2 + C_2 \Delta\theta_2^2 \right).$$

Если обозначить эквивалентную синхронную жесткость между машинами $C_{12}$, то с учетом противоположных знаков приращений можно получить равенство

$$C_{12} (\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2)^2 = C_1 \Delta\theta_1^2 + C_2 \Delta\theta_2^2.$$



Отсюда

$$C_{12} = \frac{C_1 \Delta\theta_1^2 + C_2 \Delta\theta_2^2}{(\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2)^2},$$

и, так как по условиям колебаний $C_1 \Delta\theta_1 = C_2 \Delta\theta_2$, то эквивалентная жесткость между двумя параллельно включенными машинами определится формулой

$$C_{12} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \qquad (2.12.59)$$

Таким образом, колебательные движения, например, двух синхронных агрегатов, включенных на параллельную работу, описываются системой уравнений

$$\left.\begin{aligned} J_1 \Delta\ddot{\theta}_1 + C_{12} (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) + D_1 (\Delta\dot{\theta}_1 - \Delta\dot{\theta}_2) &= \Delta M_{д1} - \Delta M_{г1}; \\ J_2 \Delta\ddot{\theta}_2 - C_{12} (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) - D_2 (\Delta\dot{\theta}_1 - \Delta\dot{\theta}_2) &= \Delta M_{д2} - \Delta M_{г2}. \end{aligned}\right\} \qquad (2.12.60)$$

В итоге полученный результат можно распространить на группу $m$ синхронных машин, включенных на параллельную работу. В соответствии с формулами аналитической динамики для всей группы $m$ агрегатов, структурные схемы которых удовлетворяют принятым здесь условиям, могут быть определены выражения кинетической и потенциальной энергий, а также диссипативной функции в зависимости от обобщенной координаты — угла вылета роторов:

$$T = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j J_{ij} \dot{\theta}_i \dot{\theta}_j = \frac{1}{2} \left( J_1 \Delta\dot{\theta}_1^2 + J_2 \Delta\dot{\theta}_2^2 + \dots + J_m \Delta\dot{\theta}_m^2 \right); \qquad (2.12.61)$$

$$\begin{aligned} V = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j C_{ij} \theta_i \theta_j = \frac{1}{2} [ & C_{12} (\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1)^2 + \dots + C_{1m} (\Delta\theta_m - \Delta\theta_1)^2 + \dots \\ & \dots + C_{23} (\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2)^2 + \dots + C_{2m} (\Delta\theta_m - \Delta\theta_2)^2 + \dots \\ & \dots + C_{m-1,\, m} (\Delta\theta_m - \Delta\theta_{m-1})^2 ]; \end{aligned} \qquad (2.12.62)$$

$$\begin{aligned} F = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j D_{ij} \dot{\theta}_i \dot{\theta}_j = \frac{1}{2} [ & D_{12} (\Delta\dot{\theta}_2 - \Delta\dot{\theta}_1)^2 + \dots + D_{1m} (\Delta\dot{\theta}_m - \Delta\dot{\theta}_1)^2 + \dots \\ & \dots + D_{23} (\Delta\dot{\theta}_3 - \Delta\dot{\theta}_2)^2 + \dots + D_{2m} (\Delta\dot{\theta}_m - \Delta\dot{\theta}_2)^2 + \dots \\ & \dots + D_{m-1,\, m} (\Delta\dot{\theta}_m - \Delta\dot{\theta}_{m-1})^2 ], \end{aligned} \qquad (2.12.63)$$

где синхронные жесткости и демпферные коэффициенты определяются в общем случае соответственно по формулам (2.12.54), (2.12.55), (2.12.59). Для обычных асинхронных машин имеет место $C_{ij} = 0$.

Таким образом, группа $m$ параллельно включенных синхронных агрегатов может быть описана $m$ уравнениями движения Лагранжа в вариациях

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \Delta\dot{\theta}_j} + \frac{\partial V}{\partial \Delta\theta_j} + \frac{\partial F}{\partial \Delta\dot{\theta}_j} = \Delta M_{д\,j} - \Delta M_{г\,j} \; (j = 1, \dots, m). \qquad (2.12.64)$$

Отсюда видно, что устойчивое колебательное движение машин зависит от характера изменения вращающего момента двигателей и момента сопротивления генератора. У агрегатов с поршневыми двигателями колебания обусловлены иррегулярностью вращающего момента двигателя и автоколебаниями автоматических регуляторов частоты вращения и напряжения; у агрегатов с роторными двигателями — преимущественно автоколебаниями указанных автоматических устройств, так как вращающий момент подобных двигателей постоянный.

Иррегулярность вращающего момента и колебания в системах регулирования вызывают вынужденные колебания агрегата, и в случае равенства частоты

собственных колебаний с частотой возмущающих воздействий могут иметь место резонансные явления, сопровождающиеся возрастанием амплитуды колебаний.

Уравнение движения синхронной машины в виде уравнения движения Лагранжа позволяет решать многие практические задачи о колебаниях ее ротора в неразрывной связи электрических параметров машины и механических параметров энергетического двигателя.

Свободные (собственные) колебания агрегата, имеющего связь с сетью, определяются формулой

$$\Delta\theta(t) = \Delta\theta\rho_0 e^{-\alpha t}\cos(\beta t - \psi_0), \tag{2.12.65}$$

где

$$\rho_0 = \sqrt{\left(\frac{1+a_0\alpha}{a_0\beta}\right)^2 + 1};\quad \psi_0 = \operatorname{arctg}\frac{1+a_0\alpha}{a_0\beta}; \tag{2.12.66}$$

$\alpha = D/2J$ — декремент затухания; $\beta = \sqrt{\omega_c^2 - \alpha^2}$ — частота свободных колебаний с затуханием; $\omega_c^2 = C/J$ — частота свободных колебаний. Период свободных колебаний рассчитывается как

$$T = \frac{2\pi}{\omega_c\sqrt{1-\left(\frac{\alpha}{\beta_c}\right)^2}} = \frac{T_0}{\sqrt{1-\left(\frac{\alpha}{\omega_c}\right)^2}},$$

где $T_0$ — период свободных колебаний системы без затухания.

Установившиеся колебания ротора синхронного агрегата, имеющего связь с сетью, под воздействием спектра периодических моментов $M_\nu$ на валу двигателя рассчитывается по формуле

$$\Delta\theta(t) = \sum_{\nu=1}^{k}\frac{M_\nu}{J}\rho_\nu\sin(\nu\omega_\mu t + \psi_\nu).$$

Амплитуды колебаний равны

$$\Delta\theta_\nu = \frac{M_\nu}{J}\rho_\nu = \frac{M_\nu}{J}\frac{1}{\sqrt{(\omega_c^2 - \nu^2\omega_\mu^2)^2 + \nu^2\omega_\mu^2 b^2}}, \tag{2.12.67}$$

где $\omega_\mu$ — угловая частота основной гармоники момента; $b = D/J$ — коэффициент затухания.

Амплитуды колебаний будут иметь предельные значения при соотношении

$$\nu\omega_\mu b - j(\omega_c^2 - \nu^2\omega_\mu^2) = 0,$$

т. е. для $\omega_c = \nu\omega_\mu$, когда частота свободных колебаний агрегата равна частоте одной из гармоник вращающего момента двигателя; фазовый угол сдвига при этом условии равен $\psi_\nu = \psi_\nu - \pi/2$.

Если численное значение амплитуды (2.12.67) выразить при помощи коэффициента усиления $\mu$, то

$$\Delta\theta_m = \mu\frac{M_\nu}{J\omega_c^2}. \tag{2.12.68}$$

Коэффициент усиления, определяемый при помощи (2.12.67), равен

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\left(1-\frac{\nu^2\omega_\mu^2}{\omega_c^2}\right)^2 + \left(\frac{b}{\omega_c}\right)^2\frac{\nu^2\omega_\mu^2}{\omega_c^2}}}. \tag{2.12.69}$$

Полученная форма коэффициента усиления позволяет использовать для анализа рассматриваемых колебаний синхронного агрегата обычные универсальные амплитудно-частотные кривые, представленные на рис. 2.12.16. По этим кривым



при известных основных параметрах агрегата $J$, $D$, $C$ можно определить коэффициент усиления $\mu$ и по формуле (2.12.68) — угол вылета ротора для возмущающей силы с известными амплитудой и частотой. Максимальное значение коэффициента усиления наступает при равенстве частот $\omega_c = \nu\omega_\mu$, а при отсутствии демпферного эффекта значение коэффициента безгранично возрастает.

Степень неравномерности вращения синхронного дизель-генератора, имеющего связь с сетью, рассчитывается по формуле

$$\delta_д = \frac{2\omega_\mu M_1}{\omega_{ср}}\frac{1}{\sqrt{(C - J\omega_\mu^2) + D^2\omega_\mu^2}}. \tag{2.12.70}$$

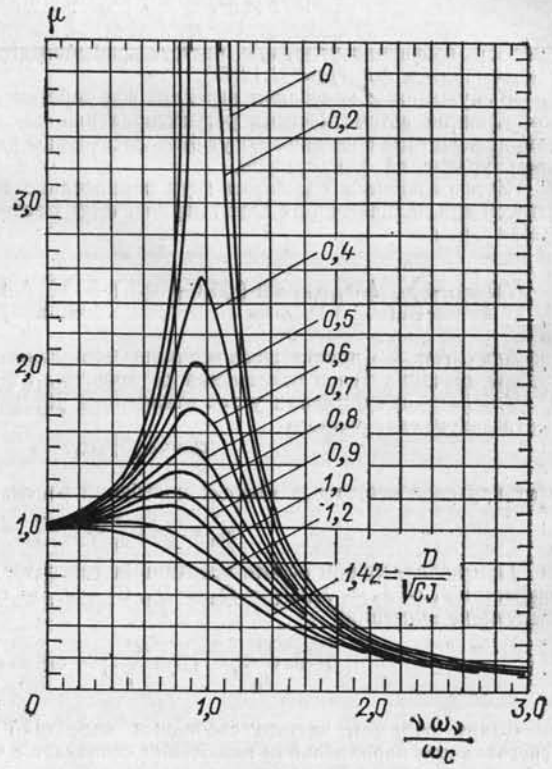



Рис. 2.12.16. Амплитудно-частотные зависимости, построенные для различных значений величины $\frac{2\alpha}{\omega_c} = \frac{D}{\sqrt{JC}}$.

Для генератора без демпферной обмотки здесь $D = 0$; в случае автономной работы агрегата, без связи с сетью, $C = 0$, и тогда

$$\delta_д = \frac{2M_1}{\omega_{ср}J\omega_\mu} \tag{2.12.71}$$

— обычная расчетная формула для определения степени неравномерности двигателя внутреннего сгорания.

Вынужденные колебания агрегата при появлении низкочастотного изменения вращающего момента в виде одиночного импульса определяются из уравнения

$$J\Delta\ddot{\theta} + D\Delta\dot{\theta} + C\Delta\theta = \Delta M_и\cdot 1(1-\tau_ц)$$

для замкнутых начальных условий в каждом периоде установившихся колебаний [36].

Для одного периода действия возмущающей силы отклонение угла вылета ротора равно

$$\Delta\theta(t) = -\frac{\Delta m_д}{\omega_c^2} + \frac{1}{\beta}\left[\left(\frac{\Delta m_д}{\omega_c} + \omega_c\,\Delta\theta_0\right)\sin(\beta t + \psi_c) + \Delta\dot{\theta}_0 \sin\beta t\right] e^{-\alpha t}, \tag{2.12.72}$$

где

$$\omega_c = \sqrt{CJ^{-1}}; \quad \alpha = 2DJ^{-1};$$

$$\beta = \sqrt{\omega_c^2 - \alpha^2}; \quad \psi_c = \operatorname{arctg}\frac{\beta}{\alpha}.$$

Скорость изменения угла, т. е. частота вращения агрегата, определяется дифференцированием формулы (2.12.72).

Вынужденные колебания агрегата под действием возмущающих сил с учетом влияния автоматических регуляторов напряжения (прямого компаундирования) и частоты вращения могут быть рассчитаны на основе (2.12.64) с дополнением уравнений регуляторов.

Установившиеся колебания двух параллельно включенных синхронных агрегатов при наличии на их валах периодических возмущающих сил описываются выражением

$$\Delta\theta = -\sum_{\nu=1}^{k} \Delta m_{\nu 1}\rho_{m1}\sin(\nu\omega_1 t + \psi_{m1}) + \sum_{\nu=1}^{k} \Delta m_{\nu 2}\rho_{m2}\sin(\nu\omega_2 t + \psi_{m2}),$$

где $\Delta m_{\nu 1}$, $\Delta m_{\nu 2}$ — приведенные величины возмущающих сил; $\rho_{m1}$, $\rho_{m2}$ — амплитудные значения углов отклонения роторов; $\psi_{m1}$, $\psi_{m2}$ — фазовые углы сдвига.

Амплитудные значения углов отклонения роторов зависят от общего декремента затухания, равного

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2,$$

и от круговой частоты свободных колебаний рассматриваемой системы

$$\omega_c = \sqrt{\omega_{c_1}^2 + \omega_{c_2}^2}.$$

При параллельной работе идентичных генераторных агрегатов имеют место равенства $J_1 = J_2 = J_0$, $D_1 = D_2 = D_0$, $C_1 = C_2 = C_0$, для которых получаются следующие значения:

$$\alpha = \frac{D_0}{J_0}; \quad C = \frac{C_0}{2}; \quad \omega_c^2 = \frac{C_0}{J_0}.$$

Таким образом, частота свободных колебаний идентичных генераторных агрегатов при параллельном включении совпадает с частотой свободных колебаний одного генератора при параллельном включении его с сетью, но декремент затухания процесса в два раза больше, чем у отдельно взятого агрегата. По этой причине и характеристическая частота параллельно включенных машин, которая фиксируется при экспериментальном исследовании на осциллограммах в виде колебаний частоты вращения, будет отличаться от характеристической частоты отдельно включенного генератора. Отношение этих величин определяется формулой

$$\frac{\beta_0}{\beta_{1\,(2)}} = \sqrt{\frac{1-\gamma}{1-0{,}25\gamma}}, \tag{2.12.73}$$

где $\gamma = \dfrac{D_{1\,(2)}^2}{C_{1\,(2)}J_{1\,(2)}}$ — квадрат комплексного параметра одного синхронного агрегата. График зависимости построен на рис. 2.12.17.

**Пример 4.** Рассчитать по амплитудно-частотным кривым колебания ротора дизельного агрегата при параллельной работе без нагрузки с выключенными автоматическими регуляторами частоты вращения и напряжения в случае недостаточного давления второго впрыска топлива.



Исходные данные. Дизель мощностью $N_{ном} = 225$ л. с. (165 кВт); $n_{ном} = 750$ об/мин; $i = 6$; $m = 0{,}5$; $\eta_д = 0{,}81$; $\alpha = 25°$. Отношение давления в цилиндре при последующем впрыске топлива к предыдущему $k_z = 0{,}4$. Порядок работы цилиндров 1—5—3—6—2—4. Частота вращения 720 об/мин.

Генератор мощностью $P = 150$ кВт, напряжением $U = 400$ В; $\cos\varphi = 0{,}8$; $p = 4$; $x_d = 1{,}44$; $x_q = 0{,}74$; $x'_d = 0{,}21$; $r_a = 0{,}012$; $T_{d0} = 1{,}57$ с; $J = 7{,}4$ Н·м·с²; $D = 15$ Н·м·с; $C_x = 1160$ Н·м.

А. Расчет при импульсном возмущающем моменте.

1. Круговая частота колебаний вращающего момента

$$\omega_\mu = \frac{\pi imn}{30} = \frac{3{,}14\cdot 6\cdot 0{,}5\cdot 720}{30} = 226\ c^{-1}.$$

2. Период колебаний вращающего момента двигателя

$$T_\mu = \frac{2\pi}{\omega_\mu} = \frac{6{,}28}{226} = 0{,}0278\text{ с}.$$

3. Период между последовательными вспышками в любом одном цилиндре двигателя

$$\tau_ц = iT_\mu = 6\cdot 0{,}0278 = 0{,}165\text{ с}.$$

4. Период между равными по величине $p_z$ (давления газов) вспышками в каждом цилиндре при недостаточности давления второго впрыска топлива

$$T_и = 2\tau_ц = 0{,}33\text{ с}.$$

5. Частота возмущающей силы

$$\omega_и = 2\pi T_и^{-1} = 19\ c^{-1}.$$

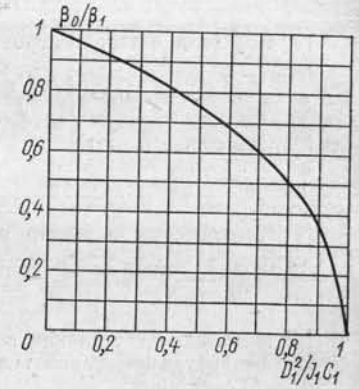



Рис. 2.12.17. Изменение характеристической частоты при параллельном включении однотипных генераторных агрегатов в зависимости от комплексного параметра.

6. Время действия импульсного момента при недостаточности давления второго впрыска топлива по всем цилиндрам двигателя

$$\tau_и = T_и - \tau_ц = 0{,}33 - 0{,}165 = 0{,}165\text{ с}.$$

7. Среднее значение вращающего момента двигателя на холостом ходу при номинальной частоте вращения

$$M_x = (1-\eta_д)M_{ном} = 716{,}2\,\frac{1-\eta_д}{\eta_д}\,\frac{N}{n} = 716{,}2\,\frac{0{,}19\cdot 225}{0{,}81\cdot 750} = 50\text{ Н·м}.$$

8. Снижение амплитуды вращающего момента двигателя при снижении давления газов до $k_z = 0{,}4$, определяемое ориентировочно с учетом постоянства сил инерции двигателя $F_j$ по диаграмме движущих сил двигателя

$$k_M = \frac{M}{M_{ном}} \approx \frac{k_z p_{z1} - F_j}{p_{z1} - F_j} = 0{,}17.$$

9. Среднее значение вращающего момента двигателя, обеспечивающего вращение его с частотой 720 об/мин (0,96), при уменьшении амплитуды вращающего момента двигателя до $1 - k_M$ вследствие недостаточности давления второго впрыска топлива (можно считать двигатель $2i$-цилиндровым, у которого $j = i$ цилиндров работают с нагрузкой $k_M$):

$$M_{x.\,ср} = M_x\,\frac{2i}{2i - j(1-k_M)}\left(\frac{n}{n_{ном}}\right) = 50\,\frac{12\cdot 0{,}96}{12 - 6\cdot 0{,}83} = 83\text{ Н·м}.$$

10. Периодический вращающий момент

$$\Delta M_{\text{и}} = (1 - k_M) M_{\text{х. ср}} = (1 - 0{,}17)\ 83 = 70\ \text{Н·м}.$$

11. Приведенное значение вращающего момента

$$\Delta m_{\text{и}} = \frac{\Delta M_{\text{и}}}{J} = \frac{70}{7{,}4} = 9{,}5\ \text{с}^{-2}.$$

12. Амплитудное значение приведенного возмущающего момента

$$\Delta m_{\text{п}} = \Delta m_{\text{и}} \frac{\tau_{\text{и}}}{T_{\text{и}}} = 9{,}5\ \frac{0{,}165}{0{,}33} = 4{,}75\ \text{с}^{-2}.$$

13. Круговая частота свободных колебаний агрегата (2.12.66)

$$\omega_{\text{с}} = \sqrt{\frac{\overline{C_{\text{х}}}}{J}} = \sqrt{\frac{1160}{7{,}4}} = 12{,}5\ \text{с}^{-1}.$$

14. Отношение частот

$$\frac{\omega_{\text{и}}}{\omega_{\text{с}}} = 1{,}52.$$

15. Комплексный параметр агрегата

$$\frac{D}{\sqrt{JC_{\text{х}}}} = \frac{15}{\sqrt{7{,}4 \cdot 1160}} = 0{,}137.$$

16. Коэффициент усиления по кривым рис. 2.12.16. $\mu = 0{,}75$.

17. Амплитуда колебаний угла вылета ротора по (2.12.68)

$$\Delta\theta_m = \mu \frac{\Delta m_{\text{п}}}{\omega_{\text{с}}^2} = 0{,}75\ \frac{4{,}75}{157} = 2{,}27 \cdot 10^{-2}.$$

**Пример 5.** Рассчитать колебания ротора утилизационного турбогенератора при колебаниях ротора синхронного валогенератора в энергетической установке супертанкера-теплохода.

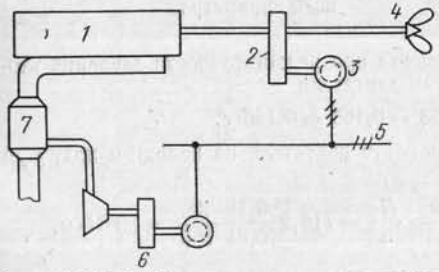



Рис. 2.12.18. Энергетическая установка супертанкера-теплохода водоизмещением 180 000 т с отбором мощности на судовую электростанцию.

*1* — главный двигатель; *2* — редуктор; *3* — синхронный валогенератор; *4* — гребной винт; *5* — шины электростанции; *6* — турбогенератор; *7* — утилизационный котел.

Исходные данные. Главный двигатель — двухтактный дизель мощностью 30 000 л. с. (22 080 кВт) при частоте вращения 100 об/мин. Синхронные валогенератор и турбогенератор — однотипные машины МСК-1875 мощностью 1875 кВ·А при 1500 об/мин. Схема энергетической установки приведена на рис. 2.12.18.

Параметры главного двигателя, валогенератора и турбогенератора следующие. Моменты инерции: главного дизеля $J_{\text{д}} = 35\,000$ Н·м·с$^2$, редуктора валогенератора $J_{\text{р. в}} = 0{,}155$ Н·м·с$^2$, роторов валогенератора и турбогенератора $J_{\text{в. г}} = J_{\text{т. г}} = 7{,}9$ Н·м·с$^2$, ротора турбины $J_{\text{т}} = 1{,}87$ Н·м·с$^2$, редуктора турбогенератора $J_{\text{р. т}} = 3{,}33$ Н·м·с$^2$. Постоянная времени главного двигателя совместно с гребным валом, гребным винтом и присоединенными массами воды $T_a = 1{,}8$ с. Коэффициенты передач редуктора валогенератора $i_{\text{р. в}} = 15$, редуктора турбогенератора $i_{\text{р. т}} = 5{,}67$. Синхронные жесткости валогенератора и турбогенератора $C_1 = C_2 = 2800$ Н·м. Демпферные коэффициенты $D_1 = D_2 = 275$ Н·м·с.



Вращающий момент на валу главного двигателя представлен гармонической функцией в системе относительных единиц, состоящей из трех составляющих [35]:

$$\Delta m_{\text{д}}(t) = 1 \sin 94t - 0{,}2 \sin 1{,}4t - 0{,}075 \sin 42t.$$

Расчет. 1. Синхронная жесткость между генераторами по (2.12.59).

$$C_{12} = C_{21} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = 1400\ \text{Н·м}.$$

2. Момент инерции системы главный дизель—редуктор—валогенератор, приведенный к валу генератора,

$$J_1 = \frac{1}{i_{\text{р.в}}^2} J_{\text{д}} + J_{\text{р. в}} + J_{\text{в. г}} = 163\ \text{Н·м·с}^2.$$

3. Момент инерции утилизационного турбогенератора

$$J_2 = i_{\text{р. т}}^2 J_{\text{т}} + J_{\text{р. т}} + J_{\text{т. г}} = 71\ \text{Н·м с}^2.$$

4. Система уравнений для параллельно работающих генераторов супертанкера, приведенная к валу турбогенератора (путем деления коэффициентов уравнения на номинальный вращающий момент $M_{\text{т. ном}} = 975$ Н·м), на основании (2.12.60):

$$0{,}17\,\Delta\ddot{\theta}_1 + 0{,}28\,(\Delta\dot{\theta}_1 - \Delta\dot{\theta}_2) + 1{,}43\,(\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) = 1 \sin 94t - 0{,}2 \sin 1{,}4t - 0{,}075 \sin 42t;$$

$$0{,}073\,\Delta\ddot{\theta}_2 - 0{,}28\,(\Delta\dot{\theta}_1 - \Delta\dot{\theta}_2) - 1{,}43\,(\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) = 0.$$

Решая эту систему уравнений, можно определить величину и характер колебаний роторов генераторов.

5. Решение можно упростить, принимая во внимание, что мощность турбогенератора по отношению к главному двигателю составляет 7,3%, и поэтому колебания частоты вращения и угла ротора валогенератора практически определяются изменением вращающего момента на гребном валу. Иными словами, валогенератор в данной установке будет «ведущей» машиной, а турбогенератор — «ведомой». При таком условии движение ротора валогенератора можно рассматривать отдельно. Без учета влияния автоматического регулятора частоты вращения дизеля уравнение движения будет соответствовать выражению

$$T_a\dot{\varphi} = 1{,}8\dot{\varphi} = 1 \sin 94t - 0{,}2 \sin 1{,}4t - 0{,}075 \sin 42t.$$

Отсюда, пренебрегая малой амплитудой лопастных пульсаций, можно найти

$$\varphi(t) = -0{,}006 \cos 94t + 0{,}08 \cos 1{,}4t.$$

6. Изменения частоты вращения и угла вылета ротора валогенератора

$$\Delta\dot{\theta}_1 = \omega_{\text{г. ном}}\varphi(t) = -0{,}93 \cos 94t + 12{,}4 \cos 1{,}4t;$$

$$\Delta\theta_1 = \int \Delta\dot{\theta}_1\, dt \approx 8{,}85 \sin 1{,}4t.$$

7. Уравнение колебаний турбогенератора при его параллельной работе с валогенератором получается подстановкой значений $\Delta\theta_1$ и $\Delta\dot{\theta}_1$ во второе уравнение п. 4:

$$0{,}073\,\Delta\ddot{\theta}_2 + 0{,}28\,\Delta\dot{\theta}_2 + 1{,}43\,\Delta\theta_2 = -0{,}264 \cos 94t + 3{,}5 \cos 1{,}4t + 12{,}6 \sin 1{,}4t.$$

Это уравнение движения имеет простое решение, но построение графиков $\Delta\theta$, $\Delta\dot{\theta}$, $\Delta\ddot{\theta}$ и анализ параметров системы, влияющих на характер движения, весьма трудоемки. В этом случае можно провести моделирование процесса на АВМ.

8. Уравнение п. 7 приводится к машинному виду

$$\Delta\ddot{\theta}_2 = -b_1\Delta\dot{\theta}_2 - b_0\Delta\theta_2 + b(-0{,}264\cos 94t + 3{,}5\cos 1{,}4t + 12{,}6\sin 1{,}4t),$$

где $b_1 = 3{,}9$; $b_0 = 19{,}8$; $b = 13{,}8$ и начальные условия $\Delta\theta_2(0) = 0$; $\Delta\dot{\theta}_2(0) = 0$.

9. Схема набора на моделирующей ЭВМ типа МН=10 представлена на рис. 2.12.19.

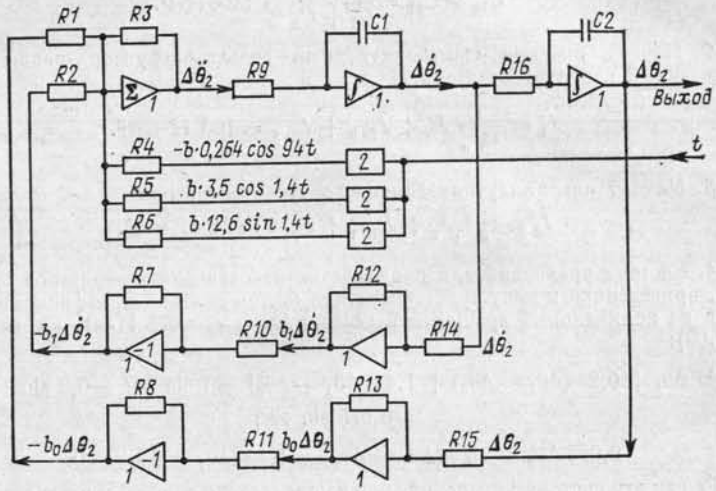



Рис. 2.12.19. Схема набора на АВМ уравнения колебаний синхронного утилизационного турбогенератора при параллельной работе его с синхронным валогенератором.

10. Осциллограмма, получаемая при решении уравнения п. 8 на АВМ, приведена на рис. 2.12.20. Для определения угла расхождения роторов генераторов при их колебаниях на осциллограмме нанесена расчетная кривая $\Delta\theta_1(t)$ изменения угла вылета ротора валогенератора, построенная по формуле п. 6.

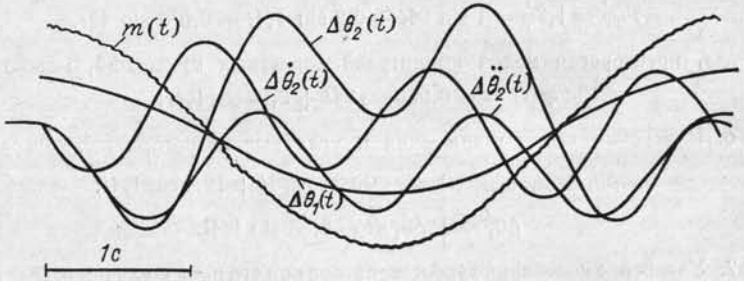



Рис. 2.12.20. Осциллограмма колебаний ротора турбогенератора при параллельной работе с валогенератором.

Геометрическая разность графиков $\Delta\theta_1(t) - \Delta\theta_2(t)$ соответствует углу расхождения между роторами генераторов $\Delta\theta_{12} = \Delta\theta_1 - \Delta\theta_2$.

Из сопоставления графиков видно, что угол расхождения роторов генераторов $\Delta\theta_{12}$ превышает 90 эл. град, что свидетельствует о нарушении синхронизма между машинами при шестибалльном волнении моря.



**Пример 6.** Рассчитать колебания роторов при параллельной работе трех синхронных дизель-генераторов: двух мощностью 450 л. с. (331 кВт) и одного мощностью 225 л. с. (165 кВт).

Исходные данные. Один из трех дизель-генераторов, а именно мощностью 165 кВт имеет недостаточное давление второго впрыска топлива, что является причиной колебаний его ротора. Возмущающая сила на его валу может быть описана гармонической функцией

$$\Delta M_д(t) = \frac{\Delta M_н}{2}\sin\omega_н t = 35\sin 19t.$$

На валах остальных двух агрегатов возмущающая сила отсутствует.

Необходимые для расчета параметры параллельно работающих дизель-генераторов следующие:

| | № 1 и 2 | № 3 |
|---|---|---|
| Момент инерции $J$, Н·м·с² | 45,3 | 7,4 |
| Демпферный коэффициент $D$, Н·м·с | 308 | 15 |
| Синхронная жесткость $C$, Н·м | 6360 | 1160 |

Параметры, относящиеся к агрегатам мощностью 331 кВт, имеют индексы 1 и 2, а к агрегату мощностью 165 кВт — индекс 3.

Расчет. 1. Синхронная жесткость между генераторами по (2.12.59)

$$C_{12} = C_{21} = 3180 \text{ Н·м};$$
$$C_{13} = C_{31} = 982 \text{ Н·м};$$
$$C_{23} = C_{32} = 982 \text{ Н·м}.$$

2. Система уравнений движения роторов агрегатов на основании (2.12.61)—(2.12.64)

$$45{,}3\,\Delta\ddot{\theta}_1 + 308(\Delta\dot{\theta}_1 - \Delta\dot{\theta}_2) + 308(\Delta\dot{\theta}_1 - \Delta\dot{\theta}_3) + 3180(\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) + 982(\Delta\theta_1 - \Delta\theta_3) = 0;$$

$$45{,}3\,\Delta\ddot{\theta}_2 - 308(\Delta\dot{\theta}_1 - \Delta\dot{\theta}_2) + 308(\Delta\dot{\theta}_2 - \Delta\dot{\theta}_3) - 3180(\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) + 982(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3) = 0;$$

$$7{,}4\,\Delta\ddot{\theta}_3 - 15(\Delta\dot{\theta}_1 - \Delta\dot{\theta}_3) - 15(\Delta\dot{\theta}_2 - \Delta\dot{\theta}_3) - 982(\Delta\theta_1 - \Delta\theta_3) - 982(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_3) = 35\sin 19t.$$

3. Начальные условия $\Delta\theta_1(0) = 0$; $\Delta\theta_2(0) = 0$; $\Delta\theta_3(0) = 0$, а также $\Delta\dot{\theta}_1(0) = 0$; $\Delta\dot{\theta}_2(0) = 0$; $\Delta\dot{\theta}_3(0) = 0$.

4. Решение выполнено на ЭЦВМ «Минск-22». Из решения следует, что максимальные колебания ротора, достигающие 25 эл. град, имеет дизель-генератор мощностью 165 кВт, колебания роторов дизель-генераторов мощностью 331 кВт не превышает 15 эл. град — имеют место устойчивые колебания роторов агрегатов.

## § 2.12.6. РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПРИ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ ГЕНЕРАТОРОВ И СИНХРОНИЗАЦИИ ЧЕРЕЗ РЕАКТОР

Включение генераторов на параллельную работу методом самосинхронизации обусловливает резкое сокращение длительности этой операции, но вызывает значительное снижение напряжения на шинах электростанции. Вследствие этого метод самосинхронизации генераторов не нашел широкого распространения в судовых электростанциях, однако в ряде специфических

установок, например в гребных электрических с отбором мощности в судовую сеть, метод может применяться.

Особенности протекания электромагнитного переходного процесса самосинхронизации генераторов позволяют пренебречь при составлении уравнений влиянием сверхпереходных процессов, изменением частоты вращения и скольжения и считать, что включение синхронизируемого генератора происходит в момент ориентации его ротора в направлении вектора магнитного поля обмотки статора, т. е. в момент, когда угол между роторами равен нулю или 180 эл. град. Поэтому необходимо рассматривать переходный процесс по продольным осям работающего и подключаемого генераторов, т. е. в самом тяжелом случае самосинхронизации. При таких допущениях переходный процесс описывается третьим уравнением Горева—Парка с учетом соотношений из векторной диаграммы машины




Рис. 2.12.21. Схема замещения цепи при самосинхронизации генераторов (*а*) и вольт-секундная характеристика подключаемого генератора с машинным возбуждением (*б*).
– – – – – действительная характеристика;
——— аппроксимирующая характеристика.

в пренебрежении активными сопротивлениями цепи. На рис. 2.12.21 показана схема замещения для расчета процессов при самосинхронизации генераторов. Для работающего генератора [37]

$$T_{d1}\frac{dE'_{q1}}{dt}+E_{q1}=U_{в1}(t);$$

$$E_{q1}-x_{d1}I=U;$$

$$E'_{q1}-x'_{d1}I=U;$$

для подключаемого генератора

$$T_{d2}\frac{de'_{q2}}{dt}+e_{q2}=U_{в2}(t);$$

$$e_{q2}+x_{dц}I=U;$$

$$e'_{q2}+x'_{d\,ц}I=U,$$

где $e_{q2}$, $e'_{q2}$ — ЭДС остаточного намагничивания соответственно за синхронным и переходным индуктивными сопротивлениями подключаемого генератора; $x_{dц}=x_{d2}+x_ц$; $x'_{dц}=x'_{d2}+x_ц$ — суммарные значения индуктивных сопротивлений в цепи подключаемого генератора; $x_ц$ — индуктивное сопротивление цепи; $T_{d1}$, $T_{d2}$ — постоянные времени обмоток возбуждения генераторов при разомкнутых обмотках статоров; $U_{в1}(t)$, $U_{в2}(t)$ — вольт-секундные характеристики цепей возбуждения генераторов.

Начальное значение тока

$$I_0=\frac{E'_{q1}\pm e'_{q2}}{x'_{d1}+x'_{dц}}. \qquad (2.12.74)$$



Напряжение в момент включения генератора

$$U_0=\frac{E'_{q1}x'_{dц}\pm e'_{d2}x'_{d1}}{x'_{d1}+x'_{d\,ц}}, \qquad (2.12.75)$$

Для работающего генератора с прямым компаундированием напряжение возбуждения определяется

$$U_{в1}(t)=U_{в\,max1}=U_0+k_{I1}I_0, \qquad (2.12.76)$$

где коэффициент токового компаундирования равен (рис. 2.12.5)

$$k_{I1}=\sqrt{U^2_{в.\,ном}-\cos^2\varphi_{ном}}-\sin\varphi_{ном}. \qquad (2.12.77)$$

Максимальное значение возбуждения может быть ограничено насыщением трансформаторов системы компаундирования. Подключаемый генератор с прямым компаундированием с момента включения получает возбуждение, пропорциональное броску тока в цепи, т. е.

$$U_{в2}(t)=U_{в\,max\,2}=k_{I2}I_0. \qquad (2.12.78)$$

Для генераторов с машинным возбуждением вольт-секундная характеристика работающего генератора определяется выражением (2.12.15), в котором для данного случая с целью упрощения расчетов можно принять $\tau=0$, т. е. пренебречь запаздыванием действия автоматического регулятора напряжения; вольт-секундная характеристика подключаемого генератора при помощи единичной функции запаздывания может быть выражена следующей зависимостью:

$$U_{в2}(t)=U_{в.\,ост}1(t)+\Delta U_{в\,max}1(t-\tau_з), \qquad (2.12.79)$$

где $U_{в.\,ост}$ — возбуждение, определяемое остаточным намагничиванием стали ротора машины, которое в системе относительных единиц равно значению ЭДС остаточного намагничивания $e_{q0}$; $\Delta U_{в\,max}$ — разность между потолочным значением возбуждения и возбуждением от остаточного намагничивания; $\tau_з$ — время запаздывания, т. е. время, которое протекает с момента включения генератора в сеть до момента подачи ему возбуждения.

Тогда расчетные формулы изменения напряжения при самосинхронизации имеют вид для генераторов с саморегулированием

$$U(t)=A-Ce^{-\nu t}+De^{-\mu t}; \qquad (2.12.80)$$

для генераторов с машинным возбуждением

$$U(t)=A+B[t-(t-\tau_m)\cdot1(t-\tau_m)]-Ce^{-\nu t}+De^{-\mu t}+$$
$$+K\left[e^{-\nu t}-e^{-\nu(t-\tau_m)\cdot1(t-\tau_m)}\right]-L\left[e^{-\mu t}-e^{-\mu(t-\tau_m)\cdot1(t-\tau_m)}\right]-$$
$$-Ne^{-\nu(t-\tau_з)\cdot1(t-\tau_з)}+Me^{-\mu(t-\tau_з)\cdot1(t-\tau_з)}, \qquad (2.12.81)$$

где $A$, $B$, $C$, $D$, $K$, $L$, $M$, $N$ — коэффициенты, определяемые параметрами цепей генераторов; $\nu$, $\mu$ — декременты затухания (величины, обратные постоянным времени обмоток возбуждения с учетом взаимовключенных обмоток статоров генераторов).

Коэффициенты в уравнении (2.12.80) определяются равенствами

$$\left.\begin{aligned}A&=\frac{x_{d\,ц}U_{в\,max\,1}+x_{d1}U_{в\,max\,2}}{x_{d1}+x_{dц}};\\ C&=U_0\frac{\nu^2-a\nu+b}{2\nu y};\quad D=U_0\frac{\mu^2-a\mu+b}{2\mu y},\end{aligned}\right\} \qquad (2.12.82)$$

где

$$\left.\begin{aligned}a&=\frac{x_{d\,ц}T_{d1}U_0+x'_{d1}U_{в\,max\,2}+x'_{d1}T_{d2}U_0+x'_{d\,ц}U_{в\,max\,1}}{(x'_{d1}+x'_{d\,ц})T_{d1}T_{d2}U_0};\\ b&=\frac{x_{d\,ц}U_{в\,max\,1}+x_{d1}U_{в\,max\,2}}{(x'_{d1}+x'_{d\,ц})T_{d1}T_{d2}U_0},\end{aligned}\right\} \qquad (2.12.83)$$

а коэффициент в уравнении (2.12.81) — равенствами

$$\left.\begin{aligned} A &= \frac{x_{d\,ц}U_{в\,о} + x_{d1}e_{q2} + x_{d1}\Delta U_{в\,max}}{x_{d1} + x_{d\,ц}}; \\ B &= \frac{x_{d\,ц}k}{x_{d1} + x_{d\,ц}}; \\ C &= U_0\frac{\nu^2 - a\nu + b}{2\nu y}; \quad D = U_0\frac{\mu^2 - a\mu + b}{2\mu y}; \\ K &= \frac{x'_{d4}\,kT_{d2}(c-\nu)}{2\nu^2\alpha_x y}; \quad L = \frac{x'_{d\,ц}kT_{d2}(c-\mu)}{2\mu^2\alpha_x y}; \\ N &= \frac{x'_{d1}\,\Delta U_{в\,max}T_{d1}(d-\nu)}{2\nu\alpha_x y}; \\ M &= \frac{x'_{d1}\,\Delta U_{в\,max}T_{d1}(d-\mu)}{2\mu\alpha_x y}, \end{aligned}\right\} \quad (2.12.84)$$

где

$$\left.\begin{aligned} a &= \frac{x_{d\,ц}T_{d1}U_0 + x'_{d1}e_{q2} + x_{d1}T_{d2}U_0 + x'_{d\,ц}U_{в0}}{(x'_{d1} + x'_{d\,ц})\,T_{d1}T_{d2}U_0}; \\ b &= \frac{x_{d\,ц}U_{в0} + x_{d1}e_{q2}}{(x'_{d1} + x'_{d\,ц})T_{d1}T_{d2}U_0}; \\ c &= \frac{x_{d\,ц}}{x'_{d\,ц}T_{d2}} = \frac{1}{T'_{d2}}; \\ d &= \frac{x_{d1}}{x'_{d1}T_{d1}} = \frac{1}{T'_{d1}}. \end{aligned}\right\} \quad (2.12.85)$$

Декременты затухания $\nu$ и $\mu$, входящие в указанные коэффициенты, могут быть представлены в виде

$$\nu = x - y; \quad \mu = x + y, \quad (2.12.86)$$

где

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{\beta_x}{2\alpha_x}; \quad y = \frac{\sqrt{\beta_x^2 - 4\alpha_x(x_{d1} + x_{d\,ц})}}{2\alpha}; \\ \alpha_x &= (x'_{d1} + x'_{d\,ц})\,T_{d1}T_{d2}; \\ \beta_x &= (x'_{d1} + x_{d\,ц})\,T_{d1} + (x'_{d\,ц} + x_{d1})\,T_{d2}. \end{aligned}\right\} \quad (2.12.87)$$

При расчете изменения напряжения генераторов с машинным возбуждением до момента подачи возбуждения подключаемому генератору следует в коэффициентах $A$, $N$, $M$ принять $\Delta U_{в\,max} = 0$, а величину $T_{d2}$ рассчитывать по формуле

$$T_{d2} = T_{dR} = \frac{r_в}{r_в + r_р}T_{d02}. \quad (2.12.88)$$

Для расчета изменения напряжения на шинах электростанции в случае включения генератора через индуктивное сопротивление $x_р$ (реактор) служит выражение (2.12.75), если учесть, что ЭДС включаемого генератора не равна нулю, и принять наиболее тяжелый случай включения, когда роторы генераторов находятся в противофазе, т. е.

$$U_0 = \frac{(x_{d2} + x_р)\,E'_{q1} - x'_{d1}E'_{q2}}{x'_{d1} + x'_{d2} + x_р} \quad (2.12.89)$$



или

$$\Delta U_0 = \frac{2x'_{d1}}{x'_{d1} + x'_{d2} + x_р}. \quad (2.12.90)$$

Бросок тока в цепи рассчитывается по формуле

$$I_0 = \frac{E'_{q1} + E'_{q2}}{x'_{d1} + x'_{d2} + x_р}. \quad (2.12.91)$$

В случае подключения через реактор к генератору большой мощности генератора малой мощности может оказаться, что пик тока превысит величину уставки максимальной защиты последнего. Если допустимую кратность тока для этого генератора обозначить $k_{j2}$, то необходимую величину сопротивления реактора для ограничения тока можно определить по формуле

$$x_р = \frac{2}{k_{j2}k_0} - (x'_{d1} + x'_{d2}), \quad (2.12.92)$$

где $k_0 = S_2/S_1$ — коэффициент соизмеримости генераторов по мощности.

Сопротивление реактора по условию допустимого снижения напряжения на шинах электростанции может быть установлено из выражения (2.12.89):

$$x_р = \frac{2x'_{d1}}{\Delta U_0} - (x'_{d1} + x'_{d2}), \quad (2.12.93)$$

где $\Delta U_0$ — допустимое снижение напряжения.

Сопротивление реактора должно быть выбрано таким, чтобы уравнительный ток и соответственно снижение напряжения при включении генераторов не превосходили допустимых величин, а синхронизирующие силы были достаточны для надежной синхронизации генераторов.

Влияние сопротивления реактора на синхронную связь между работающими и подключаемым генераторами можно иллюстрировать при помощи выражения для синхронной жесткости (2.12.55), написанного для случая включения генератора в сеть через индуктивное сопротивление: для явнополюсной машины

$$C = \frac{U_c E_{q0}}{x_{dр}}\cos\theta_0 + \frac{U_c^2\,(x_d - x_q)}{x_{dр}x_{qр}}\cos 2\theta_0, \quad (2.12.94)$$

где $x_{dр} = x_d + x_р$, $x_{qр} = x_q + x_р$; для неявнополюсной машины в этом выражении надо положить $x_d = x_q$.

Таким образом, величина синхронной связи, удерживающей генераторы при параллельной работе, зависит от сопротивления реактора $x_р$ и будет тем меньше, чем больше это сопротивление.

Выбор сопротивления реактора для случая включения на параллельную работу двух синхронных генераторов производится по значению общей синхронной жесткости между ними. Для генераторов с постоянным возбуждением имеем

$$C_{12} \geqslant \frac{\Delta P_{12}}{\Delta\theta_{12}}, \quad (2.12.95)$$

где $\Delta P_{12}$ — суммарная нагрузка генераторов. При известной жесткости работающего генератора можно определить необходимую синхронную жесткость включаемого генератора:

$$C_2 \geqslant \frac{C_1\,\Delta P_{12}}{C_1\,\Delta\theta_{12} - \Delta P_{12}} \quad (2.12.96)$$

и величину сопротивления реактора

$$x_р \leqslant a_x + \sqrt{a_x^2 + b_x}, \quad (2.12.97)$$

где

$$a_x = \frac{U_c E_{q0} \cos\theta_0 - (x_d + x_q) C}{2C};$$

$$b_x = \frac{x_q \left(U_c E_{q0} \cos\theta_0 - x_d C\right) + \left(x_d - x_q\right) U_c^2 \cos 2\theta_0}{C}.$$

Для ненагруженного генератора, когда его напряжение и ЭДС равны единице, сопротивление реактора

$$x_p \leqslant \frac{1}{C} - x_q. \qquad (2.12.98)$$

**Пример 7.** Рассчитать изменения напряжения и броска тока при самосинхронизации генератора электростанции с шинами отбора мощности гребной электрической установки (ГЭУ).

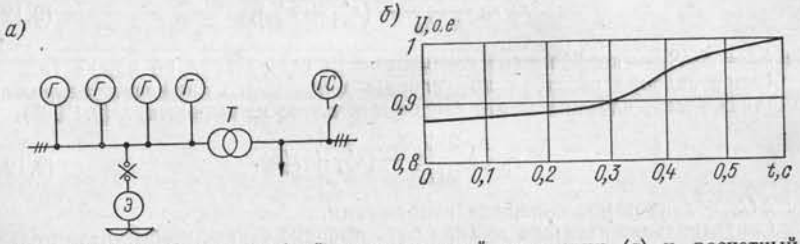



Рис. 2.12.22. Схема гребной электрической установки (*а*) и расчетный график изменения напряжения на шинах электростанции при самосинхронизации генератора электростанции с шинами гребной электрической установки через трансформатор мощности (*б*).

Исходные данные. Генераторы ГЭУ работающие: четыре однотипных генератора общей мощностью $S_г = 4 \cdot 1300 = 5200$ кВ·А, соединенные по схеме рис. 2.12.22, *а*. Параметры каждого генератора: $U_г = 3150$ В; $x_{dг} = 0{,}7$; $x'_{dг} = 0{,}23$; $x_{qг} = 0{,}46$; $T_{d1} = 1{,}7$ (обозначение $T_{d1}$ соответствует $T_{d0}$); нагрузка генератора — синхронный гребной электродвигатель, потребляющий мощность $S_э = 5000$ кВ·А при $U_э = 3150$ В и $\cos\varphi_э = 1$; возбуждение генераторов при самосинхронизации не изменяется.

Трансформатор мощностью $S_т = 560$ кВ·А, коэффициент трансформации $k_U = 13{,}7$; напряжение короткого замыкания (реактивное сопротивление) $e_{к.з} = x_т = 5{,}5\%$; величина и коэффициент мощности нагрузки, отдаваемой ГЭУ через трансформатор вспомогательной электростанции, соответственно равны: $S_{т.н} = 260$ кВ·А, $\cos\varphi_{т.н} = 0{,}77$.

Подключаемый генератор с машинным возбуждением и с АРН. Параметры генератора: $S_г = 280$ кВ·А; $U_2 = 230$ В; $x_{d2} = 1{,}46$; $x'_{d2} = 0{,}2$; $T_{d02} = 1{,}3$ с; $e_{d2} = 0{,}05$; $r_в = 0{,}206$ Ом; $r_р = 0{,}824$ Ом; $\Delta U_{в\,max} = 4{,}20$; $\tau_э = 0{,}3$ с; сопротивление цепи между трансформатором и генератором $x_ц = 0{,}05$.

Расчет первоначального снижения напряжения на шинах электростанции и броска тока в цепи. 1. Сопротивления нагрузки эквивалентного генератора ГЭУ мощностью 5200 кВ·А: гребного электродвигателя

$$z_э = \frac{S_г}{S_э}\left(\frac{U_э}{U_г}\right)^2 = 1{,}04; \quad r_э = z_э \cos\varphi_э = 1{,}04, \quad x_э = 0,$$

трансформатора отбора мощности

$$z_{т.н} = \frac{S_г}{S_{т.н}} = 20; \quad r_{т.н} = 15{,}4, \quad x_{т.н} = 12{,}8;$$



общие сопротивления

$$g_{э.н} = \frac{r_э}{z_э^2} + \frac{r_{т.н}}{z_{т.н}^2} \approx 1;$$

$$b_{э.н} = \frac{x_э}{z_э^2} + \frac{x_{т.н}}{z_{т.н}^2} = 0{,}03;$$

$$z_н = \frac{1}{\sqrt{g_{э.н}^2 + b_{э.н}^2}} \approx 1; \quad r_н = g_{э.н} z_н^2 = 1;$$

$$x_н = b_{э.н} z_н^2 = 0{,}03.$$

2. ЭДС за переходной реактивностью работающего (эквивалентного) генератора по (2.12.5) и напряжение возбуждения его до начала процесса по (2.12.2):

$$E'_{qн} = \frac{x'_{dн} x_{qн} + r_н^2}{z_н \sqrt{x_{qн}^2 + r_н^2}} = 1{,}01;$$

$$U_{в0} = \frac{x_{dн} x_{qн} + r_н^2}{z_н \sqrt{x_{qн}^2 + r_н^2}} = 1{,}13,$$

где

$$x'_{dн} = x'_{dг} + x_н = 0{,}26; \quad x_{qн} = x_{qг} + x_н = 0{,}49; \quad x_{dн} = x_{dг} + x_н = 0{,}73.$$

3. Сопротивления схемы, приведенные к базисным величинам, за которые принимаются параметры подключаемого генератора,

$$x_{dг*} = x_{dг} \frac{S_2}{k_U^2 S_г}\left(\frac{U_г}{U_2}\right)^2 = 0{,}37;$$

$$x'_{dг_*} = 0{,}012;$$

$$x_{т*} = x_т \frac{S_2}{S_т}\left(\frac{U_г}{U_2}\right)^2 = 0{,}027.$$

4. Полные реактивные сопротивления схемы

$$x_{dц} = x_{d2} + x_ц = 1{,}51; \quad x'_{dц} = x'_{d2} + x_ц = 0{,}25; \quad x_{d1} = x_{dг*} + x_{т*} = 0{,}065;$$

$$x'_{d1} = x'_{dг_*} + x_{т_*} = 0{,}04.$$

5. Напряжение на шинах электростанции при подключении генератора по (2.12.75) $U_0 = 0{,}875$.

6. Бросок тока в цепи при подключении генератора по (2.12.74) $I_0 = 3{,}31$.

Расчет изменения напряжения. Этот расчет проводится в два этапа: первый этап от начала процесса до момента подачи возбуждения подключаемому генератору ($t \leqslant \tau_э = 0{,}3$ с), когда его обмотка возбуждения включена на разрядное сопротивление. Постоянная времени обмотки возбуждения вычисляется с учетом этого сопротивления по (2.12.88), коэффициенты уравнения вычисляются по (2.12.84) для $\Delta U_{в\,max} = 0$.

На втором этапе рассчитывается изменение напряжения с момента подачи возбуждения синхронизируемому генератору ($t > \tau_э = 0{,}3$ с), когда обмотка возбуждения последнего переключается с разрядного сопротивления на якорь возбудителя; коэффициенты уравнения вычисляются по (2.12.84)—(2.12.87) для $T_{d2} = T_{d02}$.

В связи с условием постоянства напряжения возбуждения электромашин гребной электрической установки в коэффициентах уравнений (2.12.84) следует принять $k = 0$ и коэффициенты $B$, $K$, $L$ из уравнений исключаются.

7. Постоянные времени переходного процесса включаемого генератора по (2.12.88) до включения возбуждения ($t \leqslant 0{,}3$ с) $T_{d2} = T_{dR} = 0{,}25$ с; после включения возбуждения ($t > 0{,}3$ с) $T_{d2} = T_{d02} = 1{,}3$ с.

8. Значения коэффициентов расчетных уравнений до и после подачи возбуждения синхронизируемому генератору по формулам (2.12.84)—(2.12.87) сведены в табл. 2.12.3.

*Таблица 2.12.3*

**Коэффициенты расчетных уравнений**

| Коэффициенты | До включения возбуждения генератора | После включения возбуждения генератора | Коэффициенты | До включения возбуждения генератора | После включения возбуждения генератора |
|---|---|---|---|---|---|
| $\alpha_x$ | 0,129 | 0,64 | $b$ | 15,3 | 3,03 |
| $\beta_x$ | 2,72 | 3,05 | $d$ | — | 0,956 |
| $x$ | 10,5 | 2,38 | $A$ | 1,09 | 1,26 |
| $y$ | 9,9 | 1,8 | $C$ | 0,23 | 0,24 |
| $\nu$ | 0,6 | 0,58 | $D$ | 0,014 | 0,025 |
| $\mu$ | 20,4 | 4,18 | $N$ | — | 0,08 |
| $a$ | 20,8 | 4,8 | $M$ | — | 0,09 |

9. Изменение напряжения до подачи возбуждения синхронизируемому генератору рассчитывается по формуле (2.12.81):

$$U(t) = 1{,}09 - 0{,}23e^{-0{,}6t} + 0{,}014e^{-20{,}4t},$$

где $t < 0{,}3$ с.

10. Изменение напряжения после подачи возбуждения синхронизируемому генератору — по формуле (2.12.81):

$$U(t) = 1{,}26 - 0{,}24e^{-0{,}58t} + 0{,}025e^{-4{,}18t} - 0{,}08e^{-0{,}58\,(t-0{,}3)\,1\,(t-0{,}3)} - 0{,}09e^{-4{,}18\,(t-0{,}3)\,1\,(t-0{,}3)},$$

где $t > 0{,}3$ с.

При правильно вычисленных коэффициентах уравнения для момента времени $t = 0$ должно быть $U(0) = U_0$; здесь $U(0) = 0{,}874$, а $U_0 = 0{,}875$.

По полученным уравнениям рассчитан и построен график на рис. 2.12.22, *б*.

**Пример 8.** Рассчитать сопротивление реактора для включения генераторов судовой электростанции на параллельную работу.

I. Рассчитать сопротивление реактора по условию снижения напряжения на шинах электростанции.

Исходные данные. Генератор работающий, мощностью $S_1 = 125$ кВ·А; $U_1 = 230$ В; $I_1 = 314$ А; $x'_{d1} = 0{,}1$. Генератор включаемый, мощностью $S_2 = 30$ кВ·А; $U_2 = 230$ В; $I_2 = 75{,}3$ А; $x'_{d2} = 0{,}114$.

Расчет. 1. За базисную мощность принимается номинальная мощность работающего генератора $S_1 = 125$ кВ·А. Коэффициент соизмеримости

$$k_0 = \frac{S_2}{S_1} = \frac{30}{125} = 0{,}24.$$

2. Приведенное значение переходной продольной реактивности подключаемого генератора

$$x'_{d2*} = \frac{x'_{d2}}{k_0} = 0{,}475.$$



3. Допустимое снижение напряжения по Правилам Регистра СССР равно 20%. Тогда сопротивление реактора по (2.12.93) $x_p = 0{,}425$.

4. Пик тока в цепи генераторов для этого сопротивления реактора по (2.12.91)

$$I_0 \approx \frac{2}{x'_{d1} + x'_{d2*} + x_p} = 2,$$

кратность его относительно номинального тока синхронизируемого генератора

$$k_{j2} = \frac{I_0}{k_2} = 8{,}33.$$

Эта величина недопустима по условиям нормальной работы защиты генератора.

5. Принимаем $k_{j2} = 2$. Тогда необходимое сопротивление реактора по (2.12.92)

$$x_p = \frac{2}{k_{j2}k_0} - (x'_{d1} + x'_{d2}) = 3{,}6.$$

6. Снижение напряжения по (2.12.90) $\Delta U_0 = 0{,}05$. Таким образом, при сопротивлении реактора на одну фазу, равном

$$x_p = x_{p*}\frac{U_1^2}{S_1 \cdot 10^3} = 3{,}6\,\frac{230^2}{125 \cdot 10^3} = 1{,}53 \text{ Ом},$$

где $x_{p*}$ — величина в относительных единицах, провал напряжения при заданной кратности пика тока подключаемого генератора составит около 5%.

Расчет реактора для включения на параллельную работу должен быть дополнен расчетом по условию обеспечения синхронизма машин. Пример подобного расчета помещается ниже.

II. Рассчитать параметры реактора по условию достаточной синхронной связи между дизель-генераторами.

Исходные данные. Генераторы мощностью $S_г = 375$ кВ·А; $U = 400$ В; $I = 542$ А; $x_d = 1{,}24$; $x_q = 0{,}882$; $x'_d = 0{,}239$; $r_a = 0{,}014$; включенный на шины агрегат имеет нагрузку $\lambda_1 = 1$, а включаемый не имеет нагрузки ($\lambda_2 = 0$); степень неравномерности характеристик регуляторов частоты вращения двигателей $\delta_{r1} = \delta_{r2} = 2\%$, степень нечувствительности $\varepsilon = 0{,}6\%$.

Расчет. 1. Возбуждение работающего генератора с заданной нагрузкой $S_1 = 1$ (при $\cos\varphi = 0{,}8$) по формуле (2.12.2) $E_{q01} = 2{,}01$ (в расчетную формулу подставляются $x_{d\text{н}1} = 1{,}84$; $x_{q\text{н}1} = 1{,}48$; $r_{a.\text{н}1} = 0{,}814$).

2. Угол вылета ротора при номинальной нагрузке работающего генератора по (2.12.1) $\theta = 24°\,40'$.

3. Синхронная жесткость работающего генератора в номинальном режиме по (2.12.55) $C_1 = 1{,}683$.

4. Максимальный угол вылета ротора, при котором наступает предел мощности с данным возбуждением,

$$\theta_{max} = \arccos\left(\sqrt{e_x^2 + 0{,}5} - e_x\right) = 79°20' = 1{,}38 \text{ рад},$$

где

$$e_x = \frac{x_{qp}E_{q0}}{4\,(x_d - x_q)\,U} = 1{,}24.$$

5. Предел мощности работающего генератора для $x_p = 0$

$$P = \frac{U E_q \sin\theta_{max}}{x_{dp}} + \frac{U^2\,(x_d - x_q)\,\sin 2\theta_{max}}{2x_{dp}x_{qp}} = 1{,}65.$$

6. Предельно допустимый угол вылета генератора при данной синхронной жесткости

$$\Delta\theta_1 = \frac{\Delta P}{C_1} = \frac{P_{max} - P_{ном}}{C_1} = \frac{1{,}65 - 0{,}8}{1{,}683} = 0{,}505.$$

7. Возможное отклонение нагрузки у генераторов вследствие перераспределения ее при воздействии регуляторов скорости

$$\Delta P_\varepsilon = \Delta\lambda_\varepsilon \cos\varphi_{\text{г. ном}} = \frac{\varepsilon}{\delta_r}\cos\varphi_{\text{г. ном}} = 0{,}24.$$

8. Синхронная жесткость включаемого генератора по (2.12.96) при условии, что допустимый угол вылета его ротора не больше, чем у работающего генератора,

$$C_2 \geqslant \frac{1{,}683\cdot 0{,}24}{2\cdot 1{,}683\cdot 0{,}505 - 0{,}24} = 0{,}28.$$

9. Сопротивление реактора по (2.12.98) для включаемого генератора без нагрузки $x_p = 2{,}72$. В абсолютных единицах

$$x_p = x_{p*}\frac{U^2}{S}10^{-2} = 1{,}15 \text{ Ом}$$

($x_{p*}$ — величина в относительных единицах).

10. Максимальное снижение напряжения на шинах при вычисленном сопротивлении реактора по (2.12.90) $\Delta U_0 = 15\%$.

11. Пик тока в цепи подключаемого генератора при известном сопротивлении реактора по (2.12.91) $I_0 = 0{,}63$.

# РАЗДЕЛ 3

# СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ

## Глава 3.1. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ РУЛЕВЫХ УСТРОЙСТВ

### § 3.1.1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К РУЛЕВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМ

Рулевой электропривод должен обеспечивать:

— перекладку руля с борта на борт на полном переднем ходу при спецификационной осадке судна за время не более 28 с;

— непрерывную перекладку руля с борта на борт на полном переднем ходу при спецификационной осадке судна в течение 30 мин;

— длительную работу при ходе по курсу в режиме не менее 350 перекладок в час;

— изменение вращающего момента электродвигателя в пределах от 0 до 200% номинального;

— режим стоянки электродвигателя под током в течение 1 мин с нагретого состояния;

— безотказность, надежность и живучесть в течение всего периода эксплуатации судна;

— ограничение момента двигателя при перегрузке или заклинивании руля вплоть до его полной остановки и выхода его на автоматическую характеристику при прекращении перегрузки;

— автоматическое удержание руля на заданном курсе как при отрицательном моменте на баллере, так и при остановке привода без применения механических тормозов;

— удобство, простоту управления и постоянный контроль работы привода;

— возможность управления из разных мест: ходовой рубки, верхнего мостика, румпельного отделения;

— автоматическое ограничение предельных углов перекладки.

Помимо этих требований Международная конвенция по охране человеческих жизней на море (1960 г.) требует наличия вспомогательного рулевого привода, который должен быстро включаться, быть достаточно прочным и надежным, иметь возможность преодоления на баллере управления судном при эксплуатационной скорости.

При выполнении основного привода с двойным комплектом электрических машин и схемы управления согласно этой же конвенции дублирующий привод можно рассматривать как вспомогательный.

### § 3.1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ РУЛЕВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Основным классификационным признаком является тип передачи крутящего момента от электропривода к баллеру руля. В практике применяются приводы двух основных типов: механические и гидравлические.

Механические приводы состоят из систем зубчатых передач, дающих постоянное или почти постоянное передаточное число от баллера руля к валу двигателя. Механические приводы подразделяются на:

— винтовые;

— секторные, применяемые главным образом на судах транспортного флота;

— штуртросовые, имеющие электрическую рулевую машину, устанавливаемую в рубке, и тросовую передачу от нее к баллеру руля. Эти приводы используются преимущественно на речных судах.

Гидравлические приводы получили наибольшее распространение и являются основными на всех судах нашего флота. Эти приводы могут быть разделены на две группы:

1) приводы с постоянно установленной гидравлической системой управления и изменением направления движения жидкости путем реверсирования двигателя;

2) приводы с насосом переменной производительности, в которых при постоянном направлении вращения двигателя, соединенного с насосом, изменяется направление движения жидкости в системе путем регулирования в самом насосе. Эта группа приводов наиболее распространена.

## § 3.1.3. ТИПИЗИРОВАННЫЙ РЯД СУДОВЫХ РУЛЕВЫХ МАШИН

Исходя из необходимости максимального сокращения количества типоразмеров судовых рулевых машин, находящихся в производстве, увеличения их серийности, обеспечения взаимозаменяемости и снижения стоимости, разработан типизированный ряд электрогидравлических рулевых машин, который находится в полном соответствии с едиными техническими требованиями Регистра Союза ССР.

Электропривод насосов рулевых машин разработан для судовых сетей переменного тока напряжением 380 В, частотой 50 Гц и сетей постоянного тока напряжением 220 В.

Основные характеристики рулевых машин типизированного ряда приведены в табл. 3.1.1. Рулевые машины имеют однотипную электрическую дистанционную систему управления, при которой применяются два вида постов управления:

а) с простым и следящим управлением;

2) с простым, следящим и автоматическим управлением (авторулевой).

## § 3.1.4. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИВОДА НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

Согласно принятой методике расчета электроприводов гидравлических рулевых машин определяющим параметром для выбора приводного электродвигателя насоса является момент $M_{нг\,max}$, который может возникнуть на валу электродвигателя при подрыве одного из предохранительных клапанов, установленных в гидравлической системе. Так как предохранительные клапаны устанавливаются на давления, в 1,5 раза превышающие наибольшие рабочие давления нормальной эксплуатации рулевой машины, то и нагрузка на валу электродвигателя, возникающая при подрыве предохранительного клапана, является максимально возможной.

Для обеспечения максимальной надежности действия рулевого устройства необходимо, чтобы подрыв предохранительного клапана не приводил к «опрокидыванию» асинхронного короткозамкнутого двигателя переменного тока, а в приводе постоянного тока — к появлению перегрузок, недопустимых по пределу безопасной для двигателя коммутации.



*Таблица 3.1.1*

**Основные характеристики судовых рулевых машин**

| Тип машины | Номинальный крутящий момент, кНм | Число рулей | Электродвигатель переменного тока основного насосного агрегата рулевой машины | | | | Электродвигатель постоянного тока основного насосного агрегата | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Тип | $P_{ном}$, кВт | $U_{ном}$, В | $n_{ном}$, об/мин | Тип | $P_{ном}$, кВт | $U_{ном}$, В | $n_{ном}$, об/мин |
| Р01 | 6,2 | 1 | АОМ31-4 | 1,0 | 220/380 | 1390 | П32М | 0,8 | 220 | 750 |
| Р02 | 6,2 | 2 | АОМ31-4 | 1,0 | | 1390 | П32М | 0,8 | | 750 |
| Р03 | 9,8 | 1 | АОМ31-4 | 1,0 | | 1390 | П32М | 0,8 | | 750 |
| П04 | 9,8 | 2 | АОМ31-4 | 1,0 | | 1390 | П32М | 0,8 | | 750 |
| Р05 | 15,7 | 1 | АОМ41-6 | 2,2 | | 930 | П31М | 0,75 | | 1000 |
| Р06 | 15,7 | 2 | АОМ41-6 | 2,2 | | 930 | П31М | 0,75 | | 1000 |
| Р07 | 24,5 | 1 | АОМ41-6 | 2,2 | | 930 | П31М | 1,4 | | 1500 |
| Р08 | 24,5 | 2 | АОМ41-6 | 2,2 | | 930 | П31М | 1,4 | | 1500 |
| Р09 | 39,0 | 1 | АОМ42-4 | 3,2 | | 1420 | П32М | 2,2 | | 1500 |
| Р10 | 39,2 | 2 | АОМ42-4 | 3,2 | | 1420 | П32М | 2,2 | | 1500 |
| Р11 | 62 | 1 | АМ70-6 | 8,0 | | 950 | П51М | 4,2 | | 1000 |
| Р12 | 62 | 2 | АМ70-6 | 8,0 | | 950 | П51М | 4,2 | | 1000 |
| Р13 | 98 | 1 | АМ70-6 | 8,0 | | 950 | П51М | 4,2 | | 1000 |
| Р14 | 98 | 2 | АМ70-6 | 8,0 | | 950 | П51М | 4,2 | | 1000 |
| Р15 | 157 | 1 | АМ71-6 | 11 | | 950 | П61М | 7,0 | | 1000 |
| Р16 | 245 | 1 | АМ81-6 | 19 | | 965 | П62М | 8,5 | | 1000 |
| Р17 | 392 | 1 | АМ82-6 | 27 | | 985 | — | — | — | — |
| Р32 | 62 | 2 | АМ70-6 | 8 | 380 | 950 | — | — | — | — |
| Р18М1 | 620 | 1 | АМ92-6 | 40 | | 965 | — | — | — | — |
| Р26М1 | 3920 | 1 | АДМ335М-10 | 132 | | 585 | — | — | — | — |
| Р21М1 | 1950 | 1 | АМ92-6 | 65 | | 975 | — | — | — | — |
| Р24 | 2500 | 1 | АМ111-80М | 60 | | 730 | — | — | — | — |
| Р36 | 1200 | 1 | АМШ101-6 | 55 | | 970 | — | — | — | — |

В соответствии с этим для приводов переменного тока необходимый максимальный (опрокидывающий) момент электродвигателя (по каталогу) вычисляют из соотношения

$$M_{\text{нг max}} > \frac{M_{\text{экв}}}{0{,}95^2 \cdot 0{,}9},$$

где $M_{\text{экв}}$ — момент нагрузки на валу двигателя при подрыве предохранительного клапана; $0{,}95^2$ — коэффициент, учитывающий падение напряжения в подводящих кабелях, принимаемое согласно Правилам Регистра равным 5% номинального напряжения судовой сети; 0,9 — коэффициент, учитывающий отрицательный допуск к значению максимального момента двигателя, составляющему согласно ГОСТ 183—74 10%.

Выбор двигателя постоянного тока определяется двумя величинами: предельно допустимой для двигателя перегрузкой по условиям безопасной коммутации и 100%-ной перегрузкой двигателя по моменту.

При этом основные параметры двигателя находят из следующих неравенств:

необходимый максимальный момент нагрузки

$$M_{\text{кр}} > M_{\text{экв}},$$

где $M_{\text{кр}}$ — момент предельно допустимой кратковременной нагрузки двигателя по условиям безопасной коммутации;

необходимый момент при 100%-ной нагрузке

$$M_{\text{п}} \geqslant M_{\text{нг max}},$$

где $M_{\text{п}}$ — момент допустимой 100%-ной кратковременной перегрузки двигателя; $M_{\text{нг max}}$ — наибольший момент на валу двигателя при перекладке руля на борт.

Двигатели переменного и постоянного тока длительного режима работы, выпускаемые в СССР и выбранные по вышеприведенным условиям, обеспечивают все режимные работы рулевого устройства, в том числе:

а) непрерывную перекладку руля с борта на борт на полном переднем ходу при спецификационной осадке судна в течение 30 мин;

б) длительную работу при ходе по курсу в режиме не менее 350 перекладок в час.

## § 3.1.5. СИСТЕМЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РУЛЕВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Управление рулевым устройством в зависимости от типа и системы привода производится различно. В механических и электрогидравлических приводах с реверсивными насосами реверсирование рулевого двигателя осуществляется обычно с одного из двух (трех) постов управления. Основной пост управления находится в ходовой рубке. В электрогидравлических приводах для управления рулевым устройством можно изменить направление подачи насоса. В этом случае двигатель вращается непрерывно. Пуск двигателя в данных приводах производится один раз в период подготовки рулевого устройства к действию. Перекладка руля при этом осуществляется изменением направления подачи жидкости насосом.

По принципу управления различают три вида систем управления рулевыми электроприводами: 1) системы простого управления; 2) системы следящего управления; 3) системы автоматического управления.

В системах простого управления для перекладки руля требуется включение двигателя при помощи поста управления (штурвала, рукоятки или кнопки), который остается включенным до тех пор, пока руль не займет необходимое положение. Для возврата руля в прежнее положение двигатель реверсируют тем же способом. Положение руля определяется визуально по шкале рулевого указателя или аксиометра. В этой системе при перекладке руля в сторону от диаметральной плоскости и обратно следует выполнить четыре операции: перекладку поста в сторону, возврат его в среднее положение, перекладку в обратную сторону и возврат опять в среднее положение.



В системах следящего управления угол перекладки руля зависит от направления и угла поворота поста управления. Двигатель при этом включается и работает до тех пор, пока руль не займет положение, соответствующее углу перекладки, после чего останавливается. Возврат руля к диаметральной плоскости осуществляется тем же путем. Наблюдения за рулевым указателем не требуется. Для перекладки руля к борту и обратно требуется провести только две операции: перекладку поста на заданный угол в сторону и возврат поста в среднее положение. Управление приводом руля облегчается.

В системах автоматического управления курс судна задается при помощи специального прибора — авторулевого, который включается в схему управления рулевым электроприводом при ходе судна по курсу. При отклонении руля от заданного курса авторулевой включает рулевой двигатель в направлении, обеспечивающем удержание судна на курсе, и, когда это достигается, останавливает его. Авторулевой осуществляет автоматическое управление рулевым электроустройством и поддерживает курс судна постоянным. При автоматическом управлении судном число перекладок руля уменьшается примерно в 1,5 раза по сравнению с ручным управлением. Кроме того, уменьшается (примерно в два раза) и средний угол поворота руля. Вследствие этого сопротивление движению судна с автоматическим управлением уменьшается, увеличивается его скорость, сокращается на 2,5—3% путь, проходимый судном от места отбытия до места назначения.

Системы управления типизированного ряда рулевых машин приведены в табл. 3.1.2.

Система управления «Аист» обеспечивает четыре вида управления:

1) автоматическое (авторулевой);
2) следящее (симпатическое);
3) простое дистанционное;
4) ручное (местное).

Системы управления получают электроэнергию однофазного переменного тока напряжением 127 В с частотой 50 Гц. Мощность, потребляемая системой от сети, не превышает 0,5 кВ. Система управления авторулевого типизированного ряда (АТР) при автоматическом виде управления обеспечивает удержание судна на заданном прямом курсе с точностью $\pm 0{,}2°$ (без учета ошибки гирокомпаса) при скорости судна не менее 6 уз. Среднее значение рыскания для судов с системой управления «Аист» в полном грузу при такой скорости и автоматическом управлении не превышает следующих значений:

а) $\pm 0{,}5°$ К (курса) при волнении моря до 2 баллов;

б) $\pm 3°$ К при волнении моря от 3 до 5 баллов.

При волнении моря свыше 5 баллов также обеспечивается надежная работа системы «Аист». Расхождение между показаниями стрелок заданного и истинного положений руля в посту управления составляет не более $\pm 2°$ после полной обработки заданной величины в следящем режиме.

Расхождение между показанием стрелки электрического указателя положения руля в пульте управления и истинным положением руля (замеренным по шкале рулевой машины) составляет не более $\pm 1°$.

Расхождение между показаниями на шкале рулевого датчика (РД) и стрелки электрического указателя положения руля в посту управления не превышает $\pm 0{,}5°$.

Приборы системы управления нормально работают:

а) при длительных колебаниях напряжения на $\pm 10\%$ и частоты на $\pm 5\%$ номинальных;

б) при повторно-кратковременных колебаниях сети по напряжению от —13 до 8%, по частоте от —14 до 3,5% номинальных значений;

в) при температуре окружающего воздуха от —40 до $+50°$ С;

г) в условиях инея и росы (для ПСУ);

д) в условиях вибрации в диапазоне частот 5—30 Гц с амплитудой от 2,5 до 0,2 мм соответственно;

е) при длительном крене 22,5° и дифференте до 10° от вертикали и кратковременном периодическом наклоне в любом направлении до 45° геометрических градусов.

*Таблица 3.1.2*

**Система управления «Аист» типизированного ряда рулевых машин**

| Индексы * систем управления рулевыми машинами | Индексы типоразмеров рулевых машин | Номинальный крутящий момент рулевой машины, кН·м | Количество насосов | | Количество постов управления | | | | Количество устройств | | | | | Общая масса системы (+5%), кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | ПУ | | ПСУ | | | | | ИМ-2 | | |
| | | | постоянной производительности | переменной производительности | Автономное управление | Пультовое управление | Автономное управление | Пультовое управление | РД | ПП | ИМ-1 | левое | правое | |
| 2-10 | Р01—Р10 | 6,17—39,2 | 1 | — | 1 | — | — | — | 1 | — | — | 1 | — | 203 |
| 2-11 | Р01—Р10 | 6,17—39,2 | 1 | — | 1 | — | 1 | — | 1 | 1 | | 1 | — | 299 |
| 1-10 | Р11—Р15 | 61,7—1225 | — | 2 | 1 | — | — | — | 1 | — | 2 | — | — | 227 |
| 1-10 | Р11—Р32 | 61,7—1225 | — | 2 | 1 | — | — | — | 1 | — | — | 1 | 1 | 227 |
| 1-11 | Р11—Р32 | 61,7—1225 | — | 2 | 1 | — | 1 | — | 1 | 1 | 2 | — | — | 300 |
| 1-11 | Р11—Р32 | 61,7—1225 | — | 2 | 1 | — | 1 | — | 1 | 1 | — | 1 | 1 | 300 |
| 2-12 | Р11—Р32 | 61,7—1225 | — | 2 | 1 | — | 2 | — | 1 | 1 | 2 | — | | 438 |
| 2-01 | Р01—Р10 | 6,17—39,2 | 1 | — | — | — | 1 | — | 1 | — | — | 1 | | 177 |
| 2-02 | Р01—Р10 | 6,17—39,2 | 1 | — | — | — | 2 | — | 1 | 1 | — | 1 | | 272 |
| 1-01 | Р11—Р32 | 61,7—1225 | — | 2 | — | — | 1 | — | 1 | — | 2 | | | 201 |
| 1-02 | Р11—Р32 | 61,7—1225 | — | 2 | — | — | 2 | — | 1 | 1 | 2 | — | | 322 |

*Продолжение табл. 3.1.2*

| Индексы * систем управления рулевыми машинами | Индексы типоразмеров рулевых машин | Номинальный крутящий момент рулевой машины, кН·м | Количество насосов | | Количество постов управления | | | | Количество устройств | | | | | Общая масса системы (+5%), кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | ПУ | | ПСУ | | | | | ИМ-2 | | |
| | | | постоянной производительности | переменной производительности | Автономное управление | Пультовое управление | Автономное управление | Пультовое управление | РД | ПП | ИМ-1 | левое | правое | |
| 1-03 | Р11—Р32 | 61,7—1225 | — | 2 | — | — | 3 | — | 1 | 1 | 2 | — | | 418 |
| 1-11П | Р11—Р32 | 6,3—125 | — | 2 | — | 1 | 1 | — | 1 | — | 2 | — | — | 317 |
| 1-10П | Р11—Р32 | 6,3—125 | — | 2 | — | 1 | — | — | 1 | — | 2 | — | — | 223 |
| 1-10П | Р11М1—Р21М1 | 6,3—200 | — | 2 | — | 1 | — | — | 1 | — | — | 1 | 1 | 223 |
| 1-11П | Р11М1—Р21М1 | 6,3—200 | — | 2 | — | 1 | 1 | — | 1 | — | — | 1 | 1 | 319 |
| 1-10П | Р24—Р26М1 | 250—400 | — | 3 | — | 1 | — | — | 1 | — | 1 | 2 | — | 223 |
| 1-03 | Р11М1—Р21М1 | 6,3—200 | — | 2 | — | — | 3 | — | 1 | — | — | 1 | 1 | 424 |
| 1-10Д | Р11—Р21 | 6,3—125 | — | 4 | — | — | — | — | 2 | — | — | 1 | 1 | 390 |
| 1-11Д | Р11—Р21 | 6,3—125 | — | 4 | 1 | — | 1 | — | 2 | — | 4 | — | — | 471 |
| 1-10 | Р24, Р26М1 | 250, 400 | — | 3 | 1 | — | — | — | 1 | — | 1 | 2 | — | 270 |

* Цифры в индексе системы «Аист» означают: первая цифра 1 — насос переменной производительности, 2 — насос постоянной производительности; вторая цифра — количество пультов управления (с автоматическим управлением); третья цифра — количество пультов следящего управления (ПСУ); буква П означает наличие в комплекте системы пультов ПУ или ПСУ, предназначенных для встраивания в общесудовой пульт; буква Д указывает на то, что система предназначена для управления двумя рулевыми машинами.

Система управления «Аист» является самосинхронизирующейся, т. е. все оперативные переключения — переход с поста на пост, с одного вида управления на другой или с одного насоса на другой — осуществляются при любом положении руля и не требуют никаких дополнительных вспомогательных операций по согласованию системы.

При автоматическом управлении работает только один из насосов рулевой машины.

При следящем и простом дистанционном управлениях могут работать как два, так и один насос рулевой машины.

### § 3.1.6. СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

В зависимости от системы рулевого электропривода, назначения судна, рода тока на судне, требований надежности и живучести могут применяться различные схемы управления рулевыми электроприводами.

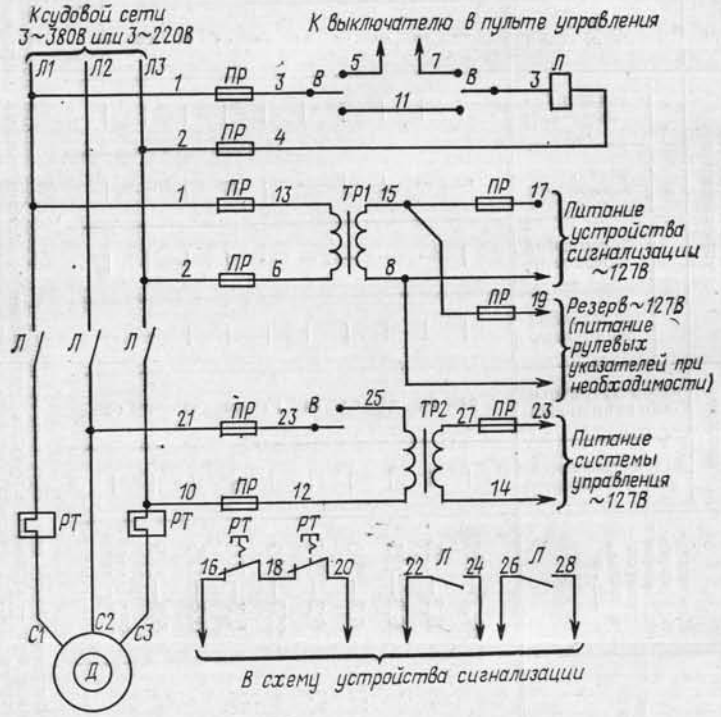



Рис. 3.1.1. Принципиальная электрическая схема электропривода рулевой гидравлической машины.

*Л1—Л3* — линейные провода; *Л* — линейный контактор; *В* — выключатель; *Пр* — плавкий предохранитель; *Тр* — трансформатор; *С1—С3* — фазы двигателя.

Управление рулевым гидравлическим приводом в системе автоматического действия может быть осуществлено теми же схемами авторулевых, что и для механических приводов с воздействием на манипулятор гидравлического насоса.

К схемам рулевых электроприводов предъявляется ряд требований, определяемых Правилами Регистра СССР и Международной конвенцией по охране человеческих жизней на море.



Питание рулевого электропривода на судах должно осуществляться непосредственно от ГРЩ по двум максимально удаленным друг от друга (обычно они находятся на противоположных бортах) фидерам. Если рулевой электропривод имеет два комплекта двигателей, то каждый питается от своего фидера. На судах, имеющих аварийную электростанцию, электрически связанную с главным распределительным щитом судна, Правилами рекомендуется подключать один из фидеров через аварийную электростанцию, предусмотрев достаточную ее мощность.

Управление пуском приводных двигателей для рулевого преобразователя или насоса переменной производительности (при установке вне машинного отделения) осуществляется дистанционно: у места нахождения двигателя, в рулевой рубке и на главном распределительном щите (если у последнего ведется круглосуточная вахта).

Управление электроприводом руля осуществляется от двух (не менее) постов управления и переключателей постов управления. Переключатель должен подключать только один пост из имеющихся. Резервный пост устанавливается либо в румпельном помещении, либо на юте.

Контакторные схемы управления должны иметь две магнитные станции с соответствующими переключателями. При наличии ручного привода управления, установленного в рулевой рубке, вторую контактную станцию можно не ставить.

В электрических схемах рулевых приводов Правилами запрещается иметь максимальную и нулевую выключающие привод защиты. Должна быть предусмотрена только защита от коротких замыканий и соответствующая сигнализация. В схемах должны предусматриваться конечные выключатели, ограничивающие предельный по углу ход привода, но допускающие его обратный ход. В следящих и автоматических системах конечное ограничение необязательно.

На рис. 3.1.1 приведена схема электропривода переменного тока основного насоса электрогидравлической рулевой машины типов Р11—Р17.

## Глава 3.2. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ЯКОРНО-ШВАРТОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ

### § 3.2.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ

Якорно-швартовное устройство является одним из наиболее важных судовых устройств, обеспечивающих безопасность эксплуатации судна. Шпилевые и брашпильные устройства предназначены для выбирания и спуска якорей, выполнения швартовных и других операций. Работа каждого шпилевого и брашпильного электропривода определяется величиной тягового усилия, скоростью выбирания якорной цепи или швартовного троса, длительностью рабочего периода.

С помощью якорно-швартовных механизмов выполняются следующие основные операции:

отдача якоря (посредством электропривода, свободным травлением и свободным травлением с подтормаживанием тормозом звездочки);

стоянка на якоре на тормозе цепной звездочки;

съемка с якоря — подтягивание судна к якорю, отрыв и подъем якоря, втягивание якоря в клюз;

одновременный подъем двух якорей (только для брашпилей) с половины расчетной глубины стоянки при неодновременном их отрыве от грунта;

обеспечение швартовки судна при отжимном ветре 5 баллов.

Характерными особенностями электроприводов якорно-швартовных механизмов являются:

— кратковременный режим работы (20—40 мин), стандартная продолжительность одного цикла принята равной 30 мин;

— широкое изменение нагрузки на валу электродвигателя (30—200% номинальной);

— возможность стоянки двигателя под током (0,5—1 мин);

— частые пуски электродвигателя (до 120 пусков и торможений в течение часа) и возможные реверсы;

— суммарная продолжительность включения двигателя швартовного механизма за сутки 40—50 мин;

— необходимость саморегулирования частоты вращения электродвигателя при изменении момента сопротивления на его валу.

Общее число часов работы в год якорно-швартовных механизмов колеблется в пределах 100—200, при этом осуществляется 12 000—15 000 включений и остановок электропривода. В числе этих операций возможно до 100 отключений предельного тока (тока короткого замыкания для двигателя переменного тока или тока уставки грузовой защиты двигателя постоянного тока).

## § 3.2.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЯКОРНО-ШВАРТОВНЫХ И ШВАРТОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Якорно-швартовные механизмы делятся на две основные группы:

1) якорно-швартовные и якорные шпили, имеющие вертикальное расположение грузового вала и одну звездочку;

2) брашпили, имеющие горизонтальное расположение грузового вала и две звездочки.

Якорно-швартовные шпили подразделяются:

— по скорости выбирания якорной цепи — на нормальные и с повышенной скоростью;

— по конструктивным признакам — на однопалубные (цепная звездочка, механизм и двигатель размещены на одной палубе) и двухпалубные (цепная звездочка и швартовный барабан размещены на одной палубе, механизм и двигатель — на другой); двухпалубные якорно-швартовные шпили могут быть одинарными (с индивидуальным приводом) и соединенными, связанными общим редуктором.

Якорные шпили обычно выполняются соединенными. Калибр их цепей бывает выше 72 мм.

Брашпили по скорости и конструкции подразделяются на нормальные и облегченные. Первые используются на судах морского флота, вторые — на судах речного и озерного флота, где применяются короткие цепи.

Швартовные механизмы делятся на:

— швартовные шпили, у которых трос передается через швартовный барабан, причем намотанное на барабане некоторое число витков троса остается постоянным в течение всего времени выбирания;

— швартовные лебедки, на барабане которых хранится весь запас троса, сдаваемый с барабана или наматываемый на него в процессе швартовных операций.

Различают две группы швартовных шпилей:

1) шпили с грузовым валом, редуктором и двигателем;

2) шпили, у которых грузовой вал отсутствует, а двигатель размещается внутри швартовного барабана и связывается с ним посредством механической передачи.

Швартовные шпили первой группы подразделяются на одно- и двухпалубные.

Швартовные лебедки в конструктивном отношении весьма разнообразны, но, как правило, имеют двигатель, расположенный в пределах рамы лебедки. Появившиеся в последнее время автоматические швартовные лебедки по особенностям работы близки к автоматическим буксирным лебедкам.



## § 3.2.3. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЯКОРНОГО УСТРОЙСТВА

Основными параметрами якорного устройства являются:

$Q$ — масса якоря, выбираемая из стандартных таблиц в зависимости от типа и водоизмещения судна. Шкала нормированных масс якорей имеет диапазон от 200 до 8500 кг;

$L$ — полная длина якорной цепи, нормированная в диапазоне 120—340 м;

$h$ — расчетная глубина стоянки судна на якоре, составляющая 40—100 м. Действительная глубина стоянки обычно не превышает 50 м и в большинстве случаев лежит в пределах 15—30 м;

$d$ — калибр якорной цепи, выбираемый из стандартных таблиц в зависимости от массы якоря;

$q$ — масса 1 м якорной цепи, составляющая

$$q_{кг} = 0{,}0215 d^2_{мм}.$$

Между массой якоря и массой якорной цепи длиной в 1 м имеется приблизительное соотношение

$$Q \approx 46{,}4q;$$

$D_з$ — диаметр звездочки шпиля. Звездочка выполняется пятикулачной, а шаг цепи или длина звена составляет $8d$. Отсюда

$$D_з = 13{,}7d;$$

$f_{кл} = 1{,}28 \div 1{,}35$ — коэффициент потерь на трение от клюза до цепной звездочки (бортовой клюз, якорная труба, палубный клюз, стопор);

$\eta_{кл} = 1/f_{кл}$ — КПД клюза;

$\eta = 0{,}4 \div 0{,}82$ — КПД механической передачи привода (нижний предел относится к самотормозящимся передачам с червячными парами, верхний — к несамотормозящимся с цилиндрическими парами);

*Таблица 3.2.1*

**Технические данные якорных устройств**

| Калибр цепи, мм | | Наибольшая масса якоря, кг | Наибольшая длина якорной цепи, м | Расчетное напряжение в цепи $\sigma_{расч}$, МПа |
|---|---|---|---|---|
| сварной | литой | | | |
| а) С нормальной скоростью выбирания якорной цепи | | | | |
| 15—17 | — | 200 | 120 | 18 |
| 19—22 | — | 400 | 150 | 18 |
| 25—28 | — | 700 | 170 | 18 |
| 31—34 | — | 1000 | 195 | 23 |
| 37—40 | — | 1500 | 220 | 23 |
| 43—46 | 37—40 | 2000 | 220/290 | 23 |
| 49—62 | 43—53 | 4000 | 270/310 | 23 |
| — | 57—72 | 7000 | 340 | 20 |
| — | 77—82 | 8500 | 340 | 20 |
| б) С повышенной скоростью выбирания якорной цепи | | | | |
| 31—40 | — | 2000 | 220 | 20 |
| 43—46 | 37—40 | 2500 | 240/290 | 20 |
| 49—53 | 43—46 | 4000 | 270/290 | 25 |
| 57—62 | 49—53 | 6000 | 290/340 | 25 |

$i = 100 \div 200$ — передаточное число механической передачи привода (при комплексном проектировании механической и электрической частей привода передаточное число выбирают исходя из условия оптимального выбора электродвигателя);

$v$ — средняя скорость подъема якоря после отрыва с номинальной глубины, принимаемая для морских судов равной $v = 10 \div 12$ м/мин; для некоторых судов в целях сокращения времени съемки с якоря $v = 22 \div 30$ м/мин; для речных судов, имеющих более короткие якорные цепи, $v = 6 \div 8$ м/мин;

$v_{кл}$ — скорость втягивания якоря в клюз; предельное значение $v_{кл}$ не должно превышать 10 м/мин, рекомендуемое значение $v_{кл} = 5 \div 7$ м/мин;

$v_ш$ — скорость выбирания швартовов, которая при номинальном тяговом усилии не должна быть выше 14—18 м/мин; при выбирании свободных швартовов или при работе с малыми усилиями требуется скорость $v_ш = 26 \div 30$ м/мин; для крупных судов (с тяговым усилием на швартовах свыше 30 кН) необходимо дополнительно иметь малую скорость $v_ш = 6 \div 8$ м/мин для плавного швартования;

$T_ш$ — номинальное тяговое усилие на швартовном барабане;

$D_ш$ — диаметр швартовного барабана;

$\sigma_{расч}$ — расчетное напряжение в якорной цепи;

$b$ — высота клюза;

$\beta = 0{,}87$ — коэффициент потери массы якоря и якорной цепи в воде.

Основные технические данные якорных устройств приведены в табл. 3.2.1.

## § 3.2.4. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В ЯКОРНОЙ ЦЕПИ ПРИ СТОЯНКЕ СУДНА НА ЯКОРЕ

При стоянке судна на якоре на него действуют внешние силы ветра и течения, передающиеся якорной цепи. Последняя закреплена в двух точках $O$ и $O_1$ (рис. 3.2.1), имеет равномерно распределенную массу и провисает по цепной линии.

Силы тяжения на концах цепи $T_1$ и $T_2$ направлены по касательной к цепной линии и уравновешиваются результирующей силой тяжести цепи $G_ц$, что видно из силового треугольника, построенного относительно точки $O_1$. Против сил $T_1$

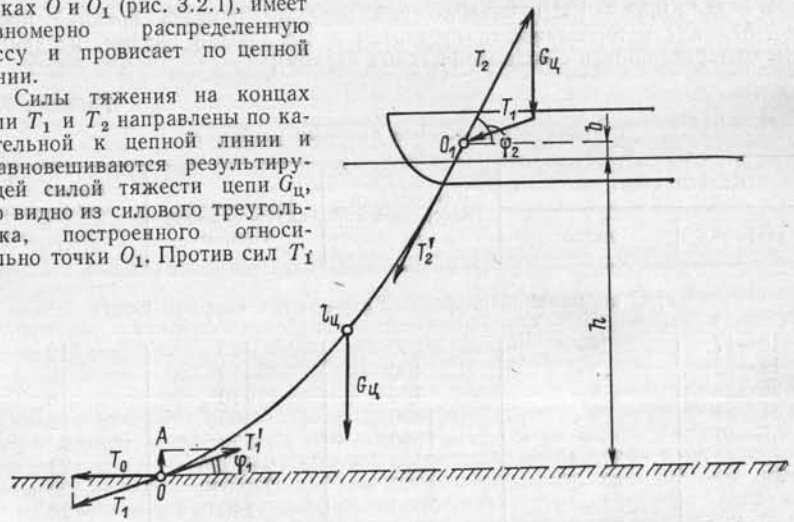



Рис. 3.2.1. Усилия в якорной цепи, когда она полностью провисает.
$b$ — высота клюза; $h$ — глубина стоянки.

и $T_2$ направлены соответственно равные им силы реакции $T_1'$ и $T_2'$, действующие на якорь в точке $O$ и на судно в точке $O_1$.

Поскольку провисающий участок цепи $l_ц$ находится в равновесии под действием сил $T_1'$, $T_2$ и $G_ц$, то алгебраическая сумма проекций этих сил на любую ось должна равняться нулю:

$$-T_1' \cos \varphi_1 + T_2 \cos \varphi_2 = 0.$$



Такие же уравнения справедливы для отрезка цепи любой длины. Тогда

$$T_1 \cos \varphi_1 = T_2 \cos \varphi_2 = T_i \cos \varphi_i.$$

Горизонтальная составляющая сил тяжения в любой точке якорной цепи есть величина постоянная.

Для безопасной стоянки судна на якоре требуется, чтобы на якорь не действовали силы, отрывающие его от грунта. Это требование выполняется при $\varphi_1 = 0$, когда вертикальная составляющая $OA$ силы $T_1'$, приложенной со стороны цепи к якорю, равна нулю. Для этого необходимо, чтобы некоторая часть цепи свободно лежала на грунте. При этом значение $T_0$ — держащей силы якорного устройства будет наибольшим (рис. 3.2.2):

$$T_1 \cos \varphi_1 = T_0 \text{ при } \varphi_1 = 0,$$

тогда

$$T_i \cos \varphi_i = T_0,$$

т. е. в любой точке якорной цепи горизонтальная составляющая силы тяжения равна держащей силе якоря.

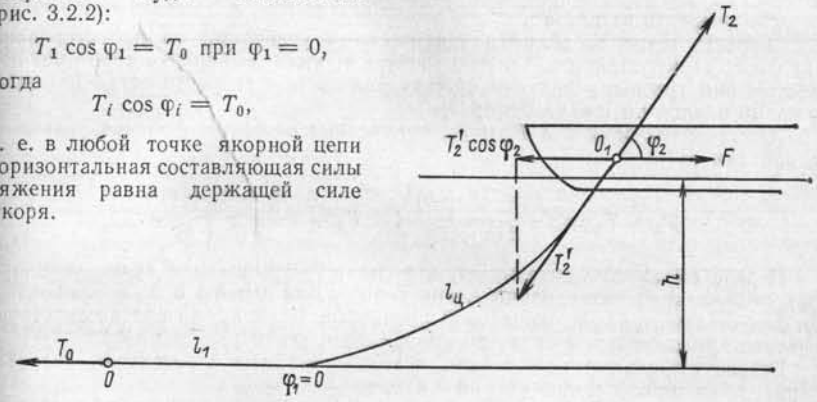



Рис. 3.2.2. Усилия в якорной цепи, когда часть ее $l_1$ лежит на грунте.

При проектировании якорных устройств предполагают, что внешние силы ветра $F_в$, течения $F_т$ и силы, обусловленной скоростью подтягивания судна при съемке его с якоря, совпадают по направлению:

$$F = F_в + F_т.$$

При постановке на якорь судно относится на расстояние, при котором провисающая часть цепи $l_ц$ создает у клюза натяжение, уравновешивающее внешнюю силу $F$. При этом горизонтальная составляющая силы тяжения, приложенная со стороны якорной цепи к судну, будет равна внешней силе:

$$T_2' \cos \varphi_2 = F.$$

Это равенство и является условием стоянки судна на якоре. Из предыдущих соотношений следует

$$T_0 = F,$$

т. е. держащая сила якоря равна внешней силе, действующей на судно.

При определении силы сопротивления воды (в ньютонах), обусловленного течением и подтягиванием судна, учитывается только сопротивление трения, так как все другие виды сопротивления (волновое, вихревое) практически отсутствуют вследствие малой скорости течения и подтягивания:

$$F_т = (k_к \zeta_f + \Delta\zeta_f) S_{см} \frac{\rho v_\Sigma^2}{2},$$

где $\rho = 1{,}02 \cdot 10^3$ Н·с$^2$/м$^4$ — массовая плотность воды; $\zeta_f = 3{,}84 \cdot 10^{-3} \div 1{,}14 \times 10^{-3}$ — коэффициент трения о воду; $k_к$ — поправочный коэффициент на влияние кривизны корпуса, которая учитывается отношением длины судна $L$ к его ширине $B$. При $L/B$, равном 6, 8, 10, 12, этот коэффициент соответственно равен 1,04, 1,03, 1,02, 1,01; $\Delta\zeta_f = 0{,}7 \cdot 10^{-3} \div 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ — надбавка к коэффициенту

трения, учитывающая шероховатость корпуса судна; $S_{см} = L(\delta B + 1{,}7T)$—смоченная поверхность судна, м²; $\delta = 0{,}75 \div 0{,}85$ — коэффициент полноты водоизмещения; $T$ — осадка судна; $v_\Sigma = v_т + v_{пт}$ — суммарная скорость потока, действующего на судно, м/с; $v_{пт} = 0{,}1 \div 0{,}3$ м/с — абсолютная скорость подтягивания судна к месту заложения якоря; $v_т = 1 \div 3$ м/с — скорость течения воды.

Сила ветрового сопротивления (в ньютонах) вычисляется по формуле

$$F_в = k_в S_п v_в^2,$$

где $k_в = 0{,}24—0{,}61$ — коэффициент ветрового давления; $S_п$ — парусящая поверхность судна (сумма проекций на плоскость миделя надводной части судна), м²; $v_в$ — скорость ветра, м/с.

Скорость ветра $v_в$ задается техническими условиями на проектирование шпилевого электропривода. Обычно требуется, чтобы выбирание якоря без подрабатывания гребными винтами обеспечивалось при скорости ветра не свыше 10 м/с (5 баллов по шкале Бофорта).

Известны значения сил $T_1$ и $T_2$, полученные на основе решения уравнений цепной линии:

$$T_1 = T_0 = q\frac{l_ц^2 - (h+b)^2}{2(h+b)}; \quad T_2 = q\frac{l_ц^2 + (h+b)^2}{2(h+b)}.$$

Первое выражение показывает, что сила, удерживающая судно на якоре, пропорциональна массе единицы длины цепи $q$. Для цепей $q$ в 5—6 раз больше, чем для стального троса одинаковой прочности. Цепи лучше противодействуют внезапно приложенным к судну внешним силам, играя роль демпфера.

Второе выражение может быть использовано для определения нагрузки в приводе на первой стадии съемки с якоря.

Поскольку $T_0 = F$, то после нахождения $F$ можно по первому из последних уравнений определить длину провисающей части цепи на нормальной глубине стоянки, пренебрегая высотой клюза и учитывая потерю веса в воде:

$$l_ц = \sqrt{\frac{2hF}{q \cdot 0{,}87} + h^2} \text{ или } l_ц = \sqrt{\frac{2hT_2}{q \cdot 0{,}87} - h^2}.$$

Длина цепи, свободно лежащей на грунте, равна: $l_1 = L - l_ц$.

## § 3.2.5. НАГРУЗОЧНЫЕ ДИАГРАММЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Режим подъема якоря характеризуется взаимодействием судна, якорной цепи и электропривода. Он включает в себя два основных периода: 1) подъем цепи до отрыва от грунта; 2) подъем якоря после отрыва. Принято первый период разбивать на два этапа: подъем цепи при сохранении цепной линии (подтягивание судна к якорю с постоянным тяговым усилием) и спрямление цепной линии до момента нависания судна над якорем (подтягивание судна к якорю при переменном тяговом усилии). При этом условии операция по подъему якоря с расчетной глубины стоянки разбивается на четыре стадии:

Первая стадия — равномерное выбирание якорной цепи и равномерное подтягивание судна к якорю. К звездочке шпиля приложено усилие, равное

$$T_I = f_{кл} T_2 = f_{кл} q \frac{l_ц^2 + h^2}{2h}.$$

Вторая стадия — спрямление цепной линии с возрастанием действующих в цепи сил тяжения. После того как судно нависнет над якорем, дальнейшее его движение по инерции вызывает некоторое волочение и отрыв якоря от грунта. Усилие на звездочке шпиля принимается изменяющимся линейно от усилия первой стадии до усилия отрыва якоря от грунта.



Третья стадия — отрыв якоря от грунта. Отрыв якоря электродвигателем производится в наиболее простых случаях. В тяжелых ветровых условиях или при глубоком засасывании якоря процессу отрыва якоря содействуют, подрабатывая гребными винтами. Электродвигатель на этой стадии находится в режиме стоянки под током.

Усилие, идущее только на отрыв якоря, на основании данных практики, исходя из нормальных габаритов электродвигателей, принимается равным $2Q$.

Тогда полное усилие на звездочке при отрыве будет равно

$$T_{II} = f_{кл}[2Q + (Q + qh)\beta].$$

Четвертая стадия — подъем висящего якоря после отрыва. Привод работает с переменным усилием. В начале стадии усилие на звездочке равно

$$T_{III} = f_{кл}(Q + qh)\beta.$$

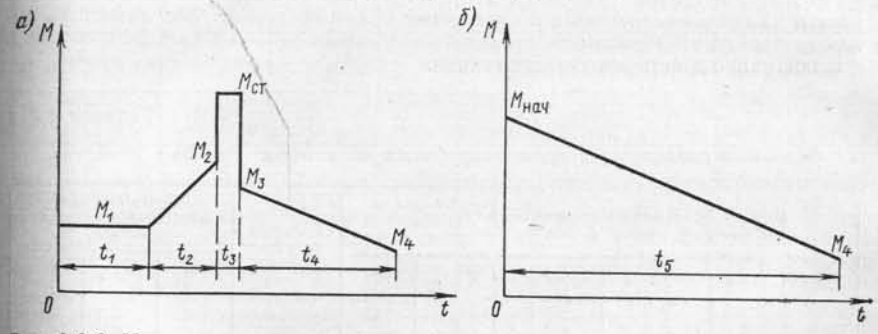



Рис. 3.2.3. Нагрузочные диаграммы электропривода якорного механизма: *а* — для нормального режима; *б* — для аварийного режима.

В конце стадии, при подходе якоря к поверхности воды,

$$T_{IV} = f_{кл} Q \beta.$$

После данной стадии происходит втягивание якоря в клюз. Для безопасного проведения этой операции она осуществляется с малой скоростью. Усилие при этом несколько возрастает, составляя $(1{,}2 \div 1{,}25)\, T_{IV}$.

Кроме рассмотренного режима съемки с якоря для морских судов учитывается так называемый аварийный режим — подъем якоря с глубины, превышающей полную длину якорной цепи. Усилие на звездочке шпиля составляет:

в начале аварийного режима $T_{нач} = f_{кл}(Q + Lq)\beta$;

в конце режима $T_{кон} = T_{IV}$.

На основании полученных данных строят нагрузочные диаграммы шпилевых электроприводов $M = f(t)$. Моменты на валу двигателя рассчитывают по формуле

$$M = \frac{T_з D_з}{2i\eta},$$

где $T_з$ — усилие на звездочке шпиля.

Время работы двигателя на отдельных стадиях съемки с якоря определяют по выражениям

$$t_1 = \frac{l_i i}{\pi D_з n_1}; \quad t_2 = \frac{(l_ц - h)\, i}{\pi D_з \dfrac{n_1 + n_2}{2}}; \quad t_3 = 0{,}5 \div 1 \text{ мин};$$

$$t_4 = \frac{hi}{\pi D_з \dfrac{n_з + n_4}{2}}; \quad t_5 = \frac{Li}{\pi D_з \dfrac{n_{нач} + n_4}{2}}.$$

Частоты вращения $n_1, \ldots n_{нач}$ находят по механической характеристике предварительно подобранного двигателя. Момент стоянки двигателя $M_{ст} = 1{,}4—1{,}5M_2$. Нагрузочные диаграммы шпилевых приводов для нормального и аварийного режимов представлены на рис. 3.2.3.

## § 3.2.6. ТИПЫ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЯКОРНО-ШВАРТОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Типы и основные параметры якорно-швартовных механизмов установлены ГОСТ 5875—77 и ГОСТ 9891—76.

Первый стандарт распространяется на якорно-швартовные механизмы, имеющие местное, дистанционное и автоматизированное управление и предназначенные для надводных кораблей и судов. Второй стандарт также распространяется на надводные корабли и суда, но не охватывает малогабаритных шпилей для катеров, а также шпилей, предназначенных для работы в режиме травления под постоянно действующим натяжением.

*Таблица 3.2.2*

**Основные параметры якорно-швартовных механизмов по ГОСТ 5875—77**

| Модель | Расчетная глубина якорной стоянки, м | Калибр якорной цепи $d$, мм: обыкновенной | Калибр якорной цепи $d$, мм: повышенной прочности | Скорость выбирания цепи, м/мин: номинальная, не менее | Скорость выбирания цепи, м/мин: малая, не более | Номинальное тяговое усилие на швартовном барабане, Н | Скорость выбирания швартовного каната, м/мин: номинальная | Скорость выбирания швартовного каната, м/мин: малая | Скорость выбирания швартовного каната, м/мин: наибольшая |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Механизмы первой группы | | | | | | | | | |
| 1 | 65 | 15/17 | — | 10 | 10 | 5 000 | 18 | Не устанавливается | Не устанавливается |
| 2 | 80 | 19/22 | — | | | 10 000 | | | |
| 3 | | 25/28 | — | | | 15 000 | | | |
| 4 | 100 | 31/34 | — | | | 20 000 | | | 24—40 |
| 5 | | 37/40 | — | | | 30 000 | | | |
| 6 | | 43/46 | 37/40 | | | 50 000 | | | |
| 7 | | 49/53 | 43/46 | | | 65 000 | | 9 | |
| 8 | | 57/62 | 49/53 | | | 80 000 | | | |
| 9 | | 67/72 | 57/62 | | | 100 000 | | | |
| 10 | | 77/82 | 67/72 | | | 140 000 | | | |
| 11 | | 87 | 77/82 | | | | | | |
| 12 | | 92/100 | 87/92 | — | — | — | — | — | — |



*Продолжение табл. 3.2.2*

| Модель | Расчетная глубина якорной стоянки, м | Калибр якорной цепи $d$, мм: обыкновенной | Калибр якорной цепи $d$, мм: повышенной прочности | Скорость выбирания цепи, м/мин: номинальная, не менее | Скорость выбирания цепи, м/мин: малая, не более | Номинальное тяговое усилие на швартовном барабане, Н | Скорость выбирания швартовного каната, м/мин: номинальная | Скорость выбирания швартовного каната, м/мин: малая | Скорость выбирания швартовного каната, м/мин: наибольшая |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Механизмы второй группы | | | | | | | | | |
| 1 | 65 | 15/17 | — | 10 | 10 | 5 000 | 18 | Не устанавливается | Не устанавливается |
| 2 | 80 | 19/22 | — | | | 10 000 | | | |
| 3 | | 25/28 | — | | | 15 000 | | | |
| 4 | 100 | 31/34 | — | 24 | 10 | 30 000 | | | 24—40 |
| 5 | | 37/40 | — | | | 50 000 | | | |
| 6 | | 43/46 | 37/40 | | | 65 000 | | 9 | |
| 7 | | 49/53 | 43/46 | | | 80 000 | | | |
| 8 | | 57/62 | 49/53 | | | 100 000 | | | |
| 9 | | 67/72 | 57/62 | | | 125 000 | | | |
| 10 | | 77/82 | 67/72 | | | | | | |
| Механизмы третьей группы | | | | | | | | | |
| 1 | 40 | 15/17 | 13/15 17/19 | 7 | 7 | 6 000 | 8 | — | — |
| 2 | | 19/22/25 | 22/25/28 | | | 12 500 | | | |
| 3 | | 28/31/34 | 31 | | | 20 000 | | | |

Примечания. 1. Параметры швартовной части моделей 10 и 11 первой группы механизмов относятся только к брашпилям; шпили моделей 10—12 — только якорные.

2. Калибр якорной цепи механизмов третьей группы указан для цепей с распорками (1-й столбец) и без распорок (2-й столбец).

В соответствии с ГОСТ 5875—77 брашпили изготовляются однопалубными двух типов: с турачками на грузовом валу и с турачками на промежуточном валу. Шпили изготовляются четырех типов: якорно-швартовные — однопалубные одинарные, двухпалубные одинарные, двухпалубные соединенные и якорные — двухпалубные соединенные.

Установлены 12 моделей и три группы якорно-швартовных механизмов. Модели механизмов определяются калибром якорных цепей, а группы различаются по скорости выбирания якорной цепи:

первая — механизмы с нормальной скоростью (брашпили, якорно-швартовные шпили, якорные шпили, якорно-швартовные лебедки);

*Таблица 3.2.3*

**Основные параметры швартовных шпилей по ГОСТ 9891—76**

| Модель шпиля | Номинальное тяговое усилие на швартовном барабане, Н | Скорость выбирания швартовного каната, м/мин | | | Расчетные (наибольшие) размеры швартовного каната, м | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | малая | номинальная | наибольшая | Диаметр стального | Длина окружности растительного | Длина окружности синтетического |
| 1 | 5 000 | — | 15—18 | — | 13,5 | 100 | 60 |
| 2 | 10 000 | | | | 15,0 | 125 | 75 |
| 3 | 20 000 | | | | 19,0 | 175 | 90 |
| 4 | 30 000 | | | 24—25 | 22,5 | 200 | 110 |
| 5 | 50 000 | | 12—16 | | 24,5; 30,0 * | 225 | 150 |
| 6 | 80 000 | | | | 30,0; 33,5 * | 300 | 175 |
| 7 | 100 000 | | 11—14 | | 33,5; 41,0 * | 350 | 200 |

* Применяется по требованию заказчика.

*Таблица 3.2.4*

**Удельные тяговые усилия якорно-швартовных шпилей и брашпилей**

| Группа механизма | Модель механизма | Удельное тяговое усилие на цепной звездочке при выбирании якорной цепи: с номинальной скоростью $a$, МПа | Удельное тяговое усилие на цепной звездочке при выбирании якорной цепи: с малой скоростью $a'$, МПа | $k$ | $m$: для обыкновенных цепей | $m$: для цепей повышенной прочности |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Первая | 1—3 | 30 | 16 | 1,3 | 1,0 | 1,15 |
| | 4—12 | 38 | 16 | 1,3 | | |
| Вторая | 1—3 | 30 | 16 | 1,6 | 1,0 | 1,15 |
| | 4—6 | 35 | 20 | 1,6 | | |
| | 7—10 | 40 | 25 | 1,6 | | |
| Третья | 1—3 | 23 | 16 | 2,0 | Без распорок | С распорками |
| | | | | | 0,8 | 1,0 |



вторая — механизмы с повышенной скоростью (якорно-швартовные шпили);

третья — механизмы с пониженной скоростью (брашпили, якорно-швартовные шпили, якорно-швартовные лебедки).

Основные параметры якорно-швартовных механизмов приведены в табл. 3.2.2.

В соответствии с ГОСТ 9891—76 швартовные шпили изготовляются двух типов: однопалубные и двухпалубные. Основные параметры швартовных шпилей даны в табл. 3.2.3. Удельные тяговые усилия якорно-швартовных шпилей и брашпилей — в табл. 3.2.4.

## § 3.2.7. ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДАМ ЯКОРНО-ШВАРТОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ

К электроприводам якорно-швартовных механизмов предъявляются следующие требования:

возможность их использования при заданных условиях погоды и моря;

надежность и безотказность в работе, в частности, при колебаниях параметров питающей сети, установленных соответствующими правилами и нормами;

возможность пуска в ход под полной нагрузкой;

поддержание необходимого тягового усилия при малых скоростях выбирания цепи или троса, вплоть до полной остановки;

соразмерность максимального тягового усилия, развиваемого исполнительным электродвигателем, с прочностью цепи или троса;

получение нормированных скоростей подъема якоря после отрыва от грунта, выбирания швартовов и втягивания якоря в клюз;

способность удержания якоря на весу в случае потери питания электроэнергией;

обеспечение безопасного спуска якоря на заданную глубину;

небольшие масса, габариты и стоимость установки;

удобство и простота управления и обслуживания.

Все якорно-швартовные механизмы обычно выпускаются с электрооборудованием морского исполнения переменного тока 380 и 220 В, частотой 50 Гц и постоянного тока 220 В.

Электродвигатели, командоконтроллеры, кулачковые контроллеры и другие элементы электрооборудования, устанавливаемые на палубе, должны быть водозащищенного исполнения; магнитные контроллеры, устанавливаемые в помещениях, должны быть брызгозащищенного исполнения.

Якорно-швартовные механизмы должны допускать возможность оборудования их устройствами для дистанционной (с мостика) отдачи якоря. Они также должны быть снабжены счетчиками длины вытравленной якорной цепи, допускающими установку дистанционных репитеров.

Угол обхвата звездочки якорной цепью должен быть не менее 117° для брашпилей и якорно-швартовных лебедок и 150° для шпилей.

Якорно-швартовные механизмы оборудуются автоматическим тормозом на валу электродвигателя с устройством для ручного растормаживания. Тормоз предназначен для удерживания механизма от разворота при действии в цепи на звездочке (соединенной с приводом) статического усилия извне, величина которого составляет не менее 1,3 номинального для механизмов первой группы, 1,6 номинального — для второй группы и 2,0 номинального — для третьей группы (согласно ГОСТ 5875—77). Для швартовных шпилей это усилие составляет 1,5 номинального тягового усилия шпиля.

В обоснованных случаях допускается применение самотормозящегося механизма привода. И тогда выбег электродвигателя при остановке его после работы на травление цепи не регламентируется.

Каждая цепная звездочка должна иметь возможность отключаться от привода и иметь управляемый тормоз, обеспечивающий удержание внешнего статического усилия на звездочке, равного 0,6 пробной нагрузки данной якорной цепи, для механизмов первой и второй групп и 0,3 — для третьей группы.

## § 3.2.8. ТИПЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЯКОРНО-ШВАРТОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Для якорных, якорно-швартовных и швартовных механизмов рекомендуются три основные группы электроприводов:

1) с двигателями постоянного тока, питающимися от сети;
2) с двигателями переменного тока, питающимися от сети;
3) с двигателями постоянного тока, питающимися от автономных преобразователей — электромашинных (системы Г — Д) или статических.

Для двух первых групп применяются силовые кулачковые контроллеры или магнитные контроллеры с дистанционным управлением. Группа электроприводов по системе Г — Д имеет обычно дистанционное управление.

Все три группы электроприводов могут иметь один или два приводных электродвигателя. Приводы с двумя электродвигателями применяются только для крупных якорных и якорно-швартовных механизмов с калибром цепи свыше 62 мм.

На постоянном токе используются двигатели смешанного возбуждения серии ДПМ, обмоточные данные и механические характеристики которых специально подобраны исходя из требований, предъявляемых к электроприводам палубных механизмов.

Из двигателей переменного тока применяются преимущественно короткозамкнутые асинхронные двигатели. Для нормальных якорно-швартовных шпилей с калибром цепи до 28 мм, всех облегченных механизмов и швартовных шпилей с тяговым усилием до 30 кН рекомендуются двухскоростные двигатели; для всех остальных механизмов целесообразно использование трехскоростных двигателей. В отечественной серии МАП предусмотрены двухскоростные двигатели на мощность 2—10 кВт и трехскоростные — на мощность 10—60 кВт.

## § 3.2.9. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДЛЯ ВЫБОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ТОРМОЗОВ К ЯКОРНО-ШВАРТОВНЫМ И ШВАРТОВНЫМ МЕХАНИЗМАМ

**Условные обозначения.** Калибр якорной цепи, мм:

$d$ — общее обозначение;
$d_{1н}$, $d_{2н}$ — обыкновенной цепи;
$d_{1п}$, $d_{2п}$ — цепи повышенной прочности;
$d_{расч}$ — наибольший для данной модели.

Примечание. Индексы 1 и 2 соответствуют якорным цепям разного калибра, объединенным данной моделью якорно-швартовного механизма.

$m$ — коэффициент прочности якорной цепи.

Тяговое усилие на звездочке механизма, Н:

$F_{ном.\ расч}$ — расчетное номинальное при выбирании якорной цепи наибольшего калибра с номинальной скоростью;
$F_{м.\ расч}$ — расчетное при выбирании якорной цепи наибольшего калибра с малой скоростью;
$F_{тр.\ расч}$ — при травлении якорной цепи наибольшего калибра электродвигателем;
$F_{max}$ — при действии максимального момента электродвигателя;
$F_{проб}$ — пробная нагрузка цепи;
$F_{э.\ т.\ расч}$ — расчетное удерживаемое электромагнитным тормозом на валу электродвигателя;



$a$ — удельное при выбирании якорной цепи с номинальной скоростью, МПа;
$a'$ — то же с малой скоростью, МПа;

$k = \frac{F_{э.\ т.\ расч}}{F_{ном.\ расч}}$ — отношение, значения которого приведены в табл. 3.2.4.

Тяговое усилие на швартовном барабане, Н:

$F_{ш}$ — при выбирании каната с номинальной скоростью;
$F_{ш.\ м}$ — то же с малой скоростью;
$F_{ш.\ б}$ — при выбирании ненагруженного каната с наибольшей скоростью;
$F_{ш.\ разр}$ — разрывное усилие швартовного каната;
$F_{ш\ max}$ — максимальное усилие, развиваемое электродвигателем на швартовном барабане.

Напряжение растяжения в якорной цепи на звездочке, МПа:

$\sigma_{расч}$ — расчетное;
$\sigma_{max}$ — максимальное, возникающее от действия наибольшего усилия, создаваемого электродвигателем;
$\sigma_{расч\ max}$ — предельно допустимое из условия прочности цепи;
$\sigma_{э.\ т}$ — соответствующее тормозному моменту тормоза на валу электродвигателя.

Скорость выбирания якорной цепи, м/мин:

$v_{ном}$ — номинальная;
$v_{м}$ — малая (при подходе якоря к клюзу);
$v_{\sigma\ расч}$ — при расчетном напряжении в якорной цепи.

Скорость выбирания швартовного каната, м/мин:

$v_{ш}$ — номинальная;
$v_{ш.\ м}$ — малая;
$v_{ш.\ б}$ — наибольшая.

Расчетный диаметр цепной звездочки, м:

$D_{з1н}$, $D_{з2н}$ — для цепи обыкновенной;
$D_{з1п}$, $D_{з2п}$ — для цепи повышенной прочности;
$D_{ш}$ — диаметр швартовного барабана.

Расчетный диаметр вьюшки каната на швартовном барабане, м:

$D_{ш.\ м}$, $D_{ш.\ с}$ — стального каната, для определения момента и скорости соответственно;
$D'_{ш.\ м}$, $D'_{ш.\ с}$ — то же растительного каната;
$D''_{ш.\ м}$, $D''_{ш.\ с}$ — то же синтетического каната.

Расчетный момент на валу электродвигателя, Н·м:

$M_{ном.\ расч}$ — при выбирании якорной цепи наибольшего калибра с номинальной скоростью;
$M_{м.\ расч}$ — то же с малой скоростью;
$M_{к}$ — отнесенный к каждому калибру цепи данной модели;
$M_{э.\ т.\ расч}$ — требуемый для торможения;
$M_{тр.\ расч}$ — при травлении якоря;
$M_{пуск.\ треб}$ — требуемый по условиям пуска;
$M_{ш}$ — при выбирании швартовного каната с номинальным тяговым усилием и номинальной скоростью;
$M_{ш.\ м}$ — при выбирании швартовного каната с малой скоростью;
$M_{ш.\ б}$ — то же, с наибольшей скоростью;
$Q$ — наибольшая масса якоря, кг;
$q$ — масса 1 м якорной цепи, кг;
$L$ — наибольшая длина якорной цепи за клюзом, м;
$L'$ — длина якорной цепи, которую может поднять электродвигатель, м;
$i_{я}$ — передаточное число между электродвигателем и цепной звездочкой;
$i_{ш}$ — то же между электродвигателем и швартовным барабаном;

$\eta_{кл}$ — КПД клюза;
$\eta_я$, $\eta_ш$ — прямые КПД при выбирании якорной цепи и швартовов соответственно;
$\eta'_я$, $\eta'_ш$ — обратные КПД;
$P_{ном}$, $n_{ном}$, $M_{ном}$ — номинальные данные электродвигателя;
$M_{пуск}$, $M_{ст}$, $M_{max}$ — пусковой, стояночный и максимальный моменты электродвигателя соответственно:
$M_т$ — момент электромагнитного тормоза.

**Указания к расчету мощности электродвигателей якорно-швартовных механизмов.** Общие указания. Изложенные ниже методы расчета распространяются на одно- и двухдвигательные приводы с контакторным и контроллерным управлением.

Для якорно-швартовных и швартовных механизмов на переменном токе применяются асинхронные короткозамкнутые многоскоростные электродвигатели, а для механизмов на постоянном токе — электродвигатели смешанного возбуждения. В случае разработки электропривода на переменном и постоянном токе передаточное число желательно принимать единым. С этой целью наиболее целесообразно делать расчет одновременно для переменного и постоянного тока.

При выборе электродвигателя для якорно-швартовного механизма с повышенной скоростью выбирания якорной цепи отношение $L'/L$ должно быть не менее 0,85.

Напряжение растяжения $\sigma_{расч}$ соответствует КПД клюза для якорно-швартовных механизмов, равному $\eta_{кл} = 0{,}77$.

Напряжение в якорной цепи $\sigma_{э.т}$, соответствующее тормозному моменту на валу электродвигателя, определено при $\eta_{кл} = 0{,}88$ для всех якорно-швартовных механизмов. Для всех якорно-швартовных и швартовных механизмов, требующих обеспечения малой и наибольшей скоростей выбирания швартовного каната, а также для специальных якорно-швартовных механизмов на постоянном токе должны применяться электродвигатели, допускающие возможно больший диапазон регулирования скорости.

*Таблица 3.2.5*

**Асинхронные двигатели серии МАП 100-700 для якорно-швартовных механизмов**

| Группа якорно-швартовного механизма | Модель механизма | Число полюсов 2p двигателя | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | при выбирании якорной цепи | | при выбирании швартовного каната | | | при травлении якорной цепи |
| | | с номинальным тяговым усилием | с малой скоростью | с номинальной скоростью | с малой скоростью | с наибольшей скоростью | |
| Первая | 1—3 | 4 | 8 | 4 | — | — | 4 |
| | 4 | 8 | 16 | 8 | — | 4 | 8 |
| | 5—11 | 8 | 16 | 8 | 16 | 4 | 8 |
| | 12 | 8 | 16 | — | — | — | 8 |
| Вторая | 1—3 | 4 | 8 | 4 | — | — | 8 |
| | 4 | 4 | 16 | 8 | — | 4 | 8 |
| | 5—10 | 4 | 16 | 8 | 16 | 4 | 8 |
| Третья | 1—3 | 4 | 8 | 4 | — | — | 4 |



Дополнительные указания к расчету мощности электродвигателей якорно-швартовных механизмов. Проверку электродвигателя на нагрев необходимо проводить в том случае, если номинальный 30-минутный момент выбранного электродвигателя меньше момента, составляющего 0,7 номинального расчетного, соответствующего номинальному тяговому усилию на звездочке механизмов второй группы (с повышенной скоростью выбирания якорной цепи), а также меньше номинального расчетного момента, соответствующего номинальному тяговому усилию на звездочке механизмов первой и третьей групп (с нормальной и пониженной скоростями выбирания якорной цепи).

Требуемые скорости выбирания и травления якорной цепи и выбирания швартовного каната должны обеспечиваться:

а) при работе электродвигателей переменного тока на обмотке с соответствующим числом полюсов согласно табл. 3.2.5, составленной применительно к электродвигателям серии МАП100-700;

б) при работе электродвигателей постоянного тока с номинальной частотой вращения на естественной характеристике (в отдельных случаях на искусственной характеристике); во всех остальных режимах на соответствующих искусственных характеристиках.

Расчеты по выбору электродвигателей для соединенных шпилей производятся аналогично расчету одинарного шпиля.

Дополнительные указания к расчету мощности электродвигателей швартовных шпилей. Требуемые скорости выбирания швартовного каната должны обеспечиваться:

а) при работе электродвигателей переменного тока на обмотке с соответствующим числом полюсов согласно табл. 3.2.6, составленной применительно к электродвигателям серии МАП100-700;

*Таблица 3.2.6*

**Асинхронные двигатели серии МАП 100-700 для швартовных механизмов**

| Модель механизма | Число полюсов 2p двигателя при выбирании швартовного каната со скоростью | | |
|---|---|---|---|
| | номинальной | малой | наибольшей |
| I—II | 4 или 8 | — | — |
| III—IV | 8 | 16 | 4 |

б) при работе электродвигателей постоянного тока с номинальной частотой вращения на естественной характеристике (в отдельных случаях на искусственных характеристиках), с малой и наибольшей частотой вращения на соответствующих искусственных характеристиках.

Электродвигатели швартовных шпилей на основной характеристике должны развивать максимальный момент, составляющий не менее 200% момента, соответствующего номинальному тяговому усилию шпиля.

**Расчет мощности электродвигателей якорно-швартовных механизмов.** Предварительный выбор мощности электродвигателя:

1. Расчетное номинальное тяговое усилие на звездочке в ньютонах

$$F_{ном.\ расч} = amd^2_{расч},$$

где $a$, $m$ определяются по табл. 3.2.4.

2. Расчетный номинальный момент на валу электродвигателя

$$M_{ном.\ расч} = \frac{F_{ном.\ расч} D_{э.\ расч}}{2i_я \eta_я}.$$

3. Частота вращения электродвигателя в оборотах в минуту, необходимая для обеспечения заданной номинальной скорости выбирания якорной цепи,

$$n_{\text{ном. треб}} = \frac{v_{\text{ном}} i_{\text{я}}}{\pi D_{\text{з. расч}}}.$$

4. Мощность электродвигателя в киловаттах, требуемая для выбирания якорной цепи с заданной номинальной скоростью,

$$P_{\text{ном. треб}} = \frac{M_{\text{ном. расч}}\, n_{\text{ном. треб}}}{9556}.$$

5. Расчетное тяговое усилие на звездочке при выбирании якорной цепи с малой скоростью

$$F_{\text{м. расч}} = a' m d^2_{\text{расч}},$$

где $a'$ и $m$ определяются по табл. 3.2.4.

6—8. По приведенным выше формулам на основании $F_{\text{м. расч}}$ определяются момент $M_{\text{м. расч}}$, частота вращения $n_{\text{м. треб}}$ и мощность $P_{\text{м. треб}}$.

9. Требуемое значение пускового момента электродвигателя на основной частоте вращения (для электродвигателя переменного тока) и на характеристике, предназначенной для пуска (для электродвигателя постоянного тока),

$$M_{\text{пуск. треб}} \geqslant 2M_{\text{ном. расч}}.$$

10. Расчетный момент в ньютон-метрах на валу электродвигателя при выбирании швартовного каната с номинальным тяговым усилием:

для стального каната

$$M_{\text{ш}} = \frac{F_{\text{ш}} D_{\text{ш. м}}}{2 i_{\text{ш}} \eta_{\text{ш}}};$$

для растительного и синтетического канатов $M'_{\text{ш}}$ и $M''_{\text{ш}}$ соответственно.

11. Расчетное тяговое усилие на звездочке, удерживаемое электромагнитным тормозом на валу электродвигателя,

$$F_{\text{э. т. расч}} = k F_{\text{ном. расч}},$$

где $k$ определяется по табл. 3.2.4.

12. Требуемый тормозной момент электромагнитного тормоза на валу электродвигателя в ньютон-метрах

$$M_{\text{э. т. расч}} = \frac{F_{\text{э. т. расч}} D_{\text{з. расч}} \eta'_{\text{я}}}{2 i_{\text{я}}}.$$

13. На основании полученных данных выбирается электродвигатель:

— переменного тока асинхронный с короткозамкнутым ротором серии МАП100-700 30-минутного режима работы на основной частоте вращения, допускающий стоянку под током после номинального режима работы. Фиксируются следующие данные: тип двигателя, мощность, режим работы, частота вращения, напряжение, номинальный ток статора, максимальный и пусковой моменты, допустимое время стоянки под пусковым током, характеристики $M = f(s)$ и $I = f(s)$, тип электромагнитного тормоза на валу электродвигателя, режим работы тормоза, тормозной момент;

— постоянного тока смешанного возбуждения серии ДПМ. Фиксируются следующие данные: тип двигателя, режим работы, номинальные напряжения, ток и частота вращения, допустимое время стоянки на характеристике, предназначенной для данного режима, характеристики $n = f(I)$ и $n = f(M)$, тип электромагнитного тормоза, режим работы тормоза, тормозной момент.



К выбранному электродвигателю предъявляются следующие требования:

а) номинальный 30-минутный момент электродвигателя на основной частоте вращения для механизмов первой и третьей групп должен быть не менее номинального расчетного момента:

$$M_{\text{ном}} \geqslant M_{\text{ном. расч}},$$

и не менее момента при выбирании швартовного каната с номинальным тяговым усилием:

$$M_{\text{ном}} \geqslant M_{\text{ш}},$$

а для механизмов второй группы

$$M_{\text{ном}} \geqslant 0{,}7 M_{\text{ном. расч}};$$

$$M_{\text{ном}} \geqslant M_{\text{ш}};$$

б) каталожный пусковой момент электродвигателя на основной частоте вращения (для электродвигателя переменного тока) и на характеристике, предназначенной для пуска (для электродвигателя постоянного тока), должен быть не менее двойного расчетного момента:

$$M_{\text{пуск}} \geqslant 2M_{\text{ном. расч}};$$

в) момент стоянки электродвигателя постоянного тока

$$M_{\text{ст}} \geqslant 1{,}4 M_{\text{ном. расч}};$$

г) момент электромагнитного тормоза

$$M_{\text{т}} \geqslant M_{\text{э. т. расч}}.$$

Проверка выбранного электродвигателя на обеспечение заданных скоростей выбирания якорной цепи.

14. Расчетные моменты на валу электродвигателя при выбирании якорной цепи, отнесенные к каждому калибру цепи данной модели:

$$M_{\text{к. ном1}} = \frac{a m d^2_{1\text{н}} D_{\text{з. 1н}}}{2 i_{\text{я}} \eta_{\text{я}}}.$$

Аналогично для $d_{2\text{н}}$ и $D_{\text{з2н}}$ определяется $M_{\text{к. ном2}}$, по $d_{1\text{п}}$ и $D_{\text{з1п}}$ — $M_{\text{к. ном3}}$, по $d_{2\text{п}}$ и $D_{\text{з2п}}$ — $M_{\text{к. ном4}}$; для $a'$ определяются соответственно $M_{\text{к. м1}}$, $M_{\text{к. м2}}$, $M_{\text{к. м3}}$, $M_{\text{к. м4}}$.

15. Частоты вращения электродвигателя $n_{\text{к. ном}}$ и $n_{\text{к. м}}$ при $M_{\text{к. ном}}$ и $M_{\text{к. м}}$ определяются по характеристике $M = f(s)$ для электродвигателя переменного тока и по характеристике $n = f(M)$ для электродвигателя постоянного тока.

16. Номинальные скорости выбирания якорных цепей в метрах в минуту

$$v_{\text{к. ном1}} = \frac{\pi D_{\text{з1н}} n_{\text{к. ном1}}}{i_{\text{я}}}.$$

Аналогично определяются скорости $v_{\text{к. ном2}}$, $v_{\text{к. ном3}}$, $v_{\text{к. ном4}}$ и соответственно $v_{\text{к. м1}}$, $v_{\text{к. м2}}$, $v_{\text{к. м3}}$, $v_{\text{к. м4}}$.

Проверка выбранного электродвигателя по обеспечению требуемых скоростей выбирания швартовного каната.

17. Расчетный момент на валу электродвигателя при выбирании швартовного каната с малой скоростью:

для стального каната $M_{\text{ш. м}} = 0{,}75 M_{\text{ш}}$;

для растительного каната $M'_{\text{ш. м}} = 0{,}75 M'_{\text{ш}}$;

для синтетического каната $M''_{\text{ш. м}} = 0{,}75 M''_{\text{ш}}$.

18. То же с наибольшей скоростью (ненагруженного каната):

для стального каната $M_{\text{ш. б}} = 0{,}2 M_{\text{ш}}$; аналогично вычисляются $M'_{\text{ш. б}}$ и $M''_{\text{ш. б}}$.

19. По характеристикам $M = f(s)$ или $n = f(M)$ определяются для $M_{ш}$, $M_{ш.м}$, $M_{ш.б}$ частоты вращения электродвигателей $n_{ш}$, $n_{ш.м}$ и $n_{ш.б}$.

20—22. Номинальная скорость выбирания швартовного стального каната в метрах в минуту

$$v_{ш} = \frac{\pi D_{ш.с}\, n_{ш}}{i_{ш}};$$

аналогично находятся $v'_{ш}$ и $v''_{ш}$; для малой скорости $v_{ш.м}$, $v'_{ш.м}$ и $v''_{ш.м}$; для наибольшей скорости $v_{ш.б}$, $v'_{ш.б}$ и $v''_{ш.б}$.

Определение наибольшего усилия в якорных цепях при действии пускового момента электродвигателя.

23. Наибольшее усилие в якорных цепях

$$F_{max} = \frac{2F_{пуск} i_{я} \eta_{я}}{D_{з}}.$$

Это усилие не должно превышать половину пробного $F_{max} \leqslant 0{,}5F_{проб}$. Если усилие $F_{max}$ превышает $0{,}5F_{проб}$ для данной якорной цепи, то на валу электродвигателя следует установить муфту предельного момента.

Определение скорости травления электродвигателем якорной цепи наибольшего калибра.

24. Расчетная нагрузка механизма при травлении якорной цепи

$$F_{тр.\,расч} = 0{,}6F_{ном.\,расч}.$$

25. Расчетный момент на валу электродвигателя при травлении якорной цепи

$$M_{тр.\,расч} = \frac{F_{тр.\,расч} D_{з.\,расч} \eta_{я}}{2i_{я}}.$$

26. Частота вращения $n_{тр}$, соответствующая $M_{тр.\,расч}$, определяется по характеристике $M = f(s)$ или $n = f(M)$. Она не должна превышать максимальную допустимую частоту вращения для выбранного электродвигателя.

27. Скорость травления цепи электродвигателем в метрах в минуту

$$v_{тр} = \frac{\pi D_{з.\,расч} n_{тр}}{i_{я}}.$$

Определение длины якорной цепи, которую может поднять выбранный электродвигатель в аварийном режиме.

28. Длина в метрах цепи (наибольшего калибра), которую может поднять электродвигатель,

$$L' = \left(\frac{M_{пуск} i_{я}}{1{,}2\alpha D_{з.\,расч}} - Q\right)\frac{1}{q},$$

где

$$\alpha = \frac{0{,}87}{2\eta_{кл}\eta_{я}}.$$

29. Определяется отношение $L'/L$. Электропривод должен обеспечивать подъем якоря, висящего на цепи, вытравленной на 85% ее длины (за клюзом), т. е. $L'/L = 0{,}85$ (аварийный режим).

Проверка выбранного электродвигателя на нагрев.

30. Длина в метрах цепной линии при стоянке на заданной глубине

$$l_{ц} = \sqrt{\frac{2hT_2}{q_{расч} \cdot 0{,}87} - h^2},$$



где

$$T_2 = F_{ном.\,расч}\eta_{кл} = amd^2_{расч}\eta_{кл}$$

31. Длина в метрах цепи, лежащей на грунте,

$$l_1 = L - l_{ц}.$$

32. Длина в метрах цепи, выбираемой при переменном тяговом усилии,

$$l_2 = l_{ц} - h.$$

33. Усилия на звездочке при выбирании якорной цепи, Н:
при подтягивании к якорю $F_1 = F_{ном.\,расч} = amd^2_{расч}$;
при отрыве якоря $F_2 = 2F_1$;
в начале подъема якоря с заданной глубины $F_3 = 0{,}5\,(F_1 + F_4)$;
при подходе якоря к клюзу $F_4 = a'md^2_{расч}$.

34. Моменты на валу электродвигателя для указанных стадий съемки с якоря $M_1$, $M_2$, $M_3$, $M_4$ определяются по приведенным выше формулам.

35. Частоты вращения $n_1$, $n_2$, $n_3$, $n_4$ и токи $I_1$, $I_2$, $I_3$, $I_4$ определяются по характеристикам $M = f(s)$, $n = f(M)$ на основной частоте вращения и $n = f(I)$.

36. Время выбирания цепи на отдельных стадиях

$$t_1 = \frac{l_1 i_{я}}{\pi D_{з.\,расч} n_1}; \qquad t_2 = \frac{2l_2 i_{я}}{\pi D_{з.\,расч}(n_1 + n_2)};$$

$t_3$ — время стоянки под током;

$$t_4 = \frac{2hi_{я}}{\pi D_{з.\,расч}(n_3 + n_4)};$$

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4.$$

37. Среднеквадратичный ток двигателя

$$I_{с.\,кв} = \sqrt{\frac{\sum I_i^2 t_i}{T}}.$$

При этом должно быть выполнено условие: $I_{с.\,кв} \leqslant I_{ном}$ или $I_{доп} \geqslant I_{с.\,кв}$, где $I_{доп} = I_{ном}\sqrt{\frac{30}{T}}$.

На основании этих результатов делается вывод о пригодности выбранного электродвигателя для данного механизма.

**Расчет мощности электродвигателей швартовных шпилей.** Предварительный выбор мощности электродвигателя:

1. Расчетные моменты электродвигателя при выбирании швартовного каната с номинальным тяговым усилием (для стального, растительного и синтетического канатов)

$$M_{ш} = \frac{F_{ш} D_{ш.м}}{2i_{ш}\eta_{ш}}.$$

2. Соответствующие п. 1 частоты вращения в оборотах в минуту

$$n_{ном.\,треб} = \frac{v_{ш} i_{ш}}{\pi D_{ш.с}}.$$

3. Соответствующие пп. 1 и 2 мощности электродвигателя в киловаттах

$$P_{ном.\,треб} = \frac{M_{ш} n_{ном.\,треб}}{9556}.$$

4. Требуемый пусковой момент электродвигателя: для переменного тока — на основной частоте вращения, для постоянного тока — на характеристике, предназначенной для пуска,

$$M_{\text{пуск. треб}} = 2M_{\text{ш}}.$$

5. Требуемый тормозной момент электромагнитного тормоза на валу электродвигателя

$$M_{\text{э. т. расч}} = \frac{1{,}5F_{\text{ш}}D_{\text{ш. м}}\eta'_{\text{ш}}}{2i_{\text{ш}}}.$$

6. Фиксируются данные электродвигателя. К выбранному электродвигателю предъявляются следующие требования:

а) номинальный 30-минутный момент электродвигателя на основной частоте вращения должен быть

$$M_{\text{ном}} \geqslant M_{\text{ш}};$$

б) тормозной момент электромагнитного тормоза должен обеспечивать удержание действующего на шварговный барабан усилия извне, равного 150% номинального тягового усилия шпиля:

$$M_{\text{т}} \geqslant M_{\text{э. т. расч}} = 1{,}5M_{\text{ш}}.$$

Проверка выбранного электродвигателя на обеспечение заданных скоростей выбирания швартовного каната:

7. Расчетные моменты на валу электродвигателя при выбирании швартовного каната с малой скоростью (для трех типов каната)

$$M_{\text{ш. м}} = 0{,}75M_{\text{ш}}.$$

Для IV модели шпилей допускается тяговое усилие в этом режиме не менее $0{,}5F_{\text{ш}}$.

8. То же с наибольшей скоростью (для ненагруженного каната) $M_{\text{ш. б}} = 0{,}2M_{\text{ш}}$ — для трех типов каната.

9. Соответственно моментам $M_{\text{ш}}$, $M_{\text{ш. м}}$ и $M_{\text{ш. б}}$ по характеристикам двигателя находятся частоты вращения $n_{\text{ш}}$, $n_{\text{ш. м}}$ и $n_{\text{ш. б}}$ — для трех типов каната.

10. Скорости выбирания швартовного каната, м/мин:

номинальные

$$v_{\text{ш}} = \frac{\pi D_{\text{ш. с}} n_{\text{ш}}}{i_{\text{ш}}};$$

малые — по $n_{\text{ш. м}}$; наибольшие — по $n_{\text{ш. б}}$.

Определение максимальных усилий, развиваемых электродвигателями на швартовном барабане:

11. Окружные усилия на швартовном барабане при действии максимального момента электродвигателя переменного тока или момента, соответствующего предельной уставке защитного устройства электродвигателя постоянного тока,

$$F_{\text{ш, max}} = \frac{2i_{\text{ш}}\eta_{\text{ш}}M_{\text{max}}}{D_{\text{ш. м}}}$$

(для трех типов каната).

12. Допустимое усилие на швартовном барабане из условий прочности швартовного каната

$$F_{\text{доп}} = 0{,}75F_{\text{ш. разр}}.$$

При этом должно соблюдаться следующее условие:

$$F_{\text{ш max}} \leqslant F_{\text{доп}}.$$

На основании полученных результатов делается вывод о пригодности выбранного электродвигателя для данного шпиля.



## § 3.2.10. УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЯКОРНО-ШВАРТОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ

**Область применения различных систем управления электроприводами якорно-швартовных механизмов.** Для управления электроприводами якорно-швартовных механизмов применяются кулачковые и магнитные контроллеры, а также система Г—Д. Кулачковые контроллеры рекомендуются для управления двигателями постоянного тока мощностью до 20 кВт, а также всеми двух- и трехскоростными двигателями переменного тока мощностью до 20 кВт. Для остальных электроприводов (20—80 кВт) целесообразно применение магнитных контроллеров, обеспечивающих независимый от оператора процесс пуска, автоматическое изменение частоты вращения в зависимости от нагрузки на валу и безопасность быстрого реверсирования.

Система Г—Д по сравнению с системой магнитного контроллера дает увеличение массы примерно на 40%, и поэтому применяется при мощности электропривода выше 80 кВт, когда работа магнитного контроллера оказывается ненадежной или когда требуется особая защищенность от искрообразования.

**Требования к коммутирующим аппаратам.** Во всех предусмотренных режимах работы электропривода якорно-швартовных механизмов пускорегулирующая аппаратура не должна быть перегружена выше допустимых для нее норм. Коммутационная способность и термическая стойкость аппаратуры должны быть не ниже соответствующих параметров исполнительных двигателей.

Учитывая большое значение постоянной времени нагрева электродвигателя, необходимо при выборе аппаратов для обеспечения примерно одинакового нагрева аппаратов и обмоток двигателя при кратковременных перегрузках выполнить следующие условия:

а) номинальный ток 30-минутного режима контактов в цепи короткозамкнутого асинхронного двигателя шпилевого исполнения должен быть не менее чем в 1,4 раза больше номинального тока соответствующей обмотки двигателя в этом же режиме;

б) для двигателей постоянного тока указанная кратность тока должна составлять 1,2.

Выбранный в соответствии с этими условиями по номинальному току аппарат проверяется на коммутационную способность и термическую стойкость.

Для обеспечения коммутационной способности необходимо, чтобы гарантированный в каталогах ток включения аппаратов для двигателей переменного тока был больше пускового тока соответствующей обмотки, а для двигателей постоянного тока — больше тока уставки максимальной защиты.

Проверка термической стойкости контактов производится только для электропривода переменного тока. Допустимое время (в секундах) протекания тока стоянки по контактам должно быть больше допустимого времени стоянки под током электродвигателя:

$$t_{\text{ст. к}} \approx 3600\left(\frac{I_{\text{ном 60}}}{I_{\text{пуск}}}\right)^3 > t_{\text{ст. дв}},$$

где $I_{\text{ном 60}}$ — номинальный ток контактов в режиме 60 мин, А; $I_{\text{пуск}}$ — пусковой ток (ток стоянки) двигателя на соответствующей обмотке, А.

**Защита шпилевых двигателей постоянного тока от перегрузок.** Защита от перегрузок осуществляется двумя видами реле: грузовыми и максимальными.

Грузовые реле защищают двигатель от технологических перегрузок, обеспечивая автоматическое снижение частоты вращения электродвигателя в процессе съемки с якоря.

Максимальная защита отключает электродвигатель при быстром нарастании перегрузок или неисправности в работе схемы. Для электроприводов постоянного тока якорно-швартовных механизмов уставка максимальных реле составляет 250—330% номинального тока двигателя в 30-минутном режиме.

**Защита шпилевых двигателей переменного тока.** Короткозамкнутые асинхронные двигатели шпилевого исполнения имеют следующие соотношения потерь для различных режимов:

1 — для номинального режима;
3—8 — для режима работы при $2M_{ном}$;
20—40 — для стоянки под током при $2{,}2M_{ном}$.

В диапазоне нагрузок от холостого хода до близкой к максимальному моменту двигателя эти двигатели не имеют недопустимых тепловых перегрузок даже при достаточно продолжительной работе со значительной перегрузкой. Наиболее опасным для двигателя является режим стоянки под током, поэтому основной задачей защиты является защита двигателя от недопустимых перегревов в режиме стоянки под током.

Для двигателей типа МАП предельная температура составляет 240—280° С. В качестве защитных реле обычно применяются температурно-токовые реле типа ТРТ. Они могут быть использованы либо для полного отключения двигателя (максимальная защита), либо для отключения перегретой обмотки с переходом на обмотку низшей скорости (грузовая защита).

**Некоторые типовые схемы электроприводов якорно-швартовных механизмов.** На рис. 3.2.4 представлена схема электропривода постоянного тока при управлении с помощью кулачкового контроллера серии КВ-2500 для двигателей мощностью 6—20 кВт. Схема симметрична для обоих направлений вращения, причем на первых положениях якорь шунтируется резистором *R1*.

На всех остальных положениях «Травить» параллельно якорю подключаются резисторы *R1* и *R2* с целью создания необходимого тормозного момента для травления якорной цепи электродвигателем на большую глубину.

Максимальная нулевая защита основана на применении автоматического линейного выключателя *Л*, имеющего максимальное реле *РМ*.

Узел грузовой защиты включает в себя грузовое реле *РГ* и двухполюсный контактор *КГ*. Для того чтобы наброс нагрузки (перед отрывом якоря от грунта или в некоторые моменты швартования) не вызвал отключения максимальной защиты, грузовой узел в цепь якоря двигателя автоматически вводит пусковые резисторы *R3* и *R4*, обеспечивающие стоянку двигателя под током с ограниченным моментом стоянки. После снижения перегрузки повторный пуск производится возвращением маховика контроллера в третье положение, на котором срабатывает контактор *КГ*.

При срабатывании грузовой защиты поток параллельной обмотки автоматически усиливается по мере уменьшения частоты вращения двигателя вследствие включения на шестом положении «Выбирать» цепи ослабления поля через пусковые резисторы *R3*, *R4* и контакт *К2* контроллера. Без срабатывания грузовой защиты цепь ослабления поля на шестом положении «Выбирать» обеспечивает повышенную скорость выбирания ненагруженного швартовного троса. Для остановки двигателя в конце периода электрического торможения служит электромагнитный тормоз *ЭмТ*.

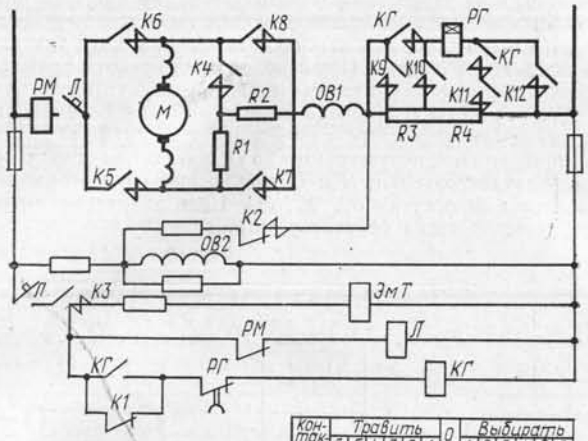
На рис. 3.2.5 дана схема управления переменного тока для якорно-швартовных механизмов мощностью от 10 до 25 кВт с помощью кулачкового контроллера серии КВ-2000. Приводной двигатель трехскоростной, причем основной частотой вращения является средняя, на ней производится выбирание якорной цепи с номинальной нагрузкой и отрыв якоря от грунта. Высшая скорость используется для выбирания свободных швартовных канатов, а низшая — для втягивания якоря в клюз и безопасного подтягивания судна к причалу.

Переключение группы обмоток малой и средней частоты вращения и обмотки большой частоты вращения осуществляется контакторами *КГ1* и *КГ2*.

Работа на большой скорости ограничивается сравнительно небольшими нагрузками. Чтобы не допустить перегрузки, в схеме предусмотрено тепловое реле *РГ*, имеющее номинальный ток на одну ступень ниже тока обычной тепловой защиты. При срабатывании реле *РГ* катушки контакторов *КГ1* и *КГ2* размыкаются, и двигатель переключается с большей частоты вращения на среднюю.

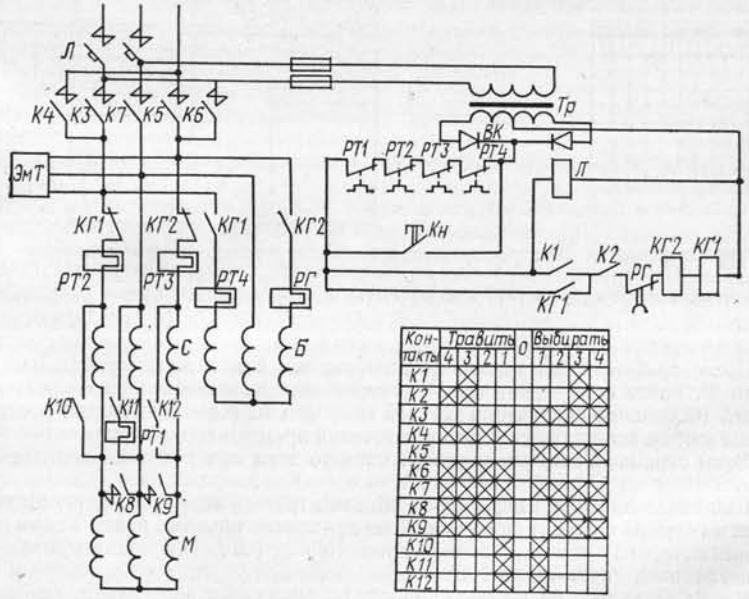
Чтобы исключить звонковое включение обмотки большой скорости при перегрузке, катушки контакторов *КГ1* и *КГ2* включаются на промежуточном






| Контакты | Травить 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | Выбирать 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| К1 | | | | | | | | | | | | | |
| К2 | | | | | | | | | | | | | |
| К3 | | | | | | | | | | | | | |
| К4 | | | | | | | | | | | | | |
| К5 | | | | | | | | | | | | | |
| К6 | | | | | | | | | | | | | |
| К7 | | | | | | | | | | | | | |
| К8 | | | | | | | | | | | | | |
| К9 | | | | | | | | | | | | | |
| К10 | | | | | | | | | | | | | |
| К11 | | | | | | | | | | | | | |
| К12 | | | | | | | | | | | | | |

Рис. 3.2.4. Схема электропривода постоянного тока при управлении с помощью кулачкового контроллера серии КВ-2500.




| Контакты | Травить 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | Выбирать 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| К1 | | | | | | | | | |
| К2 | | | | | | | | | |
| К3 | | | | | | | | | |
| К4 | | | | | | | | | |
| К5 | | | | | | | | | |
| К6 | | | | | | | | | |
| К7 | | | | | | | | | |
| К8 | | | | | | | | | |
| К9 | | | | | | | | | |
| К10 | | | | | | | | | |
| К11 | | | | | | | | | |
| К12 | | | | | | | | | |

Рис. 3.2.5. Схема электропривода переменного тока при управлении с помощью кулачкового контроллера серии КВ-2000.

третьем положении, а на четвертом рабочем положении катушки питаются через контакты *КГ1*.

Защита контроллера типовая с помощью автоматического линейного включателя *Л* и тепловых реле *РТ1—РТ4*. При необходимости работы привода в условиях тепловой перегрузки двигателя контакты тепловых реле шунтируются кнопкой *Кн*.

На рис. 3.2.6 представлена схема электропривода переменного тока при управлении с помощью магнитных контроллеров БТ73 и БТ94А для якорно-швартовных механизмов мощностью свыше 25 кВт. В схеме применены двухполюсные реверсивные контакторы *В* и *Н* и трехполюсные контакторы переключения обмоток (контакторы скоростей) *1С*, *2С*, *3С*. Цепь электромагнитного тормоза коммутируется двухполюсным контактором *Т*.

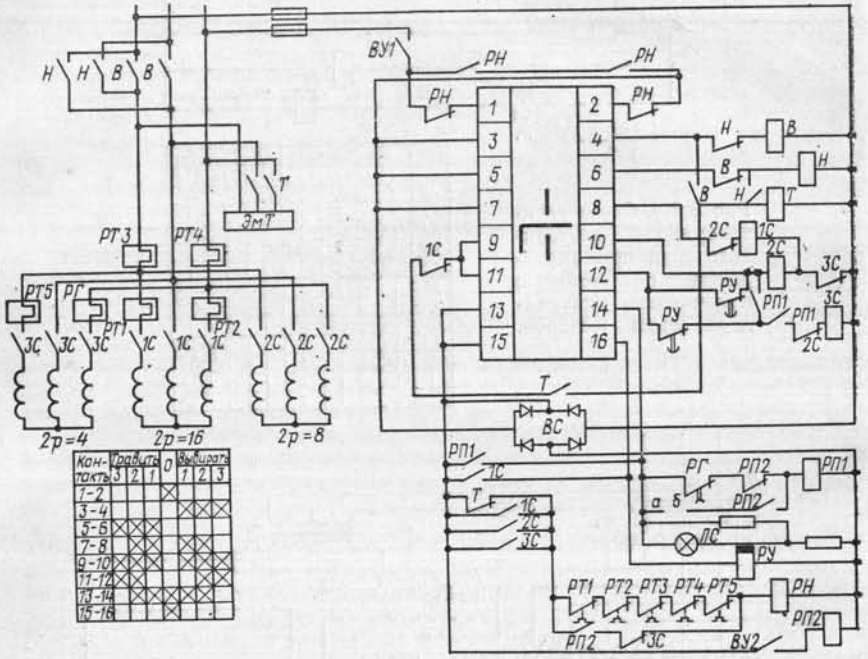



Рис. 3.2.6. Схема электропривода переменного тока при управлении с помощью магнитных контроллеров БТ73 и БТ94А.

После срабатывания одного из реверсивных контакторов срабатывает контактор *Т*, после чего может быть включен один из контакторов скоростей: *1С* или *2С*. Включение контактора третьей скорости *3С* возможно только после разгона на второй скорости, т. е. после истечения времени выдержки реле ускорения РУ. Этим ограничивается величина пускового тока при разгоне на третьей скорости.

Для предотвращения перегрузки обмотки третьей скорости, не рассчитанной на режим отрыва якоря от грунта, в схеме применено тепловое реле *РГ*, при срабатывании которого с помощью промежуточного реле *РП1* происходит переключение двигателя на вторую скорость.

Чтобы вернуться на третью скорость по окончании перегрузки, необходимо рукоятку командоконтроллера перевести кратковременно во второе или первое рабочее положение, на которых происходит включение реле РП1.



Узел нулевой защиты — типовой на базе нулевого реле *РН* постоянного тока. Шунтировка тепловой защиты выполняется с помощью реле *РП2* и выключателя *ВУ2*. Работа при шунтированной защите допускается только на первой и второй скоростях.

При необходимости может быть также шунтирована грузовая защита, что требуется только для электроприводов, рассчитанных на выбирание якорной цепи на третьей скорости. С этой целью оставлены два свободных зажима *а* и *б*, которые замыкаются перемычкой при необходимости отключить грузовую защиту.

# Глава 3.3. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И СУДОВЫХ СИСТЕМ

## § 3.3.1. ОСНОВНЫЕ ОБЪЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ

Судовыми системами принято называть совокупность вспомогательных механизмов: напорных средств, трубопроводов, арматуры и приводов управления, предназначенных для перемещения жидкостей и газов, поддержания заданного давления и температуры, необходимых для обеспечения всех нужд судна. Одни вспомогательные механизмы предназначены обслуживать энергетические установки, а другие — обеспечивать общие нужды судна. Вспомогательные механизмы энергетических установок обеспечивают охлаждение машин, смазку, подачу топлива и воздуха в машинное и котельное отделения. Общие нужды судна обеспечиваются системами для удаления и принятия водяного балласта, удаления трюмной воды, тушения пожара, снабжения пассажиров и команд питьевой и мытьевой водой, вентиляции судовых помещений и т. д.

**Классификация объектов управления.** Вспомогательные механизмы могут быть классифицированы по назначению и по принципу действия.

*По назначению* они разделяются на две основные группы: механизмы судовых силовых установок и механизмы систем.

К механизмам, обеспечивающим работу судовых силовых установок, относятся:

1) конденсаторные или воздушные насосы для создания вакуума в конденсаторе паровой турбины и удаления из него конденсата;

2) циркуляционные насосы для подачи охлаждающей воды в конденсатор;

3) охлаждающие насосы для подачи забортной воды с целью охлаждения цилиндров и крышек главных двигателей внутреннего сгорания и компенсаторов, подшипников и т. д.;

4) котельно-питательные насосы для подачи воды в котел из теплового ящика или из запасных цистерн котельно-питательной воды;

5) топливные и нефтеперекачивающие насосы для подачи топлива из основных цистерн в расходные;

6) насосы для подачи масла к трущимся частям двигателя с целью охлаждения поршней двигателя и заполнения масляных расходных цистерн;

7) вентиляторы для поддержания необходимой температуры и требуемого количества воздуха в машинных отделениях и других служебных помещениях;

8) вентиляторы для обеспечения работы котлов;

9) вентиляторы для охлаждения отдельных механизмов;

10) воздуходувки для обеспечения работы двигателей внутреннего сгорания и др.

К вспомогательным механизмам систем относятся:

1) пожарные насосы для обеспечения водой противопожарных систем (в ряде случаев они используются в качестве балластных или трюмных насосов);

2) осушительные насосы для удаления воды из тех отсеков судна, куда она попадает систематически;

3) балластные насосы для обеспечения водой противопожарных систем (в ряде случаев они используются в качестве резервных насосов противопожарной и санитарной систем);

4) трюмные насосы для удаления воды из форпиков и ахтерпиков, грузовых трюмов, трюмов машинно-котельного отделения и коридоров гребных валов;

5) санитарные насосы для подачи пресной воды из запасных цистерн в расходные;

6) насосы гидравлического привода рулевого устройства;

7) вентиляторы для удаления вредных и взрывоопасных газов из грузовых трюмов;

8) воздуходувки и компрессоры для обеспечения общих нужд судна.

*По принципу действия* насосы подразделяются на: 1) объемные; 2) лопастные центробежные; 3) центробежные осевые.

Механизм для перемещения воздуха и газа в зависимости от величины напора $H$ или сопротивления, которые должен преодолеть механизм, подразделяются на вентиляторы (если напор $H < 1{,}5 \cdot 10^4$ Н/м$^2$); воздуходувки с напором $H$ от $1{,}5 \cdot 10^4$ до $(20 \div 30) \cdot 10^4$ Н/м$^2$ и компрессоры, если напор $H > (20 \div 30) \cdot 10^4$ Н/м$^2$.

**Основные характеристики судовых систем.** Работа насоса в системе характеризуется уровнем Бернулли, основанным на законе сохранения энергии в применении к несжимаемой движущейся жидкости.

Полный напор или полное сопротивление, которые должен преодолеть насос или вентилятор, вычисляются по формуле

$$H = H_{\text{стат}} + \Delta H_{\text{т}} + \Delta H_{\text{м}} = H_{\text{стат}} + \Delta H, \qquad (3.3.1)$$

где $H_{\text{стат}}$ — статическое сопротивление в виде противодавления в котле, цистерне и т. д., в которые подается жидкость, или же статическая высота подачи жидкости; $\Delta H_{\text{т}}$ — сопротивление в трубопроводе; $\Delta H_{\text{м}}$ — местное сопротивление в поворотах труб, арматуры и т. д.; $\Delta H$ — суммарное сопротивление.

Сопротивление в прямолинейном участке трубопровода определяется по выражению

$$\Delta H_{\text{т}} = \frac{\Delta p}{\gamma} = \xi \frac{v^2}{2g}, \qquad (3.3.2)$$

где $\Delta p$ — перепад давления, Н/м$^2$; $\gamma$ — удельный вес рабочей жидкости, Н/м$^3$; $\xi$ — коэффициент, характеризующий сопротивление трения в данном трубопроводе; $v$ — средняя скорость течения жидкости или газа, м/с; $g$ — ускорение силы тяжести, м/с$^2$.

Для трубопроводов с круглым сечением

$$\xi = \lambda \frac{l}{d},$$

тогда

$$\Delta H_{\text{т}} = \frac{\Delta p}{\gamma} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}, \qquad (3.3.3)$$

где $\lambda$ — коэффициент трения; $l$ и $d$ — длина и диаметр трубопровода, м.

Потери напора на местные сопротивления возникают при протекании жидкости или газа через расширения, сужения, повороты трубопровода, краны, клапаны, задвижки и т. д. Обычно потери напора из-за местных сопротивлений определяют следующим выражением:

$$\Delta H_{\text{м}} = \frac{\Delta p}{\gamma} = \sum \xi \frac{v^2}{2g}. \qquad (3.3.4)$$

Поскольку диаметр трубопровода — величина постоянная, то

$$H = H_{\text{стат}} + \left(\lambda \frac{l}{d} + \Sigma \xi\right) \frac{8}{\pi^2 g} \frac{Q^2}{d^4}, \qquad (3.3.5)$$

где $Q$ — расход жидкости.



На рис. 3.3.1 показаны две типичные характеристики трубопровода (кривые *1*, *2*) и характеристика насоса (кривая *4*). Кривая *2* относится к системе с преобладанием статического напора (например, установка для питания паровых котлов), а кривая *1* — к балластной системе.

**Объемные насосы.** *Поршневые насосы* работают по принципу изменения объема цилиндров. В зависимости от числа цилиндров они бывают одно-, двух- и трехцилиндровыми. Если насос вытесняет жидкость при ходе поршня в одном направлении, то он называется насосом прямого действия. Если жидкость вытесняется при каждом ходе поршня в обоих направлениях, то он называется насосом двойного действия.

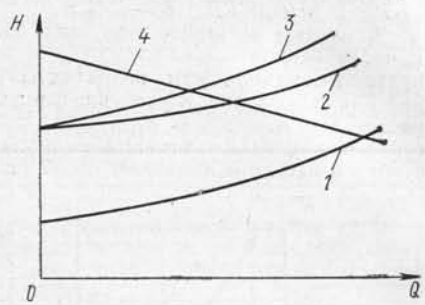


Рис. 3.3.1. Характеристики трубопровода и насоса.

Теоретическая, или наибольшая, производительность насоса $Q_{\text{теор}}$ будет в общем случае определяться суммарным рабочим объемом его цилиндров $v_{\text{н}}$ и частотой его вращения $n$. Так как часть жидкости, сжимаемой поршнями насоса, просачивается, то фактическая производительность насоса будет меньше теоретической. Коэффициент, учитывающий это снижение производительности насоса, носит название объемного коэффициента $\nu_{\text{об}}$ и зависит от давления жидкости в цилиндрах.

На рис. 3.3.2 приведена зависимость объемного коэффициента от давления $\nu_{\text{об}} = f(p)$ (кривая *1*).

Кривая *2* характеризует зависимость механического КПД $\eta_{\text{мех}}$ от давления $[\eta_{\text{мех}} = f(p)]$, а кривая *3* — производительность насоса от давления $[Q_{\text{факт}} = f(p)]$.

Поскольку производительность насоса при возрастании сопротивления не меняется, повышение напора приводит к перегрузке не только трубопровода, но и двигателя. Поэтому, если нагнетательный трубопровод случайно резко закрывается, возникает опасность повреждения насоса и двигателя.

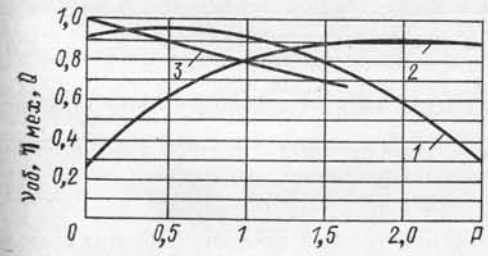


Рис. 3.3.2. Характеристики поршневого насоса и системы при постоянной частоте вращения.

Основными особенностями поршневого насоса являются: постоянство момента и прямая пропорциональность между мощностью и частотой вращения при данном напоре; относительная простота конструкции; возможность применения при высоких напорах; относительно высокий коэффициент полезного действия; возможность запуска без предварительной заливки.

К недостаткам поршневых насосов следует отнести: наличие большого количества трущихся частей; необходимость работы с жидкостью без механических примесей; опасность механических повреждений при перекрывании вентилей, что вызывает необходимость в предохранительных клапанах; потребность в ряде случаев в специальном редукторе для соединения с электродвигателем; непостоянство момента сопротивления и, как одно из следствий, повышение виброактивности.

Поршневые насосы применяются для подачи жидкости с большой высотой всасывания, для обеспечения высокого напора, в качестве трюмных, пожарных, питательных и др., а также для привода рулевого устройства. Они используются в широком диапазоне подач и давлений нагнетания.

*Роторные* (зубчатые и винтовые) *насосы* работают на основе изменения объема рабочих камер, через которые проходит подаваемая жидкость. Теоретическая производительность насоса за один оборот равна объему впадин между зубьями обеих шестерен. Шестеренные насосы являются в настоящее время одним из наиболее распространенных видов роторных насосов. Пределы рабочих параметров шестеренных насосов: подача — от 0,3 до 200 м³/ч, давление нагнетания — до $20 \cdot 10^5$ Н/м² при КПД 55—65%.

Основным преимуществом этих насосов является простота изготовления. К числу недостатков следует отнести неуравновешенность внутренних усилий, пульсацию подачи, шум, вибрацию, ограниченное давление нагнетания.

Для улучшения равномерности подачи жидкости применяются винтовые насосы. Они долговечны, бесшумны в работе, компактны, отличаются малой массой, высоким КПД и отсутствием пульсаций подачи. Винтовые насосы используются в широком диапазоне подач (от 2 до 500 м³/ч) и давлений нагнетания (до $175 \cdot 10^5$ Н/м²) при КПД 60—85%.

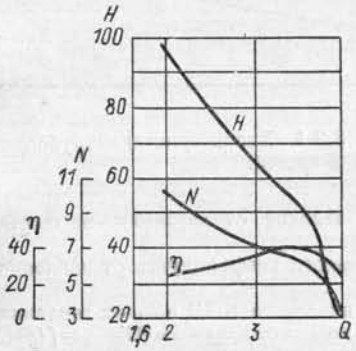



Рис. 3.3.3. Характеристики центробежного насоса при отогнутых назад лопастях.

Регулировать производительность зубчатых и винтовых насосов можно изменением частоты вращения двигателя. Простейшим же способом регулирования является перепуск части подаваемой жидкости обратно во всасывающую трубу.

Роторные насосы обычно применяются для подачи чистых масел, нефтепродуктов и других хорошо смазывающих жидкостей с вязкостью от $0{,}19 \cdot 10^{-4}$ до $19 \cdot 10^{-4}$ м²/с и температурой не выше 80° С. Однако для получения высоких значений КПД при подаче жидкостей с вязкостью выше $5{,}6 \cdot 10^{-4}$ м²/с целесообразнее применять роторные насосы специального назначения. В судовых установках они используются для циркуляционной системы смазки, для перекачивания жидкого топлива, в качестве циркуляционных насосов двигателей внутреннего сгорания. При перекачивании жидкостей большой вязкости они почти полностью вытеснили поршневые и центробежные насосы. Высокая частота вращения обеспечивает возможность непосредственного соединения насоса с высокооборотным электродвигателем.

**Лопастные центробежные насосы.** Принцип работы центробежных насосов основан на том, что жидкость, находящаяся между вращающимися лопастями колеса, под действием центробежной силы перемещается с большой скоростью к периферии.

Напор, создаваемый насосом, связан с частотой вращения рабочего колеса и его производительностью. Практически обеспечить одним рабочим колесом напор выше $25 \cdot 10^5$ Н/м² затруднительно. Поэтому применяют многоступенчатые насосы, состоящие из нескольких рабочих колес, сидящих на одном валу.

Для выбора насоса необходимо располагать характеристикой зависимости $H = f(Q)$ (кривая *3* на рис. 3.3.1), а также зависимостями мощности $N$ и КПД $\eta$ от производительности $Q$.

Как видно на рис. 3.3.3, повышение напора $H$ в системе вызывает уменьшение производительности насоса $Q$. Если полностью закрываются нагнетательные линии, то может прекратиться подача, однако это не приводит к опасным последствиям для системы и насоса. Последнее обстоятельство повышает надежность системы и облегчает ее автоматизацию.

Насосы с жесткой характеристикой $H = f(Q)$ применяются обычно в тех случаях, когда требуется постоянство напора (например, в качестве питательных насосов). Насосы с мягкой характеристикой используются там, где постоянство напора не играет существенной роли и требуется лишь регулировка производительности (например, в качестве циркуляционных или охлаждающих).



Основными преимуществами центробежного насоса являются: простота конструкции; минимальное число изнашиваемых частей; малый объем текущего ремонта; равномерная подача жидкости, что позволяет применять более высокие средние скорости в трубопроводах и тем самым уменьшать диаметр и массу последних; возможность работы с загрязненной жидкостью, содержащей до 40% твердых частиц; отсутствие высокого давления при закрытии нагнетательного патрубка, что позволяет применять центробежные насосы в замкнутых гидравлических системах для автоматического поддержания постоянного давления или постоянного количества подаваемой жидкости; возможность применения высокооборотных электродвигателей без промежуточных передач.

К недостаткам центробежных насосов относятся: необходимость заполнять жидкостью всасывающий трубопровод перед началом работы насоса; изменение в широких пределах производительности в зависимости от напора; снижение КПД при повышении вязкости перекачиваемой жидкости.

Из всех существующих типов насосов центробежные получили наиболее широкое распространение.

**Центробежные осевые насосы.** Лопасти осевых насосов в отличие от лопастей центробежных насосов сообщают струям жидкости, протекающим через насос, осевое направление движения. Вследствие этого каждая частица жидкости движется по винтовой линии постоянного радиуса.

Конструкции осевого насоса предусматривают возможность поворота лопастей, чем достигается изменение его производительности. Мощность насоса при пуске в значительной степени зависит от угла поворота лопастей. Осевые насосы являются насосами малых напоров, не превосходящих $(10—15) \cdot 10^4$ Н/м², позволяющих получать большую производительность при высоком значении КПД. Они применяются, например, как циркуляционные насосы.

**Вентиляторы, воздуходувки, компрессоры.** На судах наибольшее распространение получили центробежные вентиляторы. Принцип их действия аналогичен принципу действия центробежных насосов. Конструктивное исполнение вентиляторов довольно разнообразно. Большинство из них снабжено корпусом спиральной формы, который направляет воздух и способствует преобразованию скорости в напор.

Конструкции вентиляторов позволяют получить различные характеристики $H = f(Q)$ в зависимости от формы лопаток на колесе.

Тип вентилятора выбирается исходя из предъявляемых к нему условий и требований. Если необходимо поддерживать расход постоянным независимо от изменения скорости, например для дутья в топках, применяют вентиляторы с падающей характеристикой. Этот же тип вентилятора используется в том случае, когда несколько вентиляторов работает на одну общую систему. Если объем воздуха, подаваемого вентилятором, регулируется заслонками, применяют режим, соответствующий пологой характеристике, которая позволяет производить регулирование с минимальной потерей давления.

Полный напор определяется методами, изложенными выше.

Воздуходувки предназначены для обеспечения работы двигателей внутреннего сгорания. Их можно рассматривать как специальный тип центробежного вентилятора, и их характеристики аналогичны характеристикам центробежных вентиляторов. Они имеют более прочную конструкцию, чем центробежные вентиляторы, что позволяет работать при повышенных окружных скоростях и развивать большое давление.

Коэффициент полезного действия воздуходувок несколько выше КПД центробежных вентиляторов. В зависимости от развиваемого давления воздуходувки могут иметь одну или несколько ступеней, соединенных последовательно.

Если необходимо получить высокое давление, применяются воздушные компрессоры. Компрессоры на судах используются для распыления топлива в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания, пополнения пусковых резервуаров сжатым воздухом, обеспечения работы холодильных установок и т. д.

Поршневые компрессоры бывают одно-, двух- и многоступенчатые. Компрессоры крупных мощностей и высоких давлений строятся двух- или многоступенчатыми.

## § 3.3.2. ВЫБОР ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМОВ СУДОВЫХ СИСТЕМ

На современных судах электропривод вспомогательных механизмов силовых установок и судовых систем должен обеспечивать:

1) надежность действия и простоту обслуживания;
2) легкость пуска;
3) возможность дистанционного управления и автоматический пуск в зависимости от режима работы установки;
4) высокую экономичность работы при нормальном режиме и регулировании;
5) легкость регулирования;
6) минимальные массу и габариты.

**Регулирование производительности насосов и вентиляторов.** Регулированием производительности насоса или вентилятора добиваются оптимального режима его работы, соответствующего режиму работы системы. У насосов это может быть достигнуто дросселированием со стороны нагнетания или всасывания, обратным перепуском жидкости, изменением частоты вращения двигателя, изменением хода поршня, параллельным или последовательным соединением насосов. У вентиляторов — заслонкой, регулированием частоты вращения двигателя, последовательным или параллельным их соединением.

В судовых установках прибегают к дросселированию нагнетания (так как это способ наиболее простой, хотя и не экономичный), параллельному или последовательному соединению насосов и изменению частоты вращения электродвигателя.

Если напор системы имеет большую статическую составляющую, то потери, связанные с дросселированием нагнетания, относительно невелики. Практически большинство центробежных насосов и вентиляторов малой мощности работает с постоянной частотой вращения, и их производительность регулируется дросселированием.

Для насосов и вентиляторов большой мощности, особенно если они предназначены для работы в течение длительного времени при пониженной производительности, необходимо сравнить различные методы регулирования с точки зрения характера работы системы и экономичности регулирования.

Регулирование дросселированием осуществляется прикрытием задвижки в напорном трубопроводе или в воздухопроводе. Сопротивление задвижки, зависящее от степени ее открытия, определяется выражением (3.3.4). Если насос работает с прикрытой задвижкой, потеря мощности при регулировании может быть очень велика (более 70%).

Регулирование производительности может осуществляться также последовательным или параллельным соединением насосов трубопроводом. При параллельном режиме работы напор насосов остается неизменным, а производительность возрастает. В случае же последовательного соединения напор возрастает, а производительность остается неизменной.

При параллельной работе двух одинаковых центробежных насосов на общую систему их суммарная производительность всегда меньше удвоенной. Эта особенность становится заметной при работе с небольшой производительностью.

Регулирование производительности изменением частоты вращения — более экономичный способ, чем дросселирование.

**Регулирование частоты вращения электродвигателя насоса.** Частоту вращения электродвигателя постоянного тока можно регулировать изменением сопротивления в цепи якоря, изменением тока в цепи возбуждения, а также обоими способами одновременно.

Частоту вращения электродвигателя переменного тока можно регулировать изменениями сопротивления в цепи ротора, частоты питающей сети напряжения на зажимах статора и применением многоскоростных двигателей.

Регулирование частоты вращения изменением сопротивления в цепи якоря электродвигателя в отличие от регулирования изменением тока в цепи возбуждения обеспечивает возможность получения двигателя с наименьшими размерами и массой. Так как регулирование частоты вращения изменением сопротивления в цепи якоря сводится к снижению частоты вращения по отношению к номинальной, то, выбирая электродвигатели одной и той же мощности с одним и тем же



диапазоном регулирования частоты вращения, получаем значительное уменьшение массы и габаритов электродвигателя при первом способе регулирования. Следует отметить, что при этом возрастает масса аппаратуры управления, однако при широких пределах регулирования преобладающим оказывается изменение массы двигателя. При регулировании частоты вращения введением сопротивления в цепь якоря двигателя возникают потери, не пропорциональные снижению частоты вращения, так как момент двигателя снижается пропорционально квадрату, а потребляемая мощность — пропорционально кубу частоты вращения.

Регулирование частоты вращения изменением тока возбуждения обычно сводится к повышению частоты вращения по сравнению с номинальной. Если насос должен длительно работать с частотой вращения, составляющей 80—100% номинальной, то целесообразно регулировать ее изменением тока возбуждения. В случае длительной работы двигателя с частотой вращения 50—100% номинальной целесообразно смешанное регулирование: изменением тока в цепи возбуждения и изменением сопротивления в цепи якоря.

Регулирование частоты вращения изменением частоты тока питающей сети является наиболее выгодным для асинхронных двигателей. Если напряжение двигателя меняется пропорционально квадрату частоты, то двигатель будет работать с оптимальными показателями. Однако основным недостатком такого регулирования является необходимость установки специального преобразователя, частота которого должна меняться в зависимости от необходимых пределов регулирования.

Регулирование частоты вращения применением многоскоростных двигателей возможно в том случае, когда оно ограничивается двумя или тремя фиксированными ступенями. Подобный способ регулирования целесообразен для циркуляционных и охлаждающих насосов. Потери при этом способе отсутствуют, так как мощность двигателя на низших частотах вращения значительно меньше номинальной, масса двухскоростного двигателя по сравнению с массой односкоростного возрастает относительно незначительно. Простота конструкции двигателя и схемы управления дает основание считать данный способ регулирования наиболее приемлемым в судовых условиях.

Весьма перспективным является реулирование частоты вращения с помощью статических преобразователей частоты тока (ПЧ).

Статические преобразователи частоты имеют следующие характерные особенности, которые делают их особенно пригодными для работы в судовых системах управления: сравнительно небольшие массу и габариты; высокие КПД и быстродействие; мгновенную готовность к действию; высокую виброустойчивость и ударопрочность; возможность раздельного регулирования напряжения и частоты, что позволяет осуществлять практически любой закон частотного регулирования высокую ремонтопригодность; удобство эксплуатации; отсутствие вращающихся частей; отсутствие шума, вибраций и искрений.

В настоящее время применяются схемы регулируемых преобразователей на тиристорах частотного управления асинхронными двигателями. Все они могут быть разделены на две большие группы: I группа — преобразователи частоты без звена постоянного тока; II группа — преобразователи частоты с явно выраженным звеном постоянного тока. Последние, в свою очередь, делятся на преобразователи частоты на базе инверторов тока и на базе инверторов напряжения.

Внешняя характеристика инверторов тока имеет резко падающий характер, т. е. напряжение на выходе инвертора зависит от параметров нагрузки. Инверторы напряжения питаются непосредственно от источника постоянного тока с внутренним сопротивлением, практически равным нулю, а в случае питания от выпрямителя, имеющего одностороннюю проводимость, параллельно выпрямителю включается емкость. Возможность работы инвертора напряжения в режимах холостого хода и при перегрузках, а также их способность работать на активно-индуктивную нагрузку позволяют широко использовать инверторы напряжения в регулируемых приводах.

К недостаткам преобразователей частоты с явно выраженным звеном постоянного тока относят наличие в них двукратного преобразования энергии. Однако благодаря простоте схем и сравнительно небольшому количеству тиристоров энергетические показатели таких преобразователей частоты достаточно высоки.

Из приведенного краткого обзора различных ПЧ можно сделать заключение, что для судовых электроприводов с асинхронными короткозамкнутыми двигателями наиболее рациональным является статический преобразователь частоты с промежуточным звеном постоянного тока.

**Вопросы устойчивости системы.** Для обеспечения непрерывной подачи жидкости, т. е. устойчивости работы системы, необходимо, чтобы напор, развиваемый насосом, равнялся напору системы.

Если характеристика системы смещается параллельно основной характеристике (например, при подаче жидкости в пустую цистерну, когда статическое сопротивление напора все время меняется и возрастает), может наступить момент, при котором произойдет срыв работы системы: жидкость из цистерны начнет вытекать через насос. Графически это будет соответствовать такому случаю, когда характеристики насоса и сопротивления не имеют точки пересечения.

Неустойчивая работа может иметь место и при изменении частоты вращения насоса. Особенно вероятно нарушение устойчивой работы насоса при изменении частоты его вращения, когда характеристика сопротивления трубопровода носит пологий характер, например при преобладании статического напора над сопротивлением динамического напора.

Если нормальный напор имеет большую статическую составляющую, нельзя снижать частоту вращения центробежного насоса. При применении электропривода переменного тока колебание частоты сети не должно превышать 5—10%, а напряжение — 20%. Поэтому при наличии в системе особо ответственных электроприводов насосов, например питательного насоса и др., следует произвести проверку работы системы при колебаниях напряжения.

**Определение мощности и типа электродвигателя.** Мощность на валу электродвигателя (в киловаттах), необходимая для вращения насоса или вентилятора, определяется работой, затраченной на подъем или перемещение жидкости или газа:

$$P_{дв} = \frac{Q\gamma\,(H_{стат} + \Sigma H_м)\cdot 10^3}{v_{об}\eta_н}, \qquad (3.3.6)$$

где $Q$ — секундная производительность или секундный расход, м³/с; $\gamma$ — удельный вес жидкости или газа, Н/м³; $H_{стат}$ — статическая высота напора, м; $\Sigma H_м$ — потери напора в трубопроводе и местных сопротивлениях, м; $v_{об} = 0{,}94—0{,}98$ — коэффициент, учитывающий потери через неплотности; $\eta_н$ — КПД насоса (вентилятора).

Тип двигателя выбирают в зависимости от рода тока на судне и типа насоса.

Насос может приводиться во вращение двигателями постоянного тока независимого возбуждения и асинхронными двигателями с фазным или короткозамкнутым ротором. Короткозамкнутые двигатели переменного тока в большинстве случаев полностью удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к электроприводам насосов.

При выборе способа пуска следует принимать во внимание статические и динамические моменты. Например, у поршневого насоса, присоединенного к системе, момент сопротивления в течение всего периода пуска двигателя равен номинальному. Это объясняется необходимостью вытеснять жидкость из трубопровода, а также значительным трением в поршнях и уплотняющих сальниках.

Потребность в большом динамическом моменте возникает также при наличии маховика. В результате начальный момент у поршневого насоса при неблагоприятных условиях может равняться номинальному или превышать его. Если учесть возможность снижения напряжения на 10%, то потребный пусковой момент может составить около 1,5—2,2 номинального. Таким образом, для поршневых насосов выбор типа двигателя в значительной степени определяется условиями пуска. Условия же пуска центробежного насоса и вентилятора значительно легче, чем поршневого.

При выборе типа двигателя к поршневому компрессору необходимо учитывать тяжелые условия пуска двигателя, создаваемые не только наличием противодавления в период пуска, но также большими маховыми массами, обусловленными применением специального маховика для уменьшения пульсации момента. Наиболее подходящим для этого привода является асинхронный короткозамкнутый



двигатель с повышенным пусковым моментом. И только в тех случаях, когда компрессор работает периодически (например, в холодильных установках), целесообразно применение двигателей повышенного скольжения, несмотря на более высокую их стоимость и худший КПД.

Мощность двигателя выбирается по каталогу в соответствии с выражением (3.3.6) и заданным исполнением. Так как частота вращения двигателя по каталогу дана с точностью до ±5%, то в неблагоприятном случае (когда действительная частота вращения выбранного двигателя окажется на 5% больше расчетной) мощность, потребляемая центробежным насосом, возрастает на 16%. Поскольку двигатель насоса работает в длительном режиме, указанные перегрузки могут вызвать недопустимый перегрев двигателя. Поэтому каталожную мощность двигателя для центробежного насоса выбирают с учетом 16—20%-ного увеличения мощности. Если частота вращения регулируется изменением сопротивления в цепи якоря или ротора, то мощность двигателя выбирается так же, как и для перерегулируемого двигателя.

Двигатели переменного тока при пуске насоса, обладающего большим маховым моментом, следует выбирать не только в зависимости от номинальной мощности, но и от условий пуска. В ряде случаев продолжительность пуска настолько велика, что возникает опасение перегрева двигателя.

Ввиду того что перегрузка, вызванная пуском, носит кратковременный характер, можно пренебречь теплоотдачей двигателя в этот период. Тогда перегрев двигателя $\tau$ в градусах Цельсия будет определяться следующим выражением:

$$\tau = \frac{I^2_{пуск} i^2_{пуск}}{150}\, t_р, \qquad (3.3.7)$$

где $I_{пуск}$ — пусковой ток, А; $i_{пуск}$ — кратность пускового тока; $t_р$ — время разгона.

Если время разгона превысит допустимое, необходимо выбрать двигатель другого типа или большей мощности.

В качестве примера приведем расчет мощности приводного электродвигателя центробежного и поршневого насосов.

Мощность на валу электродвигателя, необходимую для вращения центробежного насоса с номинальной производительностью $Q_н = 50$ м³/ч, определим по формуле (3.3.6).

При величине статического напора $H_{стат} = 10$ м и общей длине охлаждающего трубопровода $l = 300$ м диаметр выбираем соответственно Правилам Регистра СССР, по которым скорость течения воды не должна быть меньше 2 м/с. Для $v = 2{,}5$ м/с

$$d^2 = \frac{4S}{\pi}; \quad S = \frac{Q}{v} = \frac{50}{3600\cdot 2{,}5} = 0{,}005\,5 \text{ м}^2; \quad d^2 = 0{,}007 \text{ м}^2.$$

На основании полученных исходных данных строим характеристику трубопровода по следующему выражению:

$$H = H_{стат} + \lambda \frac{l}{d} \frac{Q^2}{2gS^2}.$$

Принимая $\lambda = 0{,}025$, получаем

$$H = 10 + 0{,}025 \frac{300}{0{,}0835} \cdot \frac{Q^2}{2\cdot 9{,}8\,(0{,}0055)^2} = 10 + 0{,}012Q^2.$$

Задаваясь различными значениями $Q$, строим характеристику трубопровода, которая представлена на рис. 3.3.4. Характеристика трубопровода *2* пересекается с характеристикой насоса *1* в точке $A$, соответствующей $H_{ном} = 40$ м и $Q_{факт} = 50$ м³/ч.

Мощность электродвигателя в этом режиме при $\eta_н = 0{,}72$, $v_{об} = 0{,}95$ определяем по выражению

$$P_{дв1} = \frac{Q_{факт} H_{стат}\cdot 10^{-3}}{v_{об}\eta_н} = \frac{50\cdot 9{,}8\cdot 1000\cdot 40\cdot 10^{-3}}{3600\cdot 0{,}72\cdot 0{,}95} = 8 \text{ кВт}.$$

Для поршневого насоса при напоре $H_{стат} = 200$ м с фактической производительностью $Q_{факт} = 36$ м³/ч при $\nu_{об} = 0{,}9$, $\eta_н = 0{,}6$ мощность приводного двигателя насоса определяем по формуле

$$P_{дв2} = \frac{Q_{факт}\gamma H_{стат}\cdot 10^{-3}}{\eta_н \nu_{об}} = \frac{36\cdot 9{,}8\cdot 1000\cdot 200\cdot 10^{-3}}{3600\cdot 0{,}6\cdot 0{,}9} = 36 \text{ кВт}.$$

**Выбор способа пуска электроприводов с короткозамкнутым ротором.** В связи с тем, что пуск асинхронного двигателя вызывает снижение напряжения в сети, отрицательно влияющее на работающие приводы, необходимо тщательно подходить к выбору способа пуска. Наиболее приемлемым в отношении простоты схемы управления и массы пусковых устройств является прямой пуск (непосредственное включение) двигателя. Однако он связан со значительными пусковыми токами и возможными провалами напряжения.

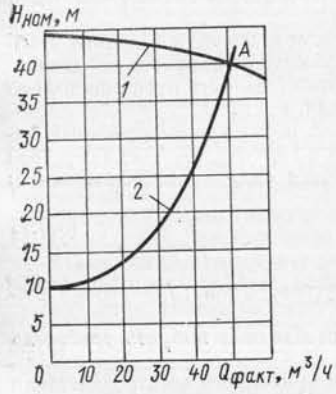



Рис. 3.3.4. Характеристики насоса и системы трубопровода.

В настоящее время на судах применяются следующие способы пуска: непосредственное включение на полное напряжение сети, включение активного или реактивного сопротивления в цепь статора, включение автотрансформатора, включение переключением обмоток статора со звезды на треугольник, включение через феррорезонансные пусковые устройства.

Численную оценку различных способов пуска, а также выбор их с точки зрения кратности пускового тока и пускового момента можно произвести с помощью табл. 3.3.1, в которой числовые значения величин даны в относительных единицах. За единицу приняты кратности пусковых токов и моментов, имеющих место при прямом пуске. В табл. 3.3.1 принято $u = \frac{U_{пуск}}{U_{ном}}$ — отношение напряжения при пуске к номинальному напряжению; $k_i = \frac{i_{пуск.\,зад}}{i_{пуск}}$ — отношение кратности заданного пускового тока к кратности пускового тока, полученное из данных каталога при номинальном напряжении; $k_{пуск} = \frac{m_{пуск.\,зад}}{m_{пуск}}$ — отношение кратности пускового момента при заданном значении пускового тока к кратности пускового момента по каталогу.

Например, необходимо обеспечить пуск электродвигателя пожарного насоса мощностью 40 кВт; $n = 1465$ об/мин; $i_{пуск} = 5{,}5$; $m_{пуск} = 1{,}6$. Мощность генераторной установки не допускает прямого пуска. По условиям работы электродвигателя насоса пуск его можно произвести при моменте, равном 0,5 номинального. Тогда

$$k_{пуск} = \frac{0{,}5}{1{,}6} = 0{,}31.$$

Заданному условию пуска удовлетворяет любой из трех последних приведенных в табл. 3.3.1 способов. При пуске включением активного сопротивления $i_{пуск.\,зад} = 0{,}65\cdot 5{,}5 = 3{,}8$, при пуске включением автотрансформатора $i_{пуск.\,зад} = 0{,}42\cdot 5{,}5 = 2{,}3$.

Задача может быть решена иначе. Задаваясь кратностью пускового тока, можно определить допустимость выбранного способа пуска с точки зрения кратности пускового момента. Например, необходимо обеспечить пуск электродвигателя компрессора той же мощности, что и у насоса, но по условиям привода пусковой момент должен быть не менее 0,9—1,0, а $k_{пуск} = \frac{0{,}9}{1{,}6} = 0{,}56$.



*Таблица 3.3.1*

**Численная оценка выбора способа пуска**

| Способ пуска | Относительная кратность | | |
|---|---|---|---|
| | напряжения при пуске | пускового тока | пускового момента |
| Непосредственное включение на полное напряжение сети | 1 | 1 | 1 |
| Включение активного или реактивного сопротивления в цепь статора | 0,80 | 0,80 | 0,64 |
| | 0,65 | 0,65 | 0,42 |
| | 0,50 | 0,50 | 0,25 |
| Включение автотрансформатора | 0,80 | 0,64 | 0,64 |
| | 0,65 | 0,42 | 0,42 |
| | 0,50 | 0,25 | 0,25 |
| Включение переключением обмоток статора со звезды на треугольник | 0,57 | 0,33 | 0,33 |

По условиям же мощности генераторной установки допустимая кратность пускового тока не должна превышать $i_{пуск.\,зад} = 3{,}5$. Тогда $k_i = \frac{3{,}5}{5{,}5} = 0{,}64$. Таким образом, с точки зрения пускового тока удовлетворяют три последних способа пуска, приведенных в табл. 3.3.1, а по допустимой величине момента — только автотрансформаторный пуск при напряжении $0{,}8U_{ном}$.

Для электроприводов частотой 400 Гц наиболее рационально применять конденсаторные и феррорезонансные пусковые устройства вследствие их небольших по сравнению с другими пусковыми устройствами масс и габаритов, а для систем с частотой питания 50 Гц — конденсаторно-реактивные пусковые устройства.

Конденсаторные и феррорезонансные пусковые устройства позволяют ограничивать пусковой ток и одновременно улучшать коэффициент мощности. Однако следует иметь в виду, что при наличии емкости в электроэнергетической системе может возникнуть явление резонанса, приводящее к резкому возрастанию тока и напряжения.

Для устранения резонансных явлений в схемах производят варьирование параметров емкости и индуктивности или изменяют приведенное сопротивление устройства путем подбора сопротивления насыщающегося трансформатора.

## § 3.3.3. СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫМИ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ОРГАНАМИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Для дистанционного пуска двигателя или автоматического пуска привода в функции параметра, определяющего работу установки, преимущественное распространение получили релейно-контакторные схемы управления. Дистанционное управление при автоматическом пуске осуществляется с помощью кнопочного поста от любого типа измерительного устройства.

Для пуска прямым включением в сеть применяются магнитные пускатели. Они обеспечивают возможность пуска двигателя мощностью 1,7—55 кВт при напряжении 380 В. Магнитный пускатель состоит из трехполюсного контактора, двух тепловых реле и встроенного или дистанционного кнопочного поста.

Тепловая защита отключает двигатель, когда ток перегрузки превышает 1,2 номинального в течение 20 мин после длительной работы при номинальном токе. При семикратном токе перегрузки с холодного состояния пускатель срабатывает примерно через 5 с, что необходимо учитывать при пуске двигателя насосов или

вентиляторов с большим маховым моментом, когда время разгона может превышать 5 с. Таким образом, необходимо правильно выбирать тепловое реле, иначе оно отключит двигатель до окончания пуска.

На рис. 3.3.5 в качестве примера приведена схема автоматического пуска двигателя в функции изменения давления, где *РТ1*, *РТ2* — тепловые реле; $РД_{max}$ и $РД_{min}$ — н. з. и н. р. контакты реле давления; *РП* — промежуточное реле; *Л* — линейный контактор.

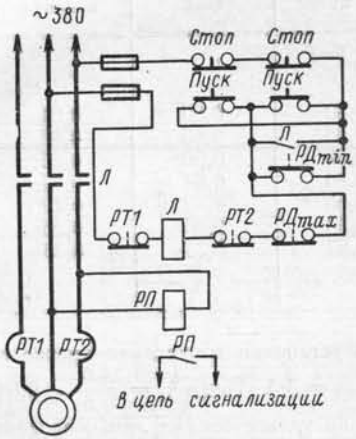



Рис. 3.3.5. Схема автоматического пуска двигателя в функции изменения давления.

В связи с развитием систем автоматического управления появились схемы управления электроприводами, предназначенные для дистанционного автоматического управления регулируемыми и исполнительными органами от измерительного устройства того или иного типа.

Электроприводы могут использоваться в регуляторах давления для поддержания величин давления регулируемой среды. В системах регулирования котельных установок они применяются в регуляторах, управляющих подачей топлива и воздуха. Эти же электроприводы могут быть применены для поддержания заданной величины разрежения регулируемой среды, перемещения регулирующего органа на величину, пропорциональную изменениям параметров измерительного устройства.

На рис. 3.3.6 в качестве примера приведена схема электропривода, которая обеспечивает возможность дистанционного *Д* управления с помощью кнопок открытия *КО* и закрытия *КЗ* и автоматического управления (контакты *КАУ*) от измерительного устройства. Выбор режима управления осуществляется переключателем *П*.

В автоматическом режиме (положение *А*) при достижении предельного положения исполнительного механизма система автоматически отключается при

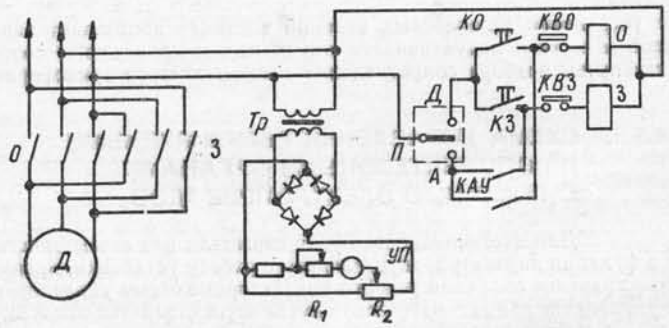



Рис. 3.3.6. Схема электропривода с указателем положения.

помощи контактов *КВО*, *КВЗ* и контакторов «Открыть» (*О*) и «Закрыть» (*З*). Указатель *УП* позволяет следить за положением привода.

Электроприводы работают кратковременно, на время нажатия кнопки или автоматического замыкания контактов по принципу «открыть», «закрыть», «приоткрыть».



## § 3.3.4. УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Управляющие системы энергетических установок и общесудовых систем включают в себя в качестве основных элементов источники информации, логические устройства, усилители. Источники информации служат для преобразования неэлектрических величин, характеризующих параметры управляемых систем, в аналоговые или дискретные электрические сигналы, которые используются для целей измерения, сигнализации и логического управления.

Управляющие системы электроприводов обеспечивают необходимые режимы работы механизмов путем активного воздействия параметров, определяющих работу установки, на формирование управляющих команд [33].

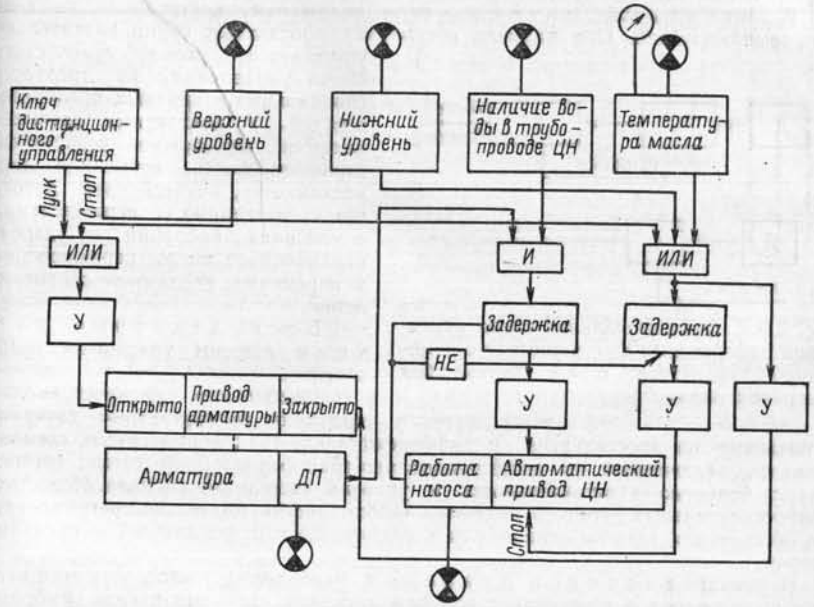



Рис. 3.3.7. Схема автоматического пуска и остановки осушительной системы.

На рис. 3.3.7 в качестве примера показана функциональная схема автоматического пуска и остановки осушительной системы судна, состоящая из автоматизированного привода центробежным насосом (ЦН) и арматуры. Насос должен запускаться по достижении верхнего уровня воды, после подготовки арматуры, при наличии воды в трубопроводе насоса. Остановка насоса происходит при подаче дистанционного сигнала на остановку, сигнала о достижении нижнего уровня и сигнала о наличии высокой температуры масла насоса.

Управление центробежным насосом осуществляется дистанционно или автоматически с помощью логических элементов *ИЛИ*, *И*, *НЕ*, усилителя *У* и датчиков положения *ДП*.

**Источники информации.** В системах водяного охлаждения двигателей и компрессоров определяющим является значение температуры охлаждающей воды и положение вентилей трубопроводов охлаждения.

В схеме управления системами обитаемости определяющими параметрами являются температура, влажность, газовый состав воздуха, а также положение запорной арматуры и состояние исполнительных механизмов: вентиляторов, кондиционеров, нагревателей, охладителей.

В системе гидравлики один из определяющих параметров — давление масла.

Таким образом, наиболее распространенными параметрами, по которым осуществляется управление, являются: положение арматуры, давление различных сред (воздуха, воды, масла), уровень различных сред (воды, масла, топлива), температура различных сред (воздуха, воды, масла).

Основным элементом устройства информации (рис. 3.3.8) является первичный преобразователь параметра — датчик *Д*. Измерительные преобразователи *ИП* представляют собой усилители с линейной зависимостью выходного сигнала от входного. Сигнализаторы *С* служат для преобразования аналогового сигнала в дискретный в зависимости от уставки.

В судовых системах автоматического управления находят применение следующие основные типы датчиков параметров.

Контактный датчик — реле положения, построенное на базе микровыключателей. При наличии нескольких контактных групп значительно упрощается схема логического блока управления, не требуется специальных вторичных преобразователей. У контактных датчиков имеются следующие недостатки: взрывоопасность, невысокая термостойкость, неустойчивая работа при медленных перемещениях в условиях вибрации и ударов, ограниченное число переключений и переменное контактное сопротивление.

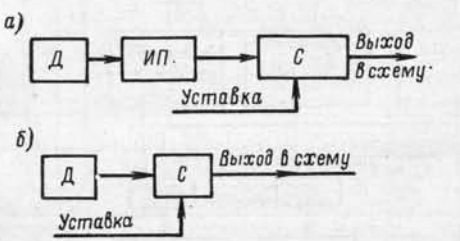



Рис. 3.3.8. Функциональная схема источников информации: *а* — в системе с измерением параметров; *б* — в системе без измерения параметров.

Бесконтактные датчики лишены указанных недостатков.

Наибольшее распространение получили бесконтактные датчики, включаемые по дроссельным и дифференциально-трансформаторным схемам. Датчики, включаемые по дифференциально-трансформаторной схеме, обеспечивают большую чувствительность и уровень выходного сигнала. Недостатками бесконтактных датчиков являются необходимость тщательной регулировки для обеспечения взаимозаменяемости и наличие блоков усилителей — сигнализаторов.

В качестве датчиков давления наиболее часто используются датчики перемещения в сочетании с воспринимающими органами в виде мембран, сильфонов, трубчатых пружин и т. п. Реле давления строятся на базе бесконтактных датчиков положения и вторичных блоков усилителей — сигнализаторов и обладают указанными достоинствами и недостатками.

Большое распространение находят датчики уровня. Используются поплавковые, емкостные, акустические датчики (реле) уровня. Недостаток поплавковых датчиков состоит в наличии подвижного элемента, чувствительного к загрязнению среды. Преимуществом акустических датчиков является отсутствие контакта чувствительных элементов с контролируемой жидкостью.

Наконец, широко применяются датчики (реле) температуры. Наибольшее распространение получили платиновые термометры сопротивления, обеспечивающие высокую точность, устойчивость к эксплуатационным воздействиям, широкий диапазон рабочих температур. Там, где не требуется высокая точность (например, регулирование температуры в провизионных камерах), применяются манометрические реле температуры.

В ряде случаев для регулирования температуры в помещениях судна используются реле температуры, в которых воспринимающим органом является термистор.



# Глава 3.4. ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ПАЛУБНЫХ ГРУЗОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

## § 3.4.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Судовые грузоподъемные механизмы (лебедки и краны) классифицируются следующим образом.

По *характеру выполняемых* операций они подразделяются на:

а) грузовые лебедки и краны, предназначенные для переработки генеральных грузов, т. е. грузов, перевозимых в упаковке или таре (кипах, рулонах, ящиках, мешках, бочках), а также для переработки леса и сыпучих грузов (зерна, угля, песка и т. д.);

б) лебедки и краны, предназначенные для специализированных операций — шлюпочные, буксирные, траловые (на рыболовных траулерах) и т. д.

По *передаточному механизму* различают лебедки и краны с механическими и гидравлическими передачами.

По *системе управления* лебедки делятся на грузоподъемные механизмы с контроллерным и релейно-контакторным управлением электроприводом, а также с управлением по системе Г—Д или посредством магнитных усилителей.

По *роду тока* различаются грузоподъемные механизмы с электроприводом постоянного и переменного тока.

## § 3.4.2. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЭЛЕКТРОПРИВОДАМ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

К современным грузовым лебедкам предъявляется ряд требований технического и эксплуатационно-экономического характера. Основными из них являются:

а) достаточно высокая производительность грузовых операций (до 50 ц/ч с номинальным грузом и до 70—80 ц/ч с половинным грузом);

б) необходимый диапазон изменения рабочих скоростей, достаточный для оперативной и безопасной работы с различными грузами;

в) высокая надежность электропривода, под которой понимается обеспечение безотказной работы лебедки в течение разгрузки (или погрузки) судна;

г) простота схемы и конструкции;

д) простота и удобство обслуживания, номинальный уход в эксплуатации;

е) минимальное отрицательное влияние пусковых токов двигателя на судовую сеть;

ж) минимальные мощность электропривода и расход электроэнергии;

з) минимальная стоимость оборудования и площадь, необходимая для его размещения на судне.

Требование высокой производительности во многих случаях является доминирующим. Высокой производительности грузовых операций добиваются тремя путями:

1) обеспечением достаточной скорости подъема в пределах 0,2—1,0 м/с (12—60 м/мин). Более высокие скорости для судовых устройств нерациональны вследствие малой высоты подъема грузов. Увеличение скорости подъема выше 50—60 м/мин перестает влиять на продолжительность всего цикла и не способствует увеличению производительности.

2) значительным увеличением диапазона регулирования скорости для обеспечения быстрого подъема и спуска холостого гака и малых грузов. При этом скорость подъема холостого гака допускается обычно несколько выше, а скорость

спуска оставляется умеренной, так как слишком быстрый спуск холостого гака может привести к спутыванию троса на барабане лебедки;

3) сокращением продолжительности переходных процессов. Это достигается уменьшением моментов инерции движущихся частей механизма, ограничением скорости двигателя (обычно до 1000 об/мин).

Для обеспечения безопасности работы лебедочные и крановые двигатели снабжаются электромагнитными и механическими тормозами, допускающими ручное растормаживание, а для остановки в верхнем положении — концевыми выключателями.

Для получения более гибкой системы управления наряду с максимальной скоростью судовые лебедки имеют несколько промежуточных скоростей. Особенно важно иметь устойчивые малые, так называемые установочные скорости подъема и спуска, а также ограничение выбегов при торможении. Значения устойчивых посадочных скоростей определяются из условия гарантии сохранности груза как эквивалентные скорости падения груза с некоторой высоты. В отечественной практике посадочные скорости обычно составляют 9—10 м/мин (эквивалентны скорости при высоте падения 1—1,1 мм).

## § 3.4.3. ЭЛЕКТРОПРИВОД ГРУЗОВЫХ ЛЕБЕДОК

Режим работы электропривода грузовых лебедок является повторно-кратковременным и характеризуется изменением нагрузки приводного двигателя в широких пределах вследствие приемов и общей организации грузовых работ (подтаскивание груза, спаренная работа двух лебедок на один гак и т. п.).

Наиболее распространен привод грузовых лебедок с электрическим реверсированием двигателя и регулированием его скорости при подъеме и спуске груза с электрическим и механическим торможением. Судовые лебедки и подъемные механизмы кранов имеют следующие основные типы электроприводов:

а) с двигателями постоянного тока смешанного возбуждения при контроллерных и релейно-контакторных схемах управления;

б) по системе генератор—двигатель;

в) с асинхронными короткозамкнутыми многоскоростными двигателями;

г) с двигателями постоянного тока при тиристорном управлении.

Рассмотрим характеристики каждого из перечисленных выше приводов.

**Привод с двигателем постоянного тока смешанного возбуждения.** В приводах постоянного тока применяются двигатели смешанного возбуждения с мягкой механической характеристикой. Эти характеристики обладают свойством автоматичности, т. е. с уменьшением массы груза автоматически увеличивается скорость его подъема, а с увеличением массы груза скорость подъема уменьшается. Обычно тяжелые грузы требуют более осторожного обращения с ними, а потому двигатели постоянного тока, обеспечивая малую скорость их подъема, в наибольшей мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к приводу судовых лебедок.

В современных электроприводах лебедок дополнительное увеличение скорости подъема легких грузов и холостого гака достигается ступенчатым регулированием работы двигателя путем ослабления поля при помощи особых грузовых реле.

Характеристики двигателя при ступенчатом регулировании указанным способом приведены на рис. 3.4.1.

Из механической характеристики двигателя смешанного возбуждения (рис. 3.4.2) видно, что избыточный динамический момент $M_{дин1}$ в начале периода разгона, например, холостого гака велик, но по мере разгона двигателя момент резко падает ($M_{дин2}$), и в конце периода разгона уменьшение его происходит медленно, так что при незначительной высоте подъема двигатель может не достигнуть максимальной частоты вращения $n_{х.г}$, соответствующей статическому моменту сопротивления холостого гака $M_{х.г}$. Применение схем управления со ступенчатым регулированием позволяет в какой-то мере исправить этот недостаток.

**Электропривод по системе генератор—двигатель (Г—Д).** Несмотря на широкое применение переменного тока на судах, для грузовых лебедок в ряде случаев сохраняется электропривод постоянного тока по системе Г—Д.



Лебедки с таким электроприводом обладают большим (1 : 50) диапазоном регулирования рабочих скоростей, как видно из рис. 3.4.3. Система Г—Д для лебедок имеет исполнительный двигатель относительно небольшой мощности, обеспечивает бесступенчатое плавное регулирование, высокую производительность, удобно в управлении. Наряду с этим следует отметить относительную сложность электропривода, обусловленную наличием преобразователей для каждого исполнительного двигателя, и, как следствие, более высокую стоимость, более сложное обслуживание и уход.

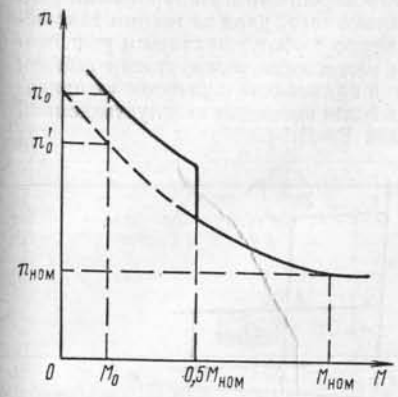



Рис. 3.4.1. Механические характеристики лебедочного двигателя постоянного тока смешанного возбуждения при ступенчатом регулировании.

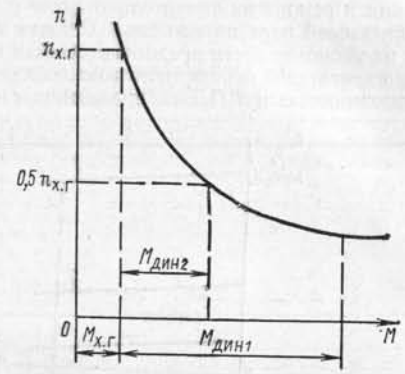



Рис. 3.4.2. Характеристика динамических моментов при разгоне двигателя постоянного тока смешанного возбуждения.

**Электроприводы с асинхронными короткозамкнутыми многоскоростными двигателями.** Широкое распространение в приводах грузовых лебедок нашли многоскоростные асинхронные двигатели, позволяющие получить ступенчатое регулирование частоты вращения. Они лучше по сравнению с нормальными асинхронными двигателями удовлетворяют условиям скоростного режима при подъеме и спуске холостого гака и легких грузов, давая значительное увеличение производительности. В зависимости от условий работы двигатели изготовляются с регулированием частоты вращения при постоянном моменте или постоянной мощности. Этот тип электропривода используется наиболее часто благодаря относительной простоте конструкции и достаточно высокой производительности. Лебедки с таким электроприводом отличаются жесткими механическими характеристиками (рис. 3.4.4).

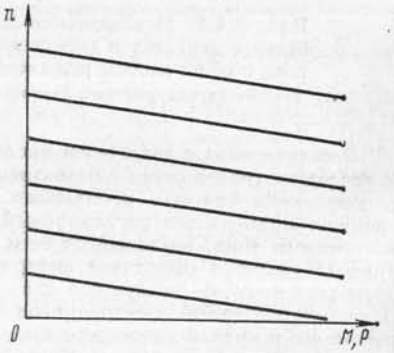



Рис. 3.4.3. Семейство механических характеристик электропривода по системе Г—Д.

Для обеспечения работоспособности лебедок при большом количестве включений используются двухроторные двигатели, что позволяет принять оптимальные параметры обмоток и улучшить отвод тепла из ротора, а также предусмотреть независимое принудительное охлаждение двигателя от отдельного вентилятора и применить контакторы с высокой износоустойчивостью.

Приводы с асинхронными короткозамкнутыми двигателями используются в лебедках большой мощности. Чтобы удовлетворить требованиям эксплуатации судовых лебедок, асинхронные двигатели должны иметь три ступени установившейся скорости.

Большим преимуществом приводов с многоскоростными асинхронными двигателями является отсутствие коллекторов. Кроме того, уход за такими двигателями и ремонт их значительно легче по сравнению с обслуживанием и ремонтом двигателей постоянного тока. С точки зрения надежности эксплуатации лебедок и их экономичности предпочтительным является применение в качестве их приводов двигателей переменного тока, обладающих более высокими эксплуатационной надежностью и КПД по сравнению с системой Г—Д.

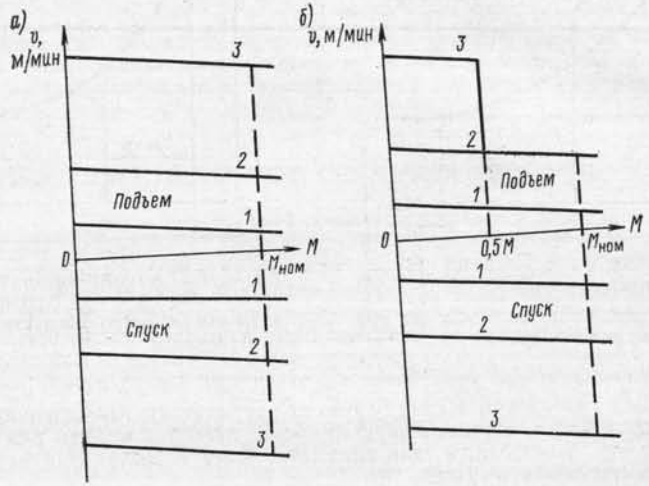



Рис. 3.4.4. Механические характеристики трехскоростной лебедки с двигателем переменного тока (*а*) и лебедки переменного тока с облегченным режимом работы (*б*).

*1—3* — характеристики двигателя на трех скоростях.

**Электропривод с двигателем постоянного тока при тиристорном управлении.** В последние годы в связи с развитием техники полупроводников и, в частности, с появлением силовых кремниевых управляемых выпрямителей (тиристоров) начинает применяться регулируемый тиристорный электропривод с двигателем постоянного тока, питаемый от сети переменного тока. Преимуществом такого привода является отсутствие аппаратуры управления с контакторами и реле, благодаря чему обеспечивается длительный срок службы и минимальный уход. Однако тиристорный электропривод обладает и существенным недостатком: при работе его в кривой питающего тока наблюдаются высшие гармоники. Характеристики тиристорного привода близки по своему виду к характеристикам системы Г—Д.

## § 3.4.4. НАГРУЗОЧНЫЕ ДИАГРАММЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГРУЗОВЫХ ЛЕБЕДОК И МЕХАНИЗМОВ ПОДЪЕМА СУДОВЫХ КРАНОВ

Режим работы приводного двигателя определяется условиями работы грузовой лебедки при погрузке, которые меняются в зависимости от характера перерабатываемого груза и принятого способа погрузки.

Существует несколько способов выполнения грузовых операций.



**Работа одной лебедки.** Для приема груза с набережной или с другого судна стрелу выносят оттяжками к борту, после чего стропят груз. Затем выбирают лебедкой шкентель и переводят стрелу с висящим на ней грузом к люку судна. После этого травят лебедкой шкентель, и груз опускают в трюм. Работу лебедки в этом случае можно представить графиком изменения момента на валу электродвигателя за цикл погрузки (рис. 3.4.5).

Момент на валу электродвигателя считается положительным в том случае, когда совпадает по знаку с направлением вращения двигателя, т. е. когда двигатель работает в тормозном (генераторном) режиме.

На рис. 3.4.5 приняты следующие обозначения: $M_1$, $M_2$, $M_3$, $M_4$ — статический момент электродвигателя соответственно при подъеме груза, при спуске груза, при подъеме холостого гака, при спуске холостого гака; $T$ — полное время цикла; $t_1$, $t_3$, $t_5$, $t_7$ — время работы с моментами $M_1$, $M_2$, $M_3$, $M_4$; $t_2$ — время пере-

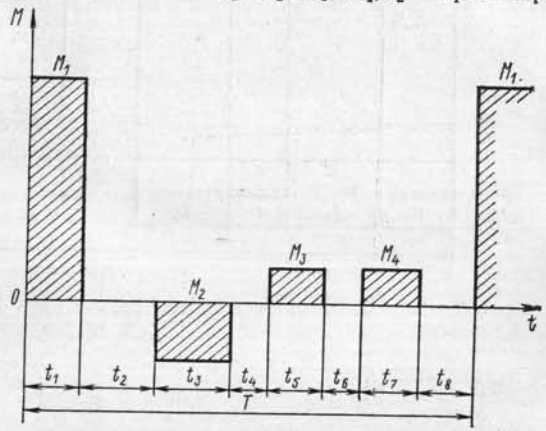



Рис. 3.4.5. График работы одной лебедки.

вода стрелы с грузом от борта к люку; $t_4$ — время освобождения груза от стропов; $t_6$ — время перевода стрелы с пустым гаком от люка к борту; $t_8$ — время застропливания груза.

**Работа двух лебедок на один гак.** При выполнении погрузочных операций данным способом одна стрела ставится над люком, а другая выносится к борту. Обе стрелы раскрепляются с помощью оттяжек. Шкентели каждой из стрел присоединяются к гаку и выбираются лебедками. Груз поднимается с пристани первой лебедкой, вторая лебедка только выбирает образующуюся слабину шкентеля своей стрелы.

Поднятый на необходимую высоту над палубой груз переводится от борта к люку, для чего первой лебедкой травят нагруженный шкентель, а второй лебедкой постепенно его выбирают. Скорости лебедок регулируются таким образом, чтобы груз непрерывно перемещался к люку. Над люком груз удерживается шкентелем второй лебедки.

Спуск груза в трюм производится второй лебедкой. График изменения моментов на валах электродвигателей при спаренной работе лебедок за один цикл представлен на рис. 3.4.6. На графике приняты следующие обозначения: $t_1$ — время подъема первой лебедкой (вторая лебедка работает вхолостую, выбирая слабину своего шкентеля); $t_2$ — время перемещения груза от борта к люку (груз постепенно передается с первой лебедки на вторую); $t_3$ — время спуска груза в трюм второй лебедкой; $t_4$ — время освобождения груза от стропов; $t_5$ — время подъема холостого гака второй лебедкой (первая лебедка выбирает слабину шкентеля); $t_6$ — время перемещения холостого гака от люка к борту; $t_7$ — время спуска холостого гака первой лебедкой (вторая лебедка травит шкентель для обеспечения вертикального спуска гака); $t_8$ — время застропливания груза.

График изменения моментов электродвигателей лебедок за цикл работы $M = f(t)$ приведен на рис. 3.4.7. Анализ графиков работы грузовых лебедок

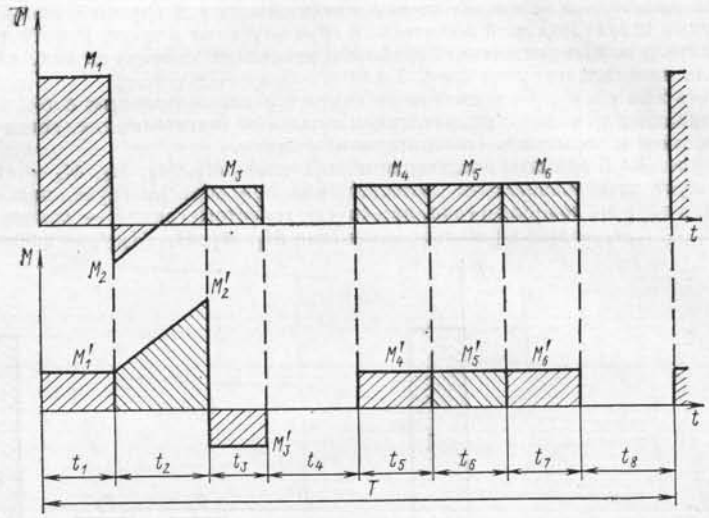



Рис. 3.4.6. График совместной работы двух лебедок.

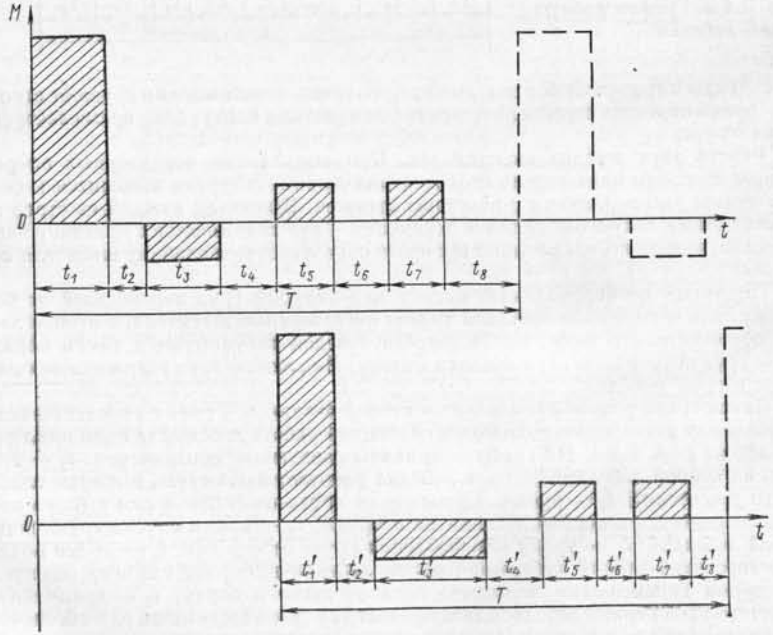



Рис. 3.4.7. График последовательной работы двух лебедок.



*Таблица 3.4.1*

**Технические характеристики грузовых лебедок**

| Номинальное тяговое усилие на грузовом барабане, кН | Индекс лебедки | Электродвигатель, принятый к установке | | | | | $n_{ном}$, об/мин |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Тип | Род тока | $P_{ном}$, кВт | $U_{ном}$, В | Режим работы | |
| 5,6 | ЛЭ68<br>ЛЭ68-1 | МАП122-4/12 | Переменный | 2,2; 0,7 | 220; 380 | ПВ = 40; 15% | 1365; 365 |
| 5,6 | ЛЭ68-2 | ДПМ-11 | Постоянный | 2 | 220 | ПВ = 25% | 1170 |
| 18,0 | ЛЭ69<br>ЛЭ69-1<br>ЛЭ69-2<br>ЛЭ69-3<br>ЛЭ69-6<br>ЛЭ69-7 | МАП422-4/12 | Переменный | 10; 3,5 | 380; 220 | ПВ = 40; 15% | 1410; 445 |
| 18,0 | ЛЭ69-4<br>ЛЭ69-5<br>ЛЭ69-8<br>ЛЭ69-9<br>ЛЭ69-10<br>ЛЭ69-11 | ДПМ-22 | Постоянный | 8 | 220 | ПВ = 25% | 1400 |
| 36,0 | ЛЭ75-4<br>ЛЭ75-5<br>ЛЭ75-10<br>ЛЭ75-11 | ДПМ-41 | » | 18 | 220 | ПВ = 40% | 1160 |

*Продолжение табл. 3.4.1*

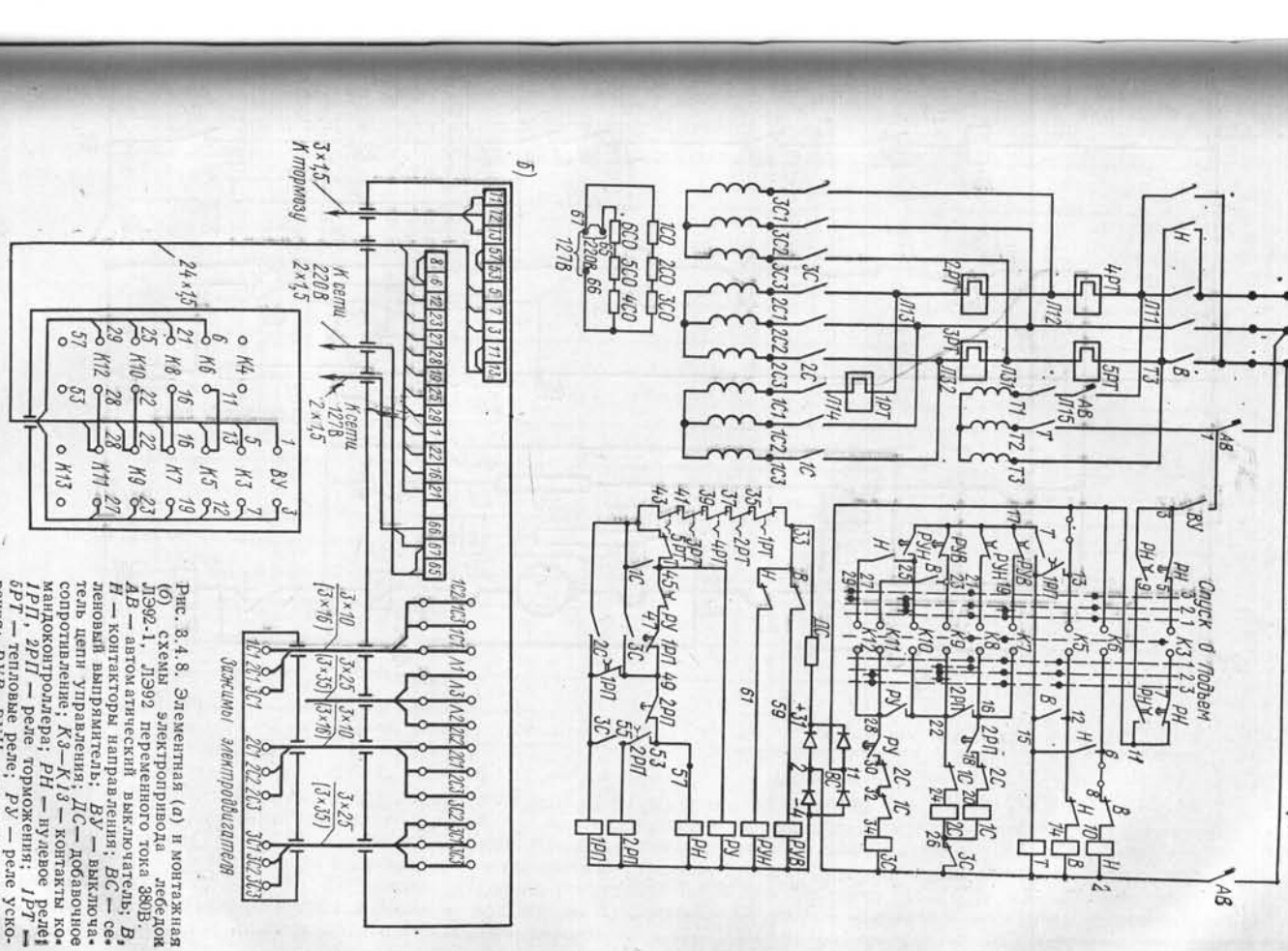
| Номинальное тяговое усилие на грузовом барабане, кН | Индекс лебедки | Электродвигатель, принятый к установке | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Тип | Род тока | $P_{ном}$, кВт | $U_{ном}$, В | Режим работы | $n_{ном}$, об/мин |
| 56/36 | ЛЭ76-4<br>ЛЭ76-5<br>ЛЭ76-10<br>ЛЭ76-11<br>ЛЭ77-4<br>ЛЭ77-5 | ДПМ-41 | Постоянный | 18 | 220 | ПВ = 40% | 1160 |
| 36 | ЛЭ91<br>ЛЭ91-1<br>ЛЭ91-2<br>ЛЭ91-3<br>ЛЭ91-4<br>ЛЭ91-5<br>ЛЭ91-6<br>ЛЭ91-7 | МАП622-6/12/24 | Переменный | 32; 16 | 380; 220 | ПВ = 40; 25; 15% | 920; 425; 175 |
| 36 | ЛЭ95<br>ЛЭ95-1<br>ЛЭ95-6<br>ЛЭ95-7 | МАП622-4/8/24 | » | 40; 20 | 380 | ПВ = 40; 40; 25% | 1355; 665; 185 |
| 56/36 | ЛЭ92<br>ЛЭ92-1<br>ЛЭ92-2<br>ЛЭ92-3<br>ЛЭ92-4<br>ЛЭ92-5 | МАП622-6/12/24 | » | 40; 20 | 380; 220 | ПВ = 40; 25; 15% | 920; 425; 175 |

*Продолжение табл. 3.4.1*

| Номинальное тяговое усилие на грузовом барабане, кН | Индекс лебедки | Электродвигатель, принятый к установке | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Тип | Род тока | $P_{ном}$, кВт | $U_{ном}$, В | Режим работы | $n_{ном}$, об/мин |
| 56/36 | ЛЭ92-6<br>ЛЭ92-7<br>ЛЭ96<br>ЛЭ96-1<br>ЛЭ96-6<br>ЛЭ96-7 | МАП622-4/8/24 | Переменный | 40; 20 | 380 | ПВ = 40; 40; 25% | 1355; 655; 185 |
| | ЛЭ93<br>ЛЭ93-1<br>ЛЭ93-2<br>ЛЭ93-3<br>ЛЭ97 | МАП622-6/12/24 | » | 40; 20 | 380 | ПВ = 40; 40; 25% | 1355; 655; 185 |
| 90/56 | ЛЭ97-1 | МАП622-6/12/24 | » | 40; 20 | 380 | ПВ = 40; 40; 25% | 1355; 655; 185 |
| 36/18 | ЛЭ70<br>ЛЭ70-1<br>ЛЭ70-2<br>ЛЭ70-3<br>ЛЭ70-6<br>ЛЭ70-7<br>ЛЭ70-8<br>ЛЭ70-9 | МАП422-4/12 | » | 10; 3,5 | 380; 220 | ПВ = 40; 15% | 1410; 445 |
| | ЛЭ74<br>ЛЭ74-1<br>ЛЭ74-4<br>ЛЭ74-5 | МАП621-4/8/24 | » | 30; 15; 3,2 | 380 | ПВ = 40; 40; 15% | 1405; 965; 170 |

*Продолжение табл. 3.4.1*

| Номинальное тяговое усилие на грузовом барабане, кН | Индекс лебедки | Электродвигатель, принятый к установке | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Тип | Род тока | $P_{ном}$, кВт | $U_{ном}$, В | Режим работы | $n_{ном}$, об/мин |
| 36 | ЛЭ91<br>ЛЭ91-1<br>ЛЭ91-2<br>ЛЭ91-3<br>ЛЭ91-4<br>ЛЭ91-5<br>ЛЭ91-6<br>ЛЭ91-7 | МАП622-6/12/24 | Переменный | 32; 16 | 380; 220 | ПВ = 40; 25; 15% | 920; 425; 175 |
| 36 | ЛЭ95<br>ЛЭ95-1<br>ЛЭ95-6<br>ЛЭ95-7 | МАП622-4/8/24 | » | 40; 20 | 380 | ПВ = 40; 40; 25% | 1355; 665; 185 |
| 90/56 | ЛЭ78<br>ЛЭ78-1 | МАП622-4/8/24 | » | 40; 20; 4,4 | 380 | ПВ = 40; 40; 25% | 1355; 665; 185 |
| | ЛЭ78-4<br>ЛЭ78-5 | ДПМ-41 | Постоянный | 18 | 220 | ПВ = 40% | 1160 |
| | ЛЭ78-6<br>ЛЭ78-7 | МАП622-4/8/24 | Переменный | 40; 20 | 380 | ПВ = 40; 40; 25% | 1355; 665; 185 |
| | ЛЭ78-10<br>ЛЭ78-11 | ДПМ-41 | Постоянный | 18 | 220 | ПВ = 40% | 1160 |



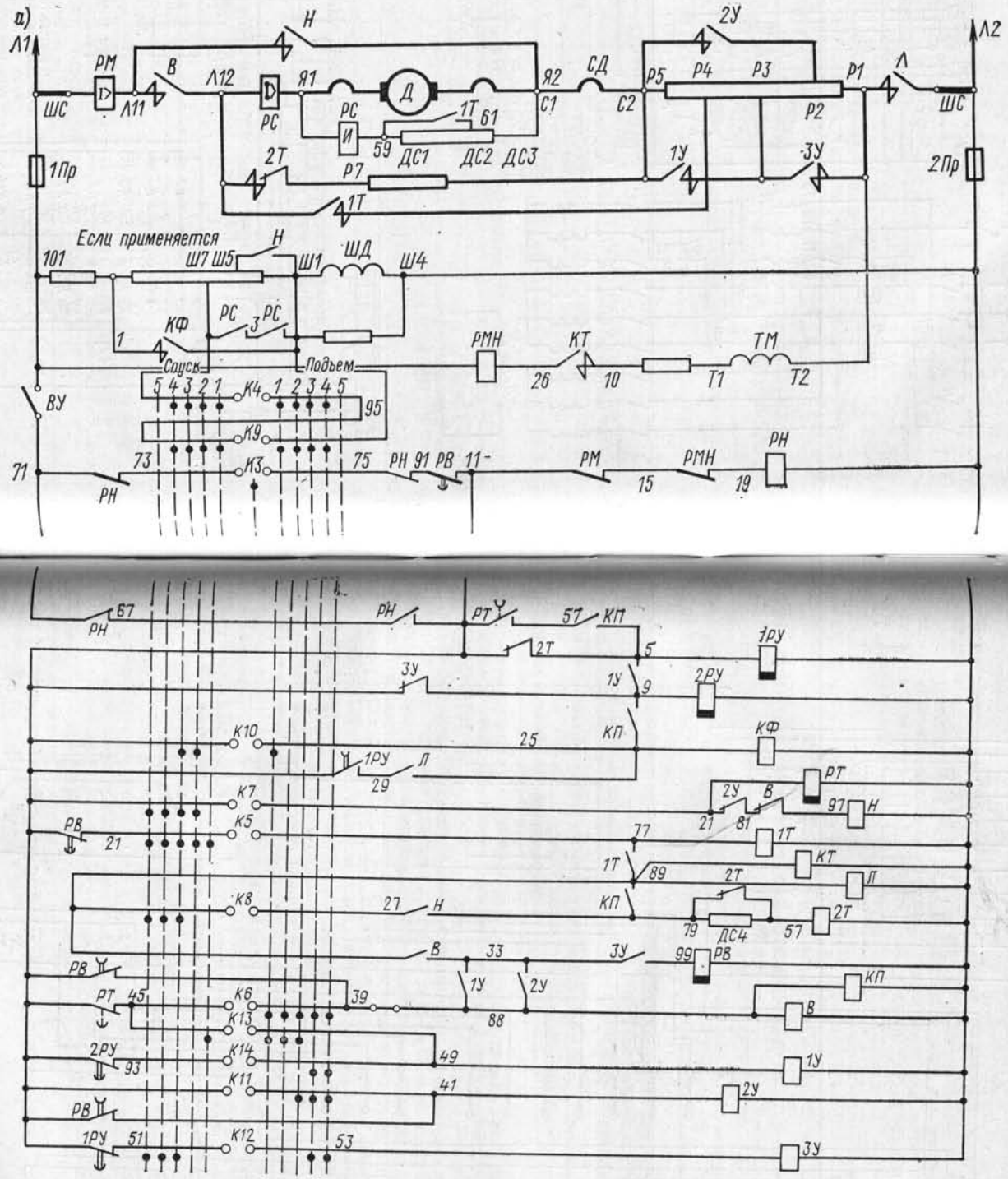



Рис. 3.4.9, *а*. Элементная схема электропривода лебедки ЛЭ91 постоянного тока 220 В.
*ДС4* — форсировочное сопротивление; *КП, КТ, КФ* — контакторы соответственно промежуточный, тормозной и форсировки; *Л* — линейный контактор; *1Пр—2Пр* — предохранители; *Р1—Р7* — пускотормозные сопротивления; *РВ, РМ, РМН, РН, РТ, РС, 1РУ, 2РУ* — соответственно реле времени, максимальное, максимального напряжения, напряжения, торможения, ограничения скорости, ускорения; *С1, С2* — начало и конец последовательной обмотки двигателя *СД*; *1Т—2Т* — контакторы торможения; *ТМ* — тормозной магнит; *1У—3У* — контакторы ускорения; *Ш1—Ш7* — параллельная цепь двигателя; *ШД* — параллельная обмотка двигателя; *ШС* — съемные перемычки; *Я1—Я2* — начало и конец якорной обмотки двигателя.

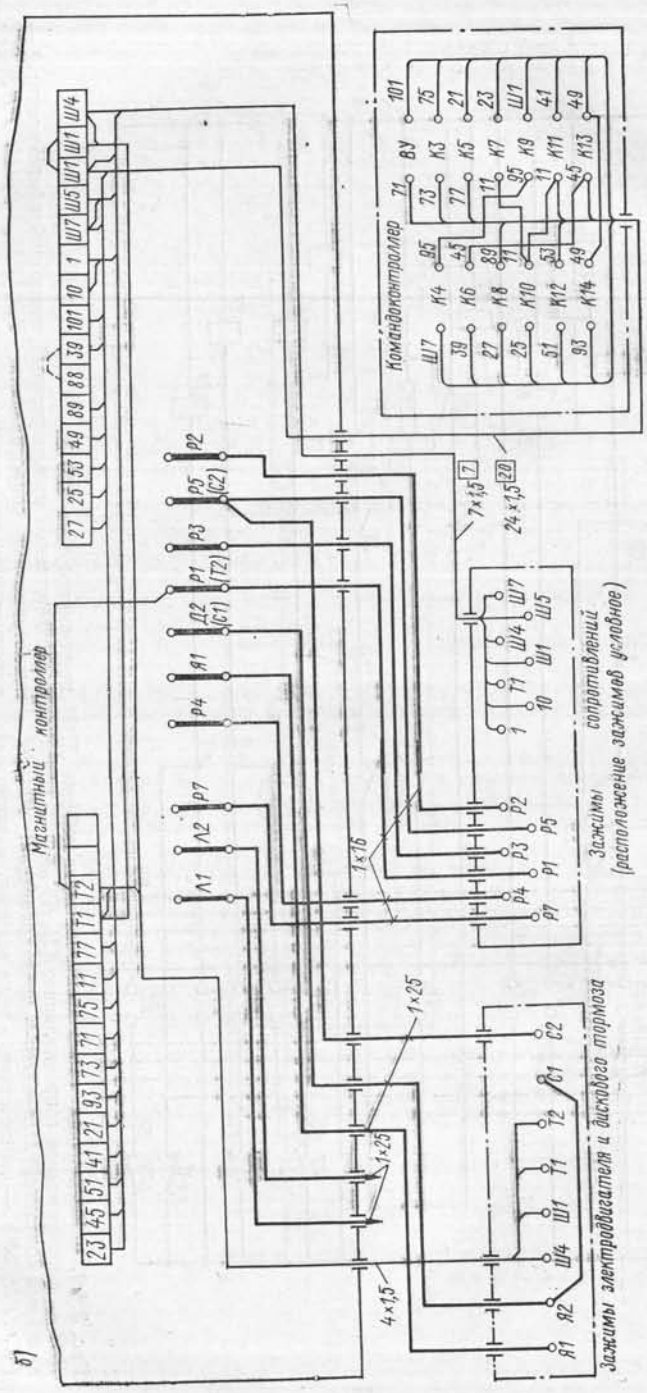



Рис. 3.4.9, б. Монтажная схема электропривода лебедки ЛЭ91 постоянного тока 220 В.



показывает, что режим их работы связан с большим числом пусков и остановок, при этом наибольшую часть времени двигатель работает в режиме холостого хода.

Действительно, при первом способе грузовых операций (работа одной лебедки) за время цикла работы только в один период происходит подъем полного груза, а все остальные периоды складываются из опусканий холостого гака.

Аналогичный характер имеет и работа с двумя стрелами и лебедками. Указанные обстоятельства в значительной степени предопределяют выбор механической характеристики электродвигателя и схемы управления электроприводом грузовой лебедки.

## § 3.4.5. РЯД УНИФИЦИРОВАННЫХ СУДОВЫХ ГРУЗОВЫХ ЛЕБЕДОК С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

В настоящее время имеется ГОСТ 12617—77, распространяющийся на судовые грузовые лебедки с электрическим и гидравлическим приводом, предназначенные для работы на судах в составе грузового устройства со стрелами. В соответствии с ГОСТ 12617—77 грузовые лебедки изготовляются двух типов:

без приставных барабанов;

с приставными барабанами (для обслуживания тяжелых стрел).

Для грузовых лебедок ГОСТ устанавливает следующее:

1) для лебедок должны применяться системы управления электроприводом: а) контроллерная, б) контакторная;

2) система управления электроприводом лебедок при контакторном управлении должна обеспечивать автоматическую задержку на промежуточных положениях при разгоне и торможении;

3) лебедки должны выпускаться с электрооборудованием морского исполнения переменного тока 380 В, 50 Гц или постоянного тока 220 В. В обоснованных случаях допускается выпуск лебедок с электрооборудованием переменного тока 220 В, 50 Гц;

4) наименьшая мощность двигателя переменного тока в режиме ПВ = 40% на обмотке наибольшей частоты вращения должна быть не менее 90% мощности, соответствующей выбиранию с номинальным тяговым усилием при наивысшей частоте вращения. Двигатель переменного тока должен допускать работу в режиме ПВ = 100% при мощности 50% номинальной с наибольшей скоростью, а также в режиме ПВ = 25% с наименьшей скоростью. Время непрерывной работы на обмотках низшей и средней частот вращения должно составлять не менее 5 мин на каждой обмотке при включении с холодного состояния.

Номинальная мощность двигателя постоянного тока в режиме ПВ = 40% должна быть не менее 70% мощности, соответствующей выбиранию шкентеля с номинальным тяговым усилием при номинальной частоте вращения. Электропривод постоянного тока должен обеспечивать работу на промежуточных реостатных характеристиках при всех нагрузках от холостого хода до номинальной и не менее ПВ = 17,5%; время непрерывной работы при указанных условиях должно быть не менее 2 мин.

В табл. 3.4.1 приведены характеристики лебедок типа ЛЭ, выпускаемых в СССР.

Электрооборудование лебедок состоит из электродвигателя с пристроенным дисковым электромагнитным тормозом или отдельным колодочным тормозом (для быстроходных лебедок переменного тока), магнитного или кулачкового контроллера, командоконтроллера, сопротивления (для лебедок постоянного тока) и монтажных проводов.

Электрические схемы электропривода лебедок ЛЭ92, ЛЭ92-1, ЛЭ91-2, ЛЭ91-3 приведены на рис. 3.4.8 и 3.4.9.

# РАЗДЕЛ 4

# ГРЕБНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

## Глава 4.1. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

### § 4.1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

**Классификация.** ГЭУ различаются по типу первичного двигателя, роду тока и назначению.

*По типу тепловых двигателей* ГЭУ подразделяются на дизель-электрические (ДЭГУ) и турбоэлектрические (ТЭГУ).

*По роду тока* ГЭУ подразделяются на установки постоянного, переменного, переменно-постоянного и постоянно-переменного тока.

*По назначению* ГЭУ подразделяются на главные, вспомогательные и комбинированные.

В главных (автономных) ГЭУ турбо- или дизель-генераторы служат только для питания ГЭД. Это не исключает возможности использовать часть мощности ГЭУ для питания общесудовых потребителей.

Вспомогательное значение ГЭУ имеют на судах технического флота: плавкранах, земснарядах, плавмастерских, буровых судах и т. п. На этих судах электроэнергетическая установка служит для приведения в действие технологических механизмов. Во время переходов эти же генераторы питают гребные электродвигатели.

Комбинированные ГЭУ имеют две системы привода гребных винтов: механическую и электрическую. Последняя служит для увеличения мощности на гребном валу при совместной работе главных и вспомогательных двигателей или используется для получения малых скоростей хода, которые не могут быть обеспечены главными двигателями. В ряде случаев в таких установках осуществляется отбор мощности от главного двигателя на судовую сеть при работе ГЭД в режиме генератора.

**Основные элементы ГЭУ.** ГЭУ судна состоит из следующих основных элементов: источников электроэнергии — дизель- или турбогенераторов, гребных электродвигателей, возбудителей генераторов и ГЭД, щита электродвижения, пульта управления, постов дистанционного управления ГЭД.

### § 4.1.2. МОЩНОСТЬ ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРЕБНОГО ВИНТА И ГЭУ

**Определения.** При характеристике ГЭУ различают теоретическую, или эффективную, мощность и мощность на гребных валах.

Подтеоретической (эффективной) мощностью, обозначаемой символом $EHP$, понимается секундная работа, которую надо произвести для буксировки гладкого (без выступающих частей) корпуса судна с заданной скоростью.



Мощность на гребных валах $N_e$, применяемая для характеристики гребных электродвигателей, связана с теоретической мощностью отношением $N_e = EHP\eta$, где $\eta$ — пропульсивный коэффициент, представляющий собой произведение ряда коэффициентов, учитывающих потери, которые сопровождают работу гребного винта за кормой судна и добавочные потери от выступающих частей.

Теоретическая мощность определяется выражением

$$EHP = \frac{Rv}{75},$$

где $v$ — скорость судна; $R$ — полное сопротивление воды движению судна. Одному узлу соответствует скорость, равная 0,515 м/с.

Ввиду сложной зависимости полного сопротивления воды от многочисленных факторов наиболее точным способом определения теоретической мощности для движения судна с заданной скоростью является метод, основанный на испытании в опытовом бассейне модели, геометрически подобной рассматриваемому судну [45]. В начальной стадии проектирования судна используют методы ее приближенного вычисления, основанные на эмпирических формулах (например, формуле Э. Э. Папмеля [2, 45]) и диаграммах, полученных путем обработки экспериментальных данных большого числа модельных и натурных испытаний.

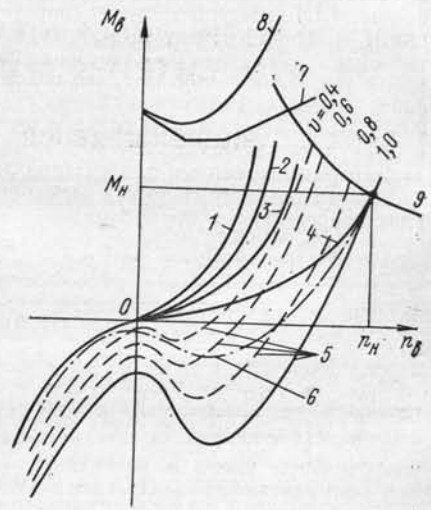


Рис. 4.1.1. Характеристика винта.

**Статические характеристики гребного винта.** Работа гребного винта характеризуется упором $P$, т. е. осевой силой, развиваемой винтом и передаваемой корпусу судна через упорный подшипник, а также вращающим моментом винта $M_в$. Упор и момент винта являются функциями поступательной скорости $v$ и частоты вращения $n_в$. Графически эти зависимости, называемые характеристиками винта, изображаются приближенно квадратичными параболами. Наибольший интерес при расчете ГЭУ представляет зависимость момента сопротивления от частоты вращения винта $M_в = f(n_в)$.

В зависимости от режимов работы и условий плавания судна различаются следующие характеристики винта (рис. 4.1.1): характеристика хода в свободной воде (кривая *4*) — при ходе судна в свободной воде; швартовная характеристика (кривая *1*) — при работающих гребных винтах и неподвижном судне; буксировочная характеристика (кривая *3*) — при ходе судна с «возом»; ледовая характеристика (кривая *2*) — при ходе судна во льдах.

Эти характеристики зависят от осадки судна, состояния моря, силы ветра, степени шероховатости корпуса судна и других причин. Выбор основных параметров гребного винта производится для ледоколов по швартовной характеристике, для буксиров — по буксировочной, для остальных типов судов — по характеристике хода в свободной воде.

**Реверсивные характеристики винта.** Условной реверсивной характеристикой винта называется зависимость $M_в = f(n_в)$ при изменении направления вращения на обратное (реверс) и постоянной поступательной скорости движения судна в прежнем направлении вперед. На рис. 4.1.1 изображены реверсивные характеристики винта для различных скоростей судна (кривые *5*) — от номинальной ($v = 1{,}0$) до нулевой ($v = 0$), расположенные в трех

квадрантах. В первом квадранте винт работает в качестве движителя, во втором — в качестве гидравлической турбины, в третьем — в качестве гидравлического тормоза.

В реальных условиях реверс винта производится при изменяющейся скорости судна, следовательно, реальная реверсивная характеристика (кривая *6*) пересекает семейство кривых, соответствующих различным постоянным скоростям.

**Характеристики гребных винтов ледоколов.** Для ледоколов винт и двигатель выбирают по наиболее тяжелому режиму — ходу во льдах, когда сопротивление движению сильно возрастает. Этот режим близок к швартовному, определяется моментом сопротивления винта при движении во льдах и не учитывает соприкосновения винта со льдом. При движении в глубоко сидящих льдах винт может ударяться о лед, резать его и даже частично или полностью заклиниваться (останавливаться). Момент сопротивления винта при взаимодействии со льдом не зависит от частоты вращения и превышает номинальный момент сопротивления. Кривая *7* на рис. 4.1.1 определяет момент сопротивления при взаимодействии винта со льдом — ледовый момент $M_{лед}$, кривая *8* представляет суммарный момент характеристик *2* и *7*, кривая *9* — гипербола постоянства мощности. Практика эксплуатации ледоколов показывает, что поломка лопастей происходит при остановках винта и продолжающемся движении судна. Для предупреждения поломки лопастей ГЭД должен развивать большой вращающий момент при пониженной частоте вращения, составляющей 30—40% номинальной в ледовом режиме. Этот момент должен быть достаточен для резания льда.

**Расчет гидродинамических характеристик винта.** Согласно [2] упор и момент винта определяются формулами:

$$P = \frac{k_P}{1-\lambda_P}\rho D^4 n_в^2;$$

$$M_в = \frac{k_M}{1-\lambda_P}\rho D^5 n_в^2,$$

где $\lambda_P = \frac{v}{\sqrt{v^2 + n_в^2 D^2}}$ — универсальная поступь винта; $k_P$ и $k_M$ — безразмерные коэффициенты упора и момента.

Зависимости $k_P$ и $k_M$ от $\lambda_P$ для различных типов винтов даны в работе [2] в виде диаграмм, методика и пример расчета характеристик гребных винтов — в [45].

Для инженерных расчетов в первом приближении может быть использован универсальный вид зависимостей $P$ и $M_в$ от частоты вращения винта с учетом скорости судна, представленный в виде параболического полинома

$$P = a_1 n_в^2 + b_1 n_в v + c_1 v^2;$$

$$M_в = a_2 n_в^2 + b_2 n_в v + c_2 v^2,$$

где значения коэффициентов $a$, $b$ и $c$ зависят от типа и размерений судна. По этим выражениям достаточно просто могут быть построены швартовные характеристики при $v = 0$

$$P = a_1 n_в^2 \text{ и } M_в = a_2 n_в^2.$$

Качка влияет на гидродинамические характеристики судна, увеличивая общее сопротивление движению и вызывая периодические изменения момента сопротивления и упора гребного винта. Коэффициенты упора $k_{P\psi}$ и вращающего момента $k_{M\psi}$ даны в [2]. Расчеты показывают, что при волнении 6—7 баллов увеличение $M_в$ не превышает 15%. В штормовую погоду в океане $M_в$ изменяется на ±40%.

**Понятие о рабочих характеристиках ГЭУ.** Под рабочими характеристиками ГЭУ подразумевают совокупность характеристик $M_в = f(n_в)$ в различных режимах и механических характеристик ГЭД $n_{дв} = f(M_в)$ в тех же режимах, а также зависимости, характеризующие соотношение напряжений, частоты вращения, моментов на гребных валах, мощности установки и тока главной цепи.



Точки статических режимов работы при различных сочетаниях количества или мощности генераторов и ГЭД определяются пересечением кривых $M_в = f(n_в)$ и $n_{дв} = f(M_в)$.

Механические характеристики ГЭД должны удовлетворять как основным режимам работы ГЭУ — номинальным и перегрузочным (пусковому, швартовному, реверсивному), так и промежуточным — экономическим и аварийным, возникающим при отключении из схемы отдельных генераторов и ГЭД. Требуемые характеристики обеспечиваются выбором соответствующих систем возбуждения и управления ГЭУ.

## § 4.1.3. МАНЕВРЕННЫЕ КАЧЕСТВА СУДНА С ГЭУ

Маневренные качества судна определяются временем, в течение которого судно может быть переведено из одного состояния в другое с использованием предназначенных для этого судовых средств.

Уравнение движения гребного электропривода определяется дифференциальным уравнением моментов:

$$m_{дв} = \frac{GD_\Sigma^2}{375}\frac{dn_{дв}}{dt} + m_в + m_{тр},$$

где $m_{дв}$ — вращающий момент ГЭД; $GD_\Sigma^2$ — суммарный маховой момент вращающихся частей якоря или ротора ГЭД, валопровода и винта с учетом присоединенных масс воды; $GD_\Sigma^2 \approx 1{,}5GD_{дв}^2$ (если на валу два двигателя, то $GD_\Sigma^2$ надо удвоить); $m_{тр}$ — момент трения системы передач (для электроходов средней и большой мощности принимается равным 1—2% $M_{в.ном}$, а практически им пренебрегают); $m_в$ — момент сопротивления гребного винта.

Время механических переходных режимов пуска и реверса определяется уравнением моментов, представленным в форме конечных приращений:

$$m_{дв.ср} = m_{в.ср} + \frac{GD_\Sigma^2}{375}\frac{\Delta n}{M_{ном}}\frac{n_{ном}}{\Delta t};$$

$$\Delta t = \frac{GD_\Sigma^2}{375}\frac{\Delta n\, n_{ном}}{M_{ном}(m_{дв.ср} - m_{в.ср})},$$

где $m_{дв.ср}$ — средний вращающий момент двигателя в отрезке времени $\Delta t$, определяемый по механической характеристике в относительных единицах; $m_{в.ср}$ — средний момент сопротивления винта в отрезке времени $\Delta t$, определяемый по характеристике винта в относительных единицах.

Дифференциальное уравнение движения судна в общем случае имеет вид:

$$\frac{kD}{g}\frac{dv}{dt} = P(v, n) - R(v),$$

где $k$ — коэффициент, учитывающий увеличение массы судна за счет некоторого количества увлекаемой им воды; $D$ — водоизмещение (масса) судна; $g$ — ускорение силы тяжести; $P$ — упор винта; $R$ — сила сопротивления воды движению судна.

В форме конечных приращений это уравнение записывается в виде

$$\Delta t = \frac{kDv_0\,\Delta v}{gP_0(P_{ср} - R_{ср})},$$

Средние значения силы сопротивления воды и упора винта определяются выражениями:

$$P_{ср} = \frac{2\pi}{H} z (1 - t) M_{ном};$$

$$R_{ср} = \frac{75\eta_в z N}{3v^2_{нач}},$$

где $H$ — шаг винта; $t$ — коэффициент засасывания; $z$ — число гребных валов; $N$ — мощность на гребном валу при $v_{нач}$.

Путь $L_{выб}$, пройденный судном в отрезке времени $\Delta t$ и выраженный в долях длины судна, равен

$$L_{выб} = \frac{v_0 (v_1 + v_2) \Delta t}{2L},$$

где $v_1$ и $v_2$ — значения скорости в начале и конце отрезка времени $\Delta t$.

Длина и время выбега судна при реверсе определяются интегрированием и последующим упрощением уравнения движения судна:

$$L_{выб} = \frac{kDv^2_{нач}}{z(P_{ср} - R_{ср})}.$$

Относительная длина выбега должна быть в пределах $1{,}0 \div 1{,}5 < \frac{L_{выб}}{L} < 3 \div 3{,}5$.

Время выбега судна при реверсе определяется по формуле

$$t_{выб} = \frac{L_{выб}}{v_{ср}} = 2\frac{L_{выб}}{v_{нач}}.$$

## § 4.1.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ГЭУ

Суммарная мощность первичных двигателей ГЭУ $P_{п.\,дв}$ и мощность ГЭД $P_{дв}$ для заданной номинальной скорости судна $v_{ном}$ определяются по формулам:

$$P_{п.\,дв} = \frac{EHP}{\eta_в \eta_{в.\,пр} \eta_{дв} \eta_г \eta_{каб.\,с}};$$

$$P_{дв} = \frac{EHP}{z\eta_в \eta_{в.\,пр}},$$

где $z$ — число гребных винтов.

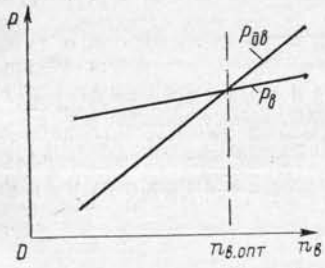



Рис. 4.1.2. Зависимости $P_{дв} = f(n_в)$ и $P_{дв} = f_1(n_в)$ для определения наивыгоднейшей частоты вращения гребного винта.

Коэффициенты полезного действия отдельных элементов (ГЭД $\eta_{дв}$, генераторов $\eta_г$, гребных винтов $\eta_в$, валопровода $\eta_{в.\,пр}$, кабельной сети главного тока $\eta_{каб.\,с}$) задаются на основании имеющихся данных — по КПД элементов ГЭУ эксплуатируемых судов.

Определив приближенные значения $P_{п.\,дв}$ и $P_{дв}$ по каталогам или справочным таблицам, выбирают первичные двигатели и ГЭД ближайшей большей или равной мощности и их КПД. Затем делают обратный пересчет, т. е. рассчитывают буксировочную мощность $EHP$ по реальным значениям $P_{п.\,дв}$, $P_{дв}$ и $\eta$. Если определенное таким образом значение $EHP_{расч}$ будет больше или равно $EHP_{ном}$, то расчет мощности первичных двигателей и ГЭД можно считать законченным.



Выбор частоты вращения ГЭД может быть произведен методом В. И. Полонского [45]. При неизменной скорости судна и переменной частоте вращения винта мощность на гребном валу не будет постоянной: $P_в = f(n_в)$, с другой стороны, при неизменных габаритах ГЭД с изменением частоты вращения будет изменяться его мощность

$$P_{дв} = \frac{D^2_{дв} l n_в}{c} = f_1(n_в),$$

где $D_{дв}$ — диаметр ротора ГЭД; $l$ — длина активного железа ротора; $c$ — машинная постоянная для заданных $D_{дв}$, $l$ и $P_{дв}$.

Максимальный КПД винта, удовлетворяющий техническим требованиям, будет при таких частотах вращения, которые отвечают условию $P_{дв} = P_в$.

Для определения $P_в = f(n_в)$ В. И. Полонский дает формулу

$$P_в = \frac{EHP}{z\cos^2\left[\frac{1}{3}\arccos 0{,}039 n_в \sqrt{\frac{EHP}{zv_a^5}} + 120°\right]},$$

где $v_a = v(1 - w)$ — скорость потока в диске винта ($w \approx 0{,}1 \div 0{,}2$).

Определение оптимальной частоты вращения $n_{в.\,опт}$, отвечающей условию $P_в = P_{дв}$, удобнее всего проводить графически. Для этого строятся кривые $P_в = f(n_в)$ и $P_{дв} = f_1(n_в)$ (рис. 4.1.2). Условию $P_в = P_{дв}$ отвечает точка пересечения указанных кривых. Этой точке соответствует $n_{в.\,опт}$ для выбранного диаметра корпуса ГЭД. Величина последнего определяется условиями его установки на судне и удобствами эксплуатации. Если на гребном валу находится несколько ГЭД, то в выражение для $P_{дв}$ вводится множитель, равный числу ГЭД.

В тех случаях, когда габариты выбранных электрических машин неизвестны, их можно определить по методу В. Т. Касьянова[21].

## § 4.1.5. ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ГЭУ

Выбор системы возбуждения определяется требуемым видом внешней характеристики генераторов и характером кривых изменения магнитного потока ГЭД. В ГЭУ постоянного тока учитывается также способ реверсирования ГЭД (изменением направления магнитного потока или изменением тока главной цепи). В зависимости от мощности, необходимой для возбуждения главных машин, системы возбуждения могут быть одно- и многокаскадными. Во втором случае обмотка возбуждения питается возбудителем, а все обратные регулирующие сигналы (по напряжению, току и т. д.) суммируются подвозбудителем.

**Типы и схемы включения возбудителей.** В ГЭУ в качестве возбудителей применяются обычные генераторы постоянного тока независимого возбуждения, многообмоточные генераторы постоянного тока, электромашинные усилители (ЭМУ), магнитные усилители (МУ), полупроводниковые управляемые преобразователи и статические электромагнитные возбудители, построенные на принципе амплитудно-фазового компаундирования.

Схемы включения основных и резервных возбудителей ГЭУ предполагают как индивидуальное возбуждение, так и групповое, при котором к одному возбудителю подключены обмотки возбуждения нескольких машин.

Машинные возбудители ГЭУ обычно приводятся во вращение электродвигателями, получающими электроэнергию от общесудовой сети. С валом приводного двигателя возбудителя часто соединяется также генератор постоянного напряжения (ГПН), питающий обмотки возбуждения возбудителей, цепи управления, сигнализации, контроля, защиты. Иногда ГПН является одновременно и возбудителем ГЭД, если не требуется изменение магнитного потока последнего. ГЭД может иметь и свой возбудитель с приводным электродвигателем. В некоторых установках возбудитель ГЭД входит в общий агрегат возбуждения.

При индивидуальном возбуждении иногда соединяют возбудители с валом генератора. В зарубежных ГЭУ встречаются установки, в которых главные дизель-генераторы приводят во вращение возбудительные агрегаты, состоящие из нескольких электрических машин. По Правилам Регистра СССР для генераторов и ГЭД предусматриваются резервные возбудители.

Статические системы возбуждения с МУ и полупроводниковыми управляемыми вентилями питаются от судовой сети переменного тока через согласующие трансформаторы. Правила Регистра СССР рекомендуют выбирать номинальные напряжения возбудителей в пределах 230 В. Напряжение возбуждения при форсировке не ограничивается.

**Электромашинные возбудители.** Для возбуждения генераторов и ГЭД в ГЭУ переменного и постоянного тока применяются генераторы постоянного тока с одной обмоткой независимого возбуждения, ток в которой в зависимости от условий изменяется вручную или автоматически с помощью дополнительных устройств — подвозбудителей. В ГЭУ постоянного тока применяются также возбудители генераторов, которые кроме обмотки независимого возбуждения имеют дополнительные обмотки отрицательной обратной связи по току главной цепи и самовозбуждения (усилительная).

В качестве возбудителей ГЭД иногда применяются возбудители с положительной обратной связью по току. Обмотка отрицательной обратной связи по току главной цепи (ОСВВГ) обычно включается параллельно обмоткам дополнительных полюсов (ОДП) и компенсационной обмотке (КО) ГЭД и по ней проходит небольшой ток, составляющий 1—1,5% главного тока. МДС обмотки ОСВВГ направлена встречно действию МДС обмотки независимого возбуждения. Обмотка самовозбуждения (шунтовая) увеличивает зависимость напряжения возбудителя и магнитного потока генератора от тока главной цепи и позволяет уменьшить величину сигнала управления.

**Электромашинные усилители.** Для повышения быстродействия возбудителя и уменьшения сигнала управления применяются ЭМУ поперечного (амплидины) и продольного (рототорлы) поля. Широкое распространение получили ЭМУ поперечного поля, обладающие лучшими технико-экономическими показателями и добротностью. Серийно выпускаются ЭМУ мощностью до 20 кВт. ЭМУ продольного поля можно изготовить на базе обычных серийных машин постоянного тока, используя ту же технологическую оснастку. По условиям коммутации ЭМУ продольного поля могут изготовляться на те же мощности, что и обычные машины постоянного тока. Эти обстоятельства и обусловливают применение ЭМУ продольного поля в системах автоматического регулирования ГЭУ, где требуется усилитель мощностью в несколько десятков киловатт.

Существенным преимуществом ЭМУ перед электронными, магнитными, полупроводниковыми усилителями является их способность легко обеспечивать изменение полярности на выходе при изменении полярности на входе машин и высокая перегрузочная способность. ЭМУ поперечного поля допускают, как правило, двух-, трехкратные кратковременные перегрузки по току нагрузки при номинальном напряжении и трех-, пятикратные форсировки по току управления. Основные технические характеристики ЭМУ, особенности их применения в ГЭУ и схемы включения можно найти в [21].

**Магнитные усилители.** В системах возбуждения применяются, как правило, магнитные усилители с внутренней обратной связью в сочетании с выпрямительным мостом. Для суммирования сигналов управления МУ имеет несколько обмоток управления. Подробное исследование работы трехфазных МУ с неуправляемыми выпрямительными мостами, их характеристики, необходимые расчетные формулы выпрямленного напряжения и тока, а также данные сравнения различных способов включения дросселей и вентилей даны во втором томе справочника и в работах [21, 40, 51].

**Тиристорные возбудители.** Системы возбуждения на управляемых вентилях (тиристорах) представляют собой одно- или двухполупериодные управляемые мосты, получающие питание от многофазной сети непосредственно или через понижающий трансформатор.

На рис. 4.1.3 показана блок-схема системы управления вентилем, состоящей из двух основных элементов: фазосдвигающего устройства *ФУ* и генератора импульсов *ГИ*. В *ФУ* задается момент подачи управляющего импульса в зависимости от внешнего воздействия. *ГИ* усиливает эти начальные маломощные импульсы *ФУ* и формирует управляющий импульс с соответствующим фронтом и продолжительностью, который подается на управляющий электрод *У* и катод *К*.



В системах управления вентилями применяются следующие способы формирования управляющего сигнала: вертикальное управление, в котором заданная форма напряжения сравнивается с постоянным по направлению сигналом (внешним воздействием); управление с помощью импульсных трансформаторов; управление с мостовыми фазосдвигающими устройствами; управление на однополупериодных МУ.

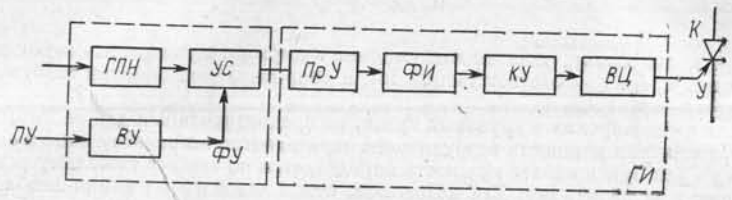



Рис. 4.1.3. Блок-схема системы управления вентилем.

*ГПН* — генератор переменного напряжения, синхронизированного с напряжением вентиля; *УС* — узел сравнения; *ПрУ* — предварительный усилитель; *ФИ* — формирователь импульсов; *КУ* — конечный усилитель; *ВЦ* — узел выходных цепей; *ПУ* — пост управления; *ВУ* — входное устройство.

Принцип действия и расчет элементов схем можно найти в [40, 51].

**Статические возбудители синхронных машин.** Для возбуждения синхронных генераторов и ГЭД применяются системы амплитудно-фазового компаундирования. Так как ГЭУ переменного тока могут работать при пониженной частоте, то в качестве компаундирующего элемента используется ненасыщенный дроссель

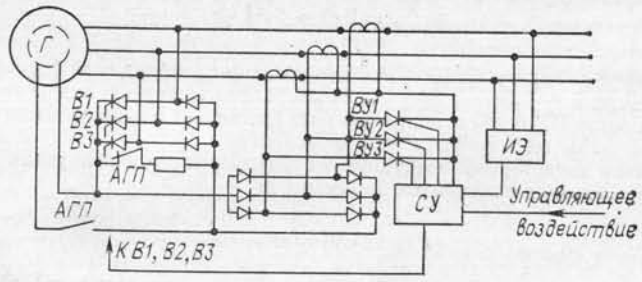



Рис. 4.1.4. Схема системы компаундирования на тиристорах.

с воздушным зазором. Трансформатор амплитудно-фазового компаундирования, в котором суммируются составляющие тока возбуждения по напряжению и току, выбирается с некоторым запасом, так что внешняя характеристика генератора проходит выше точки номинального режима. Для поддержания номинальных или требуемых параметров (напряжения или тока) избыточная мощность возбуждения отбирается дросселем отбора или тиристорами, управление которыми осуществляется корректором напряжения и системой управления.

Применяются системы компаундирования на тиристорах; схема одной из систем с электрическим суммированием показана на рис. 4.1.4. Корректор напряжения с системой управления *СУ* действует на вентили *В1*, *В2*, *В3* трехфазного двухполупериодного моста. Тиристоры отбора *ВУ1*, *ВУ2* и *ВУ3* служат для широкого изменения напряжения синхронного генератора, что необходимо для ГЭУ

переменно-постоянного тока. В схеме *ИЭ* — измерительный элемент, *АГП* — автомат гашения поля.

Принцип действия систем амплитудно-фазового компаундирования и расчет основных элементов схем и характеристик возбуждения даны в [40, 51].

**Параметры возбудителей.** Расчетная мощность возбудителя равна мощности, потребляемой обмоткой возбуждения генератора или ГЭД в заданном режиме хода судна:

$$P_{\text{возб}} = mI_{\text{в}}^2 r,$$

где $m$ — число машин, обмотки возбуждения которых получают питание от одного возбудителя; $I_{\text{в}}$, $r$ — соответственно ток и сопротивление обмотки возбуждения генератора или ГЭД.

Для пассажирских и грузовых судов, не предназначенных для ледового плавания, расчетная мощность возбудителей определяется по режиму хода в свободной воде; для буксиров эта мощность определяется по самому тяжелому режиму, близкому к швартовному; для ледоколов, судов ледового плавания необходимо учитывать обеспечение динамических режимов при ударах винта о лед и фрезеровании льда.

При использовании машинного возбудителя его тип выбирают в соответствии с мощностью $P_{\text{возб}}$ по каталогу машин постоянного тока, например, серии П или ЭМУ. Номинальное напряжение выбранной машины должно быть примерно в 1,75—2,5 раза больше номинального напряжения обмоток возбуждения генераторов или ГЭД, чтобы возбудитель работал на прямолинейном участке кривой намагничивания и обладал форсировочной способностью.

Более точно напряжение, а следовательно, и расчетная мощность возбуждения определяются с учетом требуемого коэффициента форсирования.

В случае МУ-возбудителя (для целей реверса применяют обычно двухтактные магнитные усилители, при которых обмотка возбуждения генератора или ГЭД разделена пополам и включена по мостовой схеме вместе с балластными сопротивлениями, равными $R_{\text{б}} = 0{,}5r$) эта мощность равна [51]:

$$P_{\text{возб}} = 2\,(2 \div 2{,}5)\, I_{\text{в}}^2 r.$$

Максимальное выходное напряжение для создания необходимой форсировки выбирается также в 2—2,5 раза превышающим напряжение расчетного режима. Расчетная мощность МУ-возбудителя в два раза превышает мощность машинного возбудителя с таким же коэффициентом форсировки.

В схеме с тиристорным возбудителем трансформатор для питания тиристорного преобразователя выбирается по мощности

$$P_{\text{тр}} = 1{,}045 U_{d0} I_{\text{в. ном}},$$

где 1,045 — число, учитывающее индуктивное сопротивление трансформатора, равное 4,5%; $U_{d0} = \dfrac{U_{\text{в. ном}} k_{\text{ф}}}{k_{\text{н}} \left(1 - A \dfrac{e_{\text{к. з}}}{100}\right)}$ — среднее значение выпрямленного напряжения тиристорного преобразователя; $k_{\text{н}}$ — коэффициент снижения напряжения сети, питающей возбудитель (по Регистру $k_{\text{н min}} = 0{,}8$); $A$ — коэффициент наклона внешней характеристики тиристорного преобразователя, равный 0,5; $e_{\text{к. з}}$ — напряжение короткого замыкания трансформатора, равное 5%.

Скорость нарастания напряжения возбуждения и величина его форсировки определяют быстродействие системы возбуждения.

Коэффициент форсировки $k_{\text{ф}}$ в зависимости от электромагнитной постоянной обмотки возбуждения $T_{\text{в}}$ генератора или ГЭД и необходимого времени гашения магнитного поля $t_{\text{г}}$ может быть выбран по табл. 4.1.1.

Постоянные времени цепей возбуждения обычно равны 1—2 с, что требует для полного размагничивания машины трех-, четырехкратного запаса напряжения возбудителя. Значению $U_{\text{в max}}$ соответствует такое же значение тока возбуждения по отношению к току расчетного режима, которое и определяет расчетную мощность возбудителя. Так как $U_{\text{в max}}$ в силу инерционности обмоток возбуждения прикладывается не мгновенно (время нарастания напряжения на якоре ЭМУ составляет 0,2—0,3 с; в случае трехобмоточного возбудителя оно равно 0,4—0,6 с), то в таких динамических режимах, как заклинивание винта, могут наблюдаться токи, превышающие ток стоянки. Поэтому более точное определение мощности возбудителя оказывается возможным после построения кривых переходных процессов.

*Таблица 4.1.1*

**Время полного размагничивания генератора $t_{\text{г}}$**

| $T_{\text{в}}$, с | $t_{\text{г}}$ при $k_{\text{ф}}$, равном | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 0,7 | 0,41 | 0,29 | 0,22 | 0,18 |
| 2 | 1,4 | 0,82 | 0,58 | 0,44 | 0,36 |
| 3 | 2,1 | 1,2 | 0,87 | 0,66 | 0,54 |
| 4 | 2,8 | 1,6 | 1,2 | 0,88 | 0,72 |

## § 4.1.6. РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА, СИГНАЛИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ГЭУ

Распределительные щиты служат для приема, распределения и контроля электрической энергии. Начиная с напряжений 500 В и выше главные распределительные щиты (ГРЩ) применяются закрытого типа. Требования, предъявляемые к ГРЩ, сводятся в основном к обеспечению надежности работы ГЭУ, удобству ее обслуживания, а также общей и пожарной безопасности.

Высота щитов чаще всего берется равной 1900—2000 мм. Ширина панелей находится в пределах 600—800 мм. Глубина секций колеблется в пределах 500—800 мм. Удельный объем щитов равен 0,7—2,3 дм³/л. с. Наиболее компактное использование габаритов в распределительных устройствах позволяет достичь удельного объема 0,22 дм³/л. с.

В схемах главного тока, возбуждения, управления и защиты применяются блокировки следующих видов и назначений:

1) электромагнитная, исключающая возможность переключения избирательных переключателей и переключателя возбудителей при наличии напряжения в цепи управления и возбуждения главных машин. Осуществляется электромагнитными замками, расположенными на валу переключателя. Чтобы открыть замок, необходимо подать питание в цепь катушки замка, отключив одновременно питание цепей возбуждения главных машин;

2) электромагнитная, разрешающая переключение постов управления только после установки их в положение «Стоп». Для осуществления блокировки в цепь катушки электромагнитного замка переключателя постов управления включены контакты постов, которые замкнуты только при установке их рукояток в положение «Стоп»;

3) электрическая, разрешающая начинать управление ГЭД только с положения «Стоп». Осуществляется контактами постов управления, которые замкнуты только в нулевом положении и включены в цепь катушек контакторов, подключающих возбуждение главных машин. Такая блокировка носит название нулевой защиты;

4) электрическая, исключающая пуск и работу ГЭД при включенном валоповоротном устройстве. Осуществляется контактами конечных выключателей, установленных на этом устройстве.

Для контроля за работой ГЭУ и отдельных ее элементов предусматривается сигнализация четырех видов.

Указательная сигнализация осуществляется лампами белого и зеленого света, за исключением сигнализации о включенных валоповоротных устройствах и об открытых дверях щита электродвижения с помощью ламп красного света. Световые сигналы информируют о положении избирательных переключателей, переключателей постов управления, возбудителей, подключении возбудителей, вентиляторов генераторов и ГЭД, валоповоротных устройств, положении дверей щита электродвижения, давлении воды в охладителях генераторов и ГЭД.

Тревожная сигнализация указывает на нарушение режима работы того или иного элемента ГЭУ красными сигнальными лампами, установленными на щите электродвижения и в ходовой рубке. Световой сигнал дублируется звуковым, т. е. одновременно включается ревун. Сигнализация действует при повышении температуры подшипников и охлаждающего воздуха, падении давления воды в системе воздухоохладителей главных генераторов и ГЭД, падении давления в системе прокачки воды в дейдвудах гребных валов, срабатывании защиты ГЭУ и т. д.

Приказная и исполнительная сигнализация применяется на электроходах, где управление ГЭУ и контроль за ее работой осуществляются из специального поста энергетики и живучести (ПЭЖ). Для передачи приказания замыкаются цепи приказных сигнальных ламп в тех помещениях, куда передается приказ. Например, такие лампы белого света устанавливаются около щита электродвижения и сигнализируют о том, какой режим работы ГЭУ необходим в данный момент. После исполнения приказа на щите электродвижения и в ПЭЖ загораются световые табло с надписями, сигнализируя о правильности исполнения приказа.

Управление ГЭД производится с помощью постов управления. Схема управления ГЭД выбирается с учетом количества мест, из которых производится управление его частотой вращения (ходовая рубка, верхний мостик, ЦПУ, кормовая оконечность судна и т. д.), а также с учетом количества требуемых постов управления в одном помещении.

Для удобства управления и повышения живучести установки обычно предусматривают два поста: местный, используемый при пусконаладочных работах ГЭУ и в качестве резервного, и дистанционный, используемый в качестве основного в эксплуатационных режимах. Местный пост встраивается в щит или пульт электродвижения, и управление им производится вручную с помощью штурвала. Дистанционные посты размещаются в ходовой рубке, на верхнем мостике и его крыльях. Управление осуществляется с помощью рукояток машинного телеграфа, связанных с дистанционным постом управления механической или электрической передачей. При управлении с местного поста команды о требуемой частоте и направлении вращения ГЭД передаются машинным телеграфом.

Управление ГЭУ может производиться по двум схемам: простой и следящей. Первая достаточно надежна, удобна и широко используется в существующих ГЭУ, вторая, хотя и способствует автоматизации управления, но до настоящего времени не применяется из-за сложности ее конструктивного исполнения.

На некоторых судах для повышения экономичности одновременно с изменением мощности главных генераторов регулируют частоту вращения генераторных агрегатов с помощью электропневматических вентилей, изменяющих подачу топлива. На ряде судов эта операция производится вручную отдельным аппаратом.



# Глава 4.2. ГЭУ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## § 4.2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Характерные особенности ГЭУ постоянного тока заключаются в легкости широкого и плавного регулирования частоты вращения гребных электродвигателей и возможности удобного использования полной мощности ГЭУ при переменном значении сопротивления движению судна. Это определяет сферу применения ГЭУ постоянного тока на судах, от которых требуются особенно высокие маневренные качества.

ГЭУ постоянного тока по типу источников энергии делятся на установки с вращающимися источниками (машинными генераторами) и установки со статическими источниками энергии (аккумуляторными батареями, электрохимическими, термоэлектрическими и другими источниками прямого преобразования энергии).

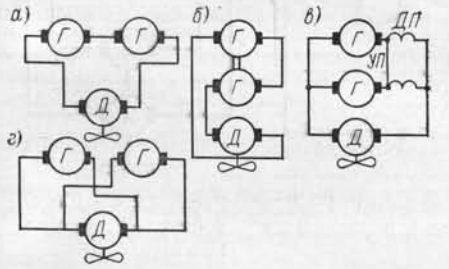



Рис. 4.2.1. Возможные соединения питающих генераторов: *а*, *б* — последовательное; *в*, *г* — параллельное.
*ДП* — дополнительные полюса; *УП* — уравнительный провод.

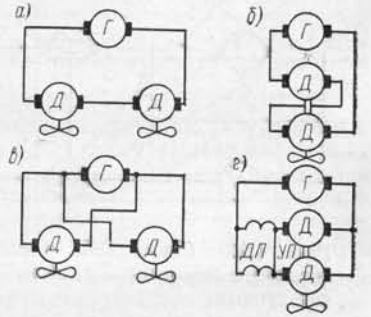



Рис. 4.2.2. Возможные соединения гребных электродвигателей: *а*, *б* — последовательное; *в*, *г* — параллельное.

Наиболее распространенными в настоящее время являются дизель-электрические установки (ДЭГУ). Турбоэлектрические установки (ТЭГУ) применяются только в особых случаях, когда требуется большая мощность для движения.

В ДЭГУ обычно применяют от двух до шести генераторных агрегатов, хотя имеются установки, в которых количество генераторов достигает 10—12. Число ГЭД в безредукторных установках равно числу гребных винтов. Как генераторы, так и ГЭД с целью повышения живучести, снижения напряжения на якоре и удобства размещения могут иметь по два якоря.

Совместная работа генераторов и ГЭД может осуществляться при параллельном и последовательном соединении электрических машин. На рис. 4.2.1 показаны возможные соединения для питающих генераторов, на рис. 4.2.2 — для гребных двигателей.

Параллельное соединение позволяет выбирать генераторы и ГЭД на полное напряжение питания, при этом также обеспечивается удобство включения и отключения любого количества генераторов без перерыва питания ГЭД. Однако из-за сложности регулирования напряжения параллельно работающих генераторов, большой величины напряжения между отдельными точками главной цепи и корпусом судна, сравнительно малого запаса мощности установки при выходе из строя одного или нескольких генераторов, сложности схемы соединений, большого количества аппаратуры коммутации, защиты и контроля, сложности регулирования частоты вращения ГЭД такое соединение широкого распро-

странения не получило. В установках со статическими источниками энергии для расширения диапазона регулирования частоты вращения ГЭД предусматривается переключение якорей ГЭД с последовательного на параллельное. Устойчивость работы параллельно соединенных якорей ГЭД осуществляется с помощью уравнительных соединений или специальных систем регулирования возбуждения.

Последовательное соединение дает возможность использовать способ управления ГЭД по системе генератор—двигатель (Г—Д), отличающийся большой экономичностью и плавностью регулирования. Регулирование частоты вращения и реверсирование ГЭД производится изменением напряжения питающих генераторов при постоянном возбуждении ГЭД. К реверсированию ГЭД изменением напряжения его тока возбуждения прибегают только в том случае, когда необходимо реверсировать каждый ГЭД независимо от другого. При последовательном соединении генераторов достигается устойчивая работа в любых режимах, даже в случае большой неравномерности нагрузок, при случайных значительных перегрузках и значительном расхождении внешних характеристик

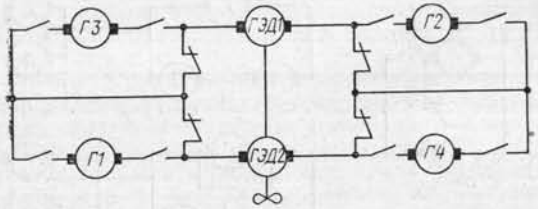



Рис. 4.2.3. Схема ГЭУ с двухъякорным ГЭД и четырьмя генераторами, включенными в различных сочетаниях.

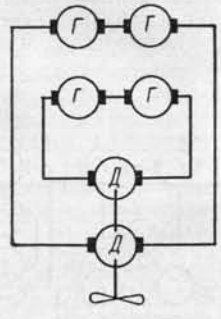



Рис. 4.2.4. Двухконтурная схема ГЭУ.

генераторов. Полная мощность генераторов используется в случае вывода одного или нескольких генераторов из работы. При установке сравнительно низковольтных генераторов возможно использование высоковольтного ГЭД, при этом напряжение между отдельными точками главной цепи и корпусом судна может быть значительно уменьшено путем определенного чередования включения в один контур якорей генераторов и ГЭД (попеременно-последовательное соединение). Схема такой установки с четырьмя генераторами приведена на рис. 4.2.3. К достоинствам последовательного способа соединения относится также использование наиболее простой системы защиты и контроля, так как практически необходимо контролировать и защищать одну общую главную цепь.

Двухконтурная схема предполагает питание каждого из двух ГЭД, находящихся на одном гребном валу, от отдельного генератора или группы последовательно соединенных генераторов (рис. 4.2.4). Токи ГЭД в такой схеме распределяются аналогично параллельному соединению ГЭД, расположенных на одном валу. При крутопадающих внешних характеристиках генераторов неравенство токов ГЭД ограничивается автоматически, обеспечивая примерно одинаковые моменты вращения. Двухконтурные схемы имеют следующие достоинства: 1) цепи контуров электрически разъединены и питаются от разных генераторов, что повышает надежность установки (особенно важно для одновальных судов); 2) упрощаются аппараты цепи главного тока.

Режимы ГЭУ при работе не всех генераторов соответствуют ходу судна с пониженной скоростью и по причинам такого снижения делятся на аварийные и экономические.

Аварийные режимы связаны со снижением скорости судна на длительное время вследствие штормовой погоды, с неисправностью одного из тепловых двигателей, остановкой его для профилактического ремонта во время хода судна, неисправностью генератора или его системы управления.



Экономические режимы, требующие хода судна с пониженной скоростью, вызываются соображениями уменьшения расхода топлива на единицу пройденного расстояния по сравнению с полным ходом.

В этих режимах мощность работающих тепловых двигателей используется полностью с высоким КПД.

Возможные схемы включения различного числа генераторов применительно к установке с четырьмя генераторными агрегатами показаны на рис. 4.2.3. При одном генераторе возможно включение как одного, так и двух якорей ГЭД. Один якорь включается для уменьшения потерь и повышения общего КПД ГЭУ. При отключении части генераторов остальные для полного использования мощности тепловых двигателей должны работать с номинальной мощностью.

В случае включения не всех генераторов режимы ГЭУ рассчитываются по параболической зависимости характеристики винта $M_в = k_м n^2$ или $P_в = k_р n^3$. Для схемы, приведенной на рис. 4.2.3, суммарная мощность установки делится между четырьмя генераторами. На характеристике проведены прямые, параллельные оси абсцисс (рис. 4.2.5), ординаты которых равны мощности одного, двух, трех, четырех генераторов. Эти прямые пересекают характеристику гребного винта в точках $A$, $B$, $C$, $D$ и определяют значения частоты вращения гребного винта $n_{ном}$, $n_3$, $n_2$, $n_1$ в этих режимах. Момент вращения на гребном валу находится по значениям мощности и соответствующей частоты вращения, полученных для точек $A$, $B$, $C$ и $D$.

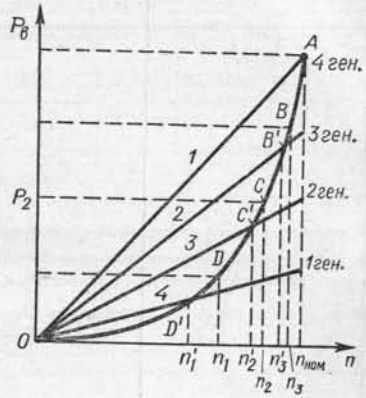



Рис. 4.2.5. К определению частоты вращения гребного винта и используемой мощности в режимах экономического хода и аварийных.
$1 - P = M_{дв}n$; $2 - P = 0{,}75M_{дв}n$; $3 - P = 0{,}5M_{дв}n$; $4 - P = 0{,}25M_{дв}n$.

В схемах с параллельным включением генераторов момент вращения ГЭД $M_{дв}$ изменяется пропорционально числу включенных генераторов при сниженном напряжении в целях исключения их перегрузки. На рисунке точки пересечения характеристики гребного винта с прямыми *1—4* ($A$, $B'$, $C'$, $D'$) определяют значения частоты вращения винта в этих режимах. ($n_{ном}$, $n_3'$, $n_2'$, $n_1'$).

Расчетные мощности генераторов и ГЭД могут отличаться от номинальной, определяемой мощностью на гребном валу, и зависят от режимов работы ГЭУ. Н. И. Чакиревым предложен метод [21, 45], позволяющий в зависимости от соотношения количества генераторов $k_г$, ГЭД $k_{дв}$ и гребных винтов $z$ определить основные параметры установки с различным соединением якорей электрических машин при отключении части из них. В табл. 4.2.1 приведены расчетные формулы основных параметров ГЭУ в относительных единицах, полученные на основании этого метода. Формулы разбиты на две группы в зависимости от условий использования основных элементов ГЭУ, которые определяются неравенствами $zk_г^2 < k_{дв}^2$ и $zk_г^2 > k_{дв}^3$. Первое неравенство соответствует режимам, при которых $P_г = 1{,}0$ и $M_{дв} < 1{,}0$, неравенство второе — режимам, когда $P_г = 1{,}0$ и $M_{дв} = 1{,}0$.

В табл. 4.2.2 приведены результаты расчета параметров одновальной установки с четырьмя генераторами и сдвоенным ГЭД (см. рис. 4.2.3).

В соответствии с [49] в ГЭУ постоянного тока номинальное напряжение на зажимах якоря каждого генератора и ГЭД или между двумя точками цепи главного тока не должно превышать 1200 В. Рекомендуются следующие номинальные напряжения на зажимах генераторов: 230, 350, 500, 700, 800, 1000 В. Применение напряжения выше 1200 В должно быть согласовано с Регистром СССР.

*Таблица 4.2.1*

**Формулы для расчета режимов установки**

| Условия использования ГЭУ | Режим | Расчетные формулы |
|---|---|---|
| $zk_г^2 < k_{дв}^3$ | $P_г = \Phi_г = 1$; $M_{дв} = \Phi_{дв} = 1$ | $P_\Sigma = k_г$; $M_\Sigma = z^{1/3} k_г^{2/3}$; $P_{дв} = \frac{k_г}{z}$; $M_{дв} = \frac{k_г^{2/3}}{z^{2/3}}$; $n = k_г^{1/3} z^{1/2}$; $P_{дв} = E_{дв} = U_{дв} = \frac{k_г}{k_{дв}}$; $M_{дв} = \Phi_{дв} = z^{1/3} \frac{k_г^{2/3}}{k_{дв}}$ |
| $zk_г^2 > k_{дв}^3$ | $P_г = \Phi_г < 1$; $M_{дв} = \Phi_{дв} = 1$ | $P_\Sigma = \frac{k_{дв}^{3/2}}{z^{1/2}}$; $M_\Sigma = k_{дв}$; $P_{дв} = \frac{k_{дв}^{3/2}}{z^{3/2}}$; $M_{дв} = \frac{k_{дв}}{z}$; $n = P_{дв} = E_{дв} = U_{дв} = \frac{k_{дв}^{1/2}}{z^{1/2}}$; $P_г = M_г = E_г = U_г = \Phi_г = \frac{k_{дв}^{3/2}}{k_г z^{1/2}}$ |

С точки зрения схем и принципов регулирования, положенных в основу проектирования ГЭУ, различают три основных типа систем:

1) системы генератор — двигатель (Г—Д) с $U$ = var и $I$ = var;

2) системы, работающие при постоянной силе тока ($I$ = const) или же регулируемой по заданному закону $I = f(n)$;

3) системы неизменного напряжения ($U$ = const).

*В системах по схеме Г—Д* различают три группы установок: ГЭУ с гребным двигателем, имеющим прямолинейную характеристику, ГЭУ с ограничением тока главной цепи и ГЭУ постоянства мощности. Первая группа в настоящее время практически не применяется, вторая используется для буксиров и других судов, имеющих значительный диапазон изменения моментов сопротивления на валу ГЭД; третья — преимущественно для ледоколов и судов ледового плавания.

В установках первой группы управление величиной и направлением частоты вращения ГЭД осуществляется изменением величины и полярности возбуждения генераторов. Магнитный поток ГЭД в процессе управления не регулируется. Величина его меняется только в соответствии с изменением количества генераторов, включаемых в главную цепь.

Установки второй и третьей групп (замкнутые системы) отличаются по схемам регулирования, точности получения гиперболы постоянства мощности в заданном рабочем диапазоне (см. § 4.2.2).

К достоинству установок по схеме Г—Д следует отнести: экономичность на пониженных мощностях, простоту, компактность и относительно малую стои-



*Таблица 4.2.2*

**Результаты расчета параметров одновальной ГЭУ с четырьмя генераторами и сдвоенным ГЭД**

| № режима | Число якорей | | Значение коэффициента | | Условия использования ГЭУ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Г | Д | $k_г$ | $k_{дв}$ | $k_г^2 < k_{дв}^3$ | $k_г^2 > k_{дв}^3$ |
| 1 | 1 | 1 | 0,25 | 0,5 | $0{,}0625 < 0{,}125$ | — |
| 2 | 1 | 2 | 0,25 | 1,0 | $0{,}0625 < 1{,}0$ | — |
| 3 | 2 | 1 | 0,5 | 0,5 | — | $0{,}25 \geqslant 0{,}125$ |
| 4 | 2 | 2 | 0,5 | 1,0 | $0{,}25 < 1{,}0$ | — |
| 5 | 3 | 1 | 0,75 | 0,5 | — | $0{,}563 \geqslant 0{,}125$ |
| 6 | 3 | 2 | 0,75 | 1,0 | $0{,}563 < 1{,}0$ | — |

| № режима | Параметры | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P_\Sigma = P_{дв}$ | $M_\Sigma = M_{дв}$ | $n$ | $M_{дв} = \Phi_{дв}$ | $P_{дв}$ | $P_г = \Phi_г$ |
| 1 | 0,25 | 0,397 | 0,63 | 0,794 | 0,5 | 1,0 |
| 2 | 0,25 | 0,397 | 0,63 | 0,397 | 0,25 | 1,0 |
| 3 | 0,353 | 0,5 | 0,706 | 1,0 | 0,706 | 1,0 |
| 4 | 0,5 | 0,63 | 0,5 | 0,63 | 0,5 | 1,0 |
| 5 | 0,353 | 0,5 | 0,706 | 1,0 | 0,706 | 0,472 |
| 6 | 0,75 | 0,825 | 0,75 | 0,825 | 0,75 | 1,0 |

мость аппаратуры регулирования; плавное в широких пределах регулирование частоты вращения, незначительное повышение частоты вращения ГЭД при оголении винта.

*Системы неизменного тока* обеспечивают независимое управление величиной и направлением частоты вращения любого количества электродвигателей, включенных в один последовательный контур с питающими их генераторами. Управление электродвигателями производится изменением их потока возбуждения. Напряжение генераторов регулируется так, чтобы ток главной цепи в процессе регулирования оставался неизменным.

Независимое управление каждым исполнительным двигателем, включенным в общую цепь, позволяет перераспределять мощность между ними без вывода их из работы; при этом установленная мощность генераторов всегда может быть выбрана меньше суммарной мощности потребителей. При частичных нагрузках КПД системы неизменного тока несколько меньше, чем системы Г—Д, так как тепловые потери имеют место в полной мере у всех работающих электрических машин.

*Системы неизменного напряжения* наибольшее распространение получили на малотоннажных судах, где источниками тока являются аккумуляторные батареи.

В качестве ГЭД применяются двигатели параллельного и последовательного возбуждения. Регулирование частоты вращения ГЭД осуществляется реостатом в цепи якоря или обмотки возбуждения. Возможны комбинации при использовании этих способов, а также ступенчатое изменение напряжения питания переключением секций батарей. ГЭД рассчитываются так, чтобы они могли в течение определенного отрезка времени развивать при ослабленном потоке мощность, соответствующую максимальной скорости судна, а при самой малой скорости обеспечи-

вать необходимый магнитный поток с учетом насыщения железа якоря, не вызывая перегрузки обмотки возбуждения.

С появлением новых источников тока область применения таких систем будет расширяться.

## § 4.2.2. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

**Исходные данные и последовательность расчета.** Статические характеристики ГЭУ определяются совместным действием возбудителей, генераторов и ГЭД, охваченных тем или иным видом обратной связи (по току, напряжению, частоте вращения и т. д.). Расчет их, как правило, ведется в такой последовательности: строится внешняя характеристика возбудителя, затем генератора и, наконец, механическая характеристика ГЭД.

Для расчета необходимы следующие исходные данные:

*для генератора* — мощность $P_г$; напряжение $U_г$; ток $I$; ток и напряжение возбуждения $I_{в.г}$ и $U_{в.г}$; сопротивление якорной цепи в горячем состоянии: $R_{я.г} = 1{,}24\,(R_я + R_{д.п} + R_{к.о})$, где $R_я$, $R_{д.п}$, $R_{к.о}$ — соответственно сопротивление якоря, обмотки дополнительных полюсов и компенсационной обмотки; сопротивление обмотки возбуждения в горячем состоянии $r_{в.г}$; характеристика холостого хода $E_г = f(I_{в.г})$;

*для возбудителя* — напряжение; токи и число витков обмоток возбуждения (управления); характеристический треугольник в функции тока нагрузки $I_{в.г}$; падение напряжения

$$\Delta U = \left(\frac{I_{в.г}R_{я.в} + 2}{I_{в.г}}\right) I_{в.г} = k_1 I_{в.г};$$

размагничивающая МДС реакции якоря, приведенная к МДС возбуждения,

$$F_{р.я} = 0{,}07\,\frac{I_{в.г}w_я}{2a2p} = k_2 I_{в.г};$$

характеристика намагничивания $E_в = f(F)$;

*для гребного электродвигателя* — параметры, характеризующие работу ГЭД в швартовном режиме ($M_ш$, $n_ш$), при ходе в свободной воде ($M_{св}$, $n_{св}$), стоянке под током ($M_{ст}$, $n_{ст}$); внешняя характеристика генератора $U_г = f(I)$ при постоянной частоте вращения $n_г = \text{const}$, внешняя характеристика ГЭД, работающего генератором, $U_{дв} = f(I)$ при частоте вращения, соответствующей холостому ходу ГЭД, и сопротивление внешней цепи.

**Внешняя характеристика трехобмоточного возбудителя.** Для построения внешней характеристики необходимо воспользоваться данными расчета возбудителя по мощности и напряжению (см. § 4.1.5), затем по двум режимам работы ГЭД найти МДС независимой обмотки и коэффициент пропорциональности МДС обмотки самовозбуждения току главной цепи.

Ход построения показан на рис. 4.2.6, где кривая *Ок* — характеристика холостого хода, а *ОС* — нагрузочная характеристика, построенная с учетом работы возбудителя на постоянное сопротивление обмотки возбуждения генератора. Нагрузочная характеристика строится по характеристике холостого хода с помощью реактивного треугольника *abc* для ряда значений напряжения возбудителя [21, 51].

Результирующая МДС, создаваемая обмотками главных полюсов, равна алгебраической сумме МДС трех обмоток возбуждения: $F = F_{о.н} + F_{о.с.в} + F_{о.т}$, где $F_{о.н}$, $F_{о.с.в}$, $F_{о.т}$ — соответственно МДС обмоток независимого возбуждения, самовозбуждения и отрицательной обратной связи по току генератора.

МДС обмотки самовозбуждения пропорциональна напряжению возбудителя

$$F_{о.с.в} = I_{о.с.в}w_{о.с.в} = \frac{U_в}{r_{о.с.в}}w_{о.с.в}.$$

Зависимость МДС обмотки самовозбуждения от напряжения возбудителя на рис. 4.2.6 представлена прямой *Oq*.



При наличии тока в независимой обмотке, создающего МДС $F_{о.н}$, в режиме холостого хода возбудителя МДС $F_{о.с.в}$ равна отрезку $fk$, если пренебречь реакцией якоря и падением напряжения в якоре возбудителя от тока самовозбуждения.

При холостом ходе генератора напряжение возбудителя равно $U_{в.о}$, а $F_{о.с.в}$ — отрезку $ec$. Результирующая МДС возбудителя

$$F = Oq = F_{о.н} + F_{о.с.в} = Od + dq = Od + ec.$$

Когда главная цепь замкнута и в ней имеется ток нагрузки, напряжение возбудителя снижается вследствие встречно направленной МДС обмотки самовозбуждения (ОСВВГ). Некоторому току $I_i$ соответствует напряжение возбудителя $U_{вi}$ и результирующая МДС $F_i$, равная $F_i = F_{о.н} + F_{о.с.в} - F_{о.т.i}$ или $F_i = Oh = Od + e_id_i - d_ic_i$. Отрезки $c_1d_1 \ldots c_id_i$ равны МДС обмотки ОСВВГ и пропорциональны току главной цепи. Откладывая по горизонтальной оси влево

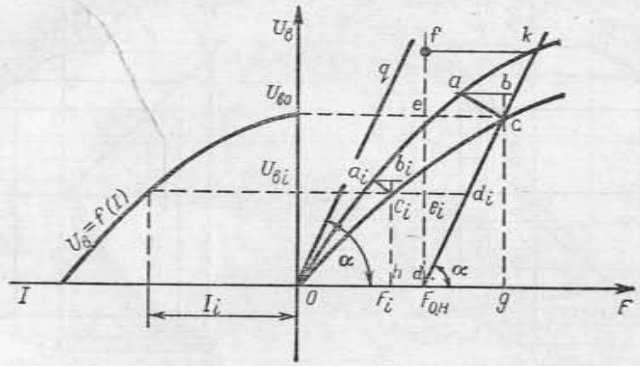



Рис. 4.2.6. Построение нагрузочной характеристики $U_в = f(F)$ и внешней характеристики $U = f(I)$ трехобмоточного возбудителя для ГЭУ.

от нуля значения тока $I$, пропорциональные отрезкам $c_id_i$, получим в левом квадранте кривую зависимости напряжения возбуждения от тока главной цепи $U_в = f(I)$.

Крутизна внешней характеристики трехобмоточного возбудителя зависит от наклона линии $cd$ (рис. 4.2.6), т. е. от падения напряжения в цепи обмотки параллельного возбуждения. Изменяя угол $\alpha$ — соотношение между $F_{о.н}$ и $F_{о.с.в}$, можно получить различные внешние характеристики.

Тангенс угла наклона $\alpha$ характеристики (см. рис. 4.2.6) равен

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{U_в m_F}{F_{о.с.в}m_U} = \frac{U_в m_F}{w_{о.с.в}I_{о.с.в}m_U} = \frac{U_в r_{о.с.в}m_F}{w_{о.с.в}U_в m_U} = \frac{r_{о.с.в}m_F}{w_{о.с.в}m_U},$$

где $U_в$ и $F_{о.с.в}$ берутся по графику (см. рис. 4.2.6) в вольтах и амперах; $m_F$ и $m_U$ — масштабы МДС и напряжения.

Значения МДС обмоток при заданной крутизне характеристики возбудителя, определяемой углом $\alpha$ или $\operatorname{tg}\alpha$, находятся для заданных режимов, например $A$ и $B$, по уравнениям:

$$F_A = F_{о.н} + \frac{m_F U_{вA}}{m_U \operatorname{tg}\alpha} - I_A k w_{о.т};$$

$$F_B = F_{о.н} + \frac{m_F U_{вB}}{m_U \operatorname{tg}\alpha} - I_B k w_{о.т}.$$

**Внешняя характеристика тиристорного возбудителя.** Если тиристоры имеют вертикальное управление (см. § 4.1.5), то угол открывания тиристора $\alpha$ пропор

ционален сигналу управления. Справедливо отношение $\alpha = kU_y$. Так как возбудитель включен на постоянное сопротивление обмотки возбуждения генератора, расчетной характеристикой для него является зависимость $U_d = f(\alpha)$.

Напряжение $U_d$, а следовательно, и напряжение возбуждения $U_в$ связано с углом $\alpha$ зависимостью [21, 51]

$$U_в = U_d = \frac{3}{\pi} U_{d\,max} \frac{\cos\alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2},$$

из которой можно получить зависимость между $U_в = U_d$ и $U_y$ и представить ее графически (рис. 4.2.7).

**Внешняя характеристика генератора.** На рис. 4.2.8 показано построение внешней характеристики генератора по характеристике возбудителя, например

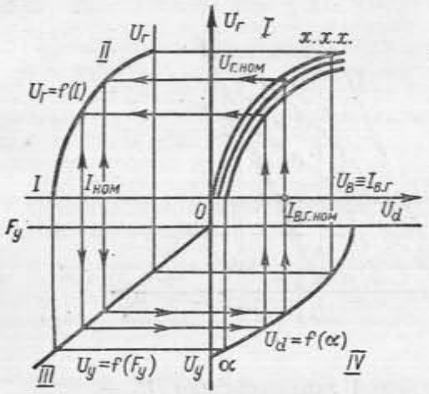



Рис. 4.2.7. Построение внешней характеристики генератора с тиристорным возбудителем.

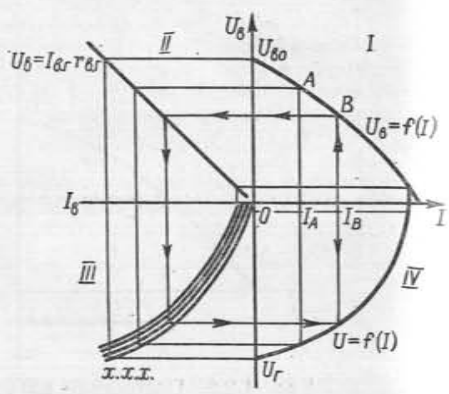



Рис. 4.2.8. Построение внешней характеристики генератора с трехобмоточным возбудителем.

трехобмоточного (см. рис. 4.2.6). В первом (*I*) квадранте нанесена характеристика $U_в = f(I)$, во втором (*II*) — прямая напряжения $U_в = I_{в.г} r_{в.г}$, в третьем (III) — характеристика холостого хода и нагрузочные характеристики генератора; в четвертом (*IV*) — на пересечении направлений построения, показанных стрелками, получается внешняя характеристика генератора с обратной связью по току на возбудителе $U = f(I)$. Крутопадающая характеристика генератора имеет место при любом возбудителе с постоянно действующей отрицательной связью по току главной цепи, ограничивающей напряжение возбуждения.

Для получения требуемой внешней характеристики генератора с гиперболической частью в диапазоне от $I_A$ до $I_B$ может применяться обратная отрицательная связь по мощности.

**Внешняя характеристика генератора с учетом изменения частоты вращения дизеля.** При крутопадающей внешней характеристике генератора дизель развивает номинальную мощность только в двух режимах: при полном ходе в свободной воде и в режиме, определяемом буксировочной или другой характеристикой винта. Они получаются как точки пересечения гиперболы постоянной мощности $U_г = \text{const}$ (кривая *1*) с внешней характеристикой $U_г = f(I)$ (кривая *2*) на рис. 4.2.9. Штриховая прямая, соединяющая точки $A_1$ и $B_1$ представляет собой постоянную мощность генератора или дизеля, имеющего внешнюю характеристику в виде желаемой гиперболы. Для тока $I_D$ мощность генератора при постоянной частоте вращения определяется точкой $C_1$, лежащей на характеристике $P_г = f(I)$ (кривая *3*), и превышает мощность дизеля на величину $C_1D$. Вследствие перегрузки дизель снижает частоту вращения до тех пор, пока его мощность и мощность генератора с учетом потерь не сравняются.



С уменьшением частоты вращения снижается и напряжение генератора. Мощность генератора с учетом уменьшения частоты вращения, вызванного перегрузкой дизеля, показана кривой $A_1D_1B_1$. Кривая напряжения *ABF* в этом случае лежит ниже гиперболы постоянной мощности *AB* вследствие уменьшения ЭДС генератора пропорционально частоте вращения при одних и тех же токах нагрузки. Во избежание перегрузки и снижения частоты вращения дизель выбирается приблизительно с 10%-ным запасом по мощности.

Перегрузка дизеля имеет место и при быстрых периодических изменениях момента сопротивления гребного винта (при ходе на волне момент сопротивления может изменяться на ±40%). Для того чтобы напряжение генератора во всех режимах соответствовало току нагрузки и мощность сохранялась постоянной, необходимо применять быстродействующие системы регулирования с высокими коэффициентами усиления.

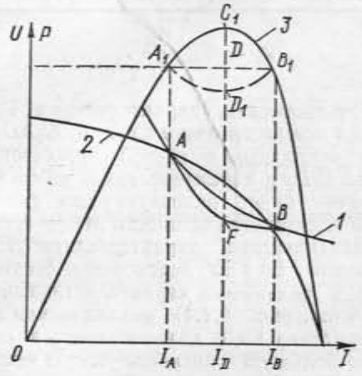



Рис. 4.2.9. Изменение внешней характеристики генератора с понижением частоты вращения.

**Механические характеристики ГЭД.** При любом значении тока главной

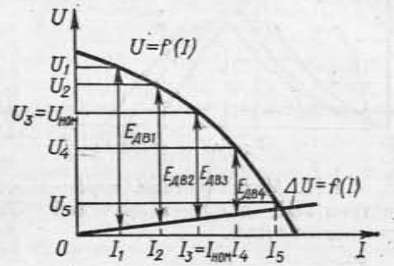



Рис. 4.2.10. Графическое определение ЭДС ГЭД для крутопадающей характеристики генератора.

цепи *I* противо-ЭДС ГЭД может быть получена вычитанием из напряжения генератора падения напряжения в цепи якоря ГЭД и во внешней цепи $\Delta U = f(I)$. Такое построение приведено для последовательности токов $I_1$, $I_2$, $I_3$, $I_4$, $I_5$ на рис. 4.2.10. При $\Phi = \text{const}$, $M_{дв} = c_M I \Phi$ и $E_{дв} = c_E \Phi n$ зависимость $E_{дв} = f(I)$ может рассматриваться как механическая характеристика ГЭД.

Принимая магнитный поток ГЭД постоянным, определяют момент и частоту вращения его по формулам

$$M = \frac{pN}{a \cdot 2\pi} \Phi I; \quad n = \frac{E \cdot 60a}{pN\Phi}$$

или по номинальным данным при $\Phi = \text{const}$

$$M = M_{ном} \frac{I}{I_{ном}}; \quad n = n_{ном} \frac{E}{E_{ном}}.$$

**Механические характеристики ГЭД при регулируемом потоке.** Для построения характеристики ГЭД при другом магнитном потоке используют ту же характеристику $E_{дв} = f(I)$ и по значениям $I$, $E_{дв\,i}$ и приведенным выше формулам определяют момент и частоту вращения.

На рис. 4.2.11 построены механические характеристики ГЭД *DBC* и $D_1AC_1$ при магнитных потоках $\Phi_B$ и $\Phi_A$. Точки *A* и *B* этих характеристик получены при номинальных значениях тока и напряжения внешней характеристики генератора, показанной на рис. 4.2.10. Чтобы ток главной цепи был номинальным в ре-

жимах $A$ и $B$, требуется одно и то же соотношение падений напряжений: $U_{ном} = E_{дв.ном} + I_{ном}R_я$ и $E_{дв} = c_e n_B \Phi_B = E_{дв\,A} = c_e n_A \Phi_A$, откуда

$$\Phi_A = \Phi_B = \frac{n_B}{n_A}.$$

Характеристика гребного винта может принять любое промежуточное значение $i$ между характеристиками швартовной *2* и хода в свободной воде *1*. В этом случае магнитный поток ГЭД устанавливается таким, чтобы сохранялось равенство падений напряжений, а соотношение потоков определялось зависимостью

$$\Phi_i = \Phi_B \frac{n_B}{n_i}.$$

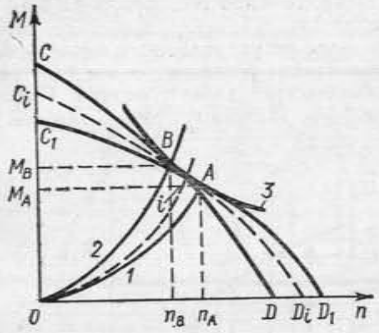



Рис. 4.2.11. Механические характеристики ГЭД для трех значений магнитного потока.

Механическая характеристика ГЭД пройдет между кривыми $CBD$ и $C_1AD_1$ и будет совпадать с точкой пересечения кривой $C_iD_i$ и характеристикой винта $Oi$. Эта точка будет находиться на гиперболе *3* постоянства мощности $Mn = \text{const}$.

**Механические характеристики ГЭД ледоколов.** В ГЭУ ледоколов в соответствии с заданными характеристиками *1*, *2*, *7*, *8* (см. рис. 4.1.1) механическая характеристика ГЭД должна иметь значительно большую гиперболическую часть: от хода в свободной воде до характеристики взаимодействия винта со льдом (кривая $ABE$ на рис. 4.2.12, *а*). Получить ее увеличением магнитного потока ГЭД трудно, так как пришлось бы выбирать ГЭД по наибольшему моменту сопротивления в точке $E$, что привело бы к значительному увеличению его размера и массы.

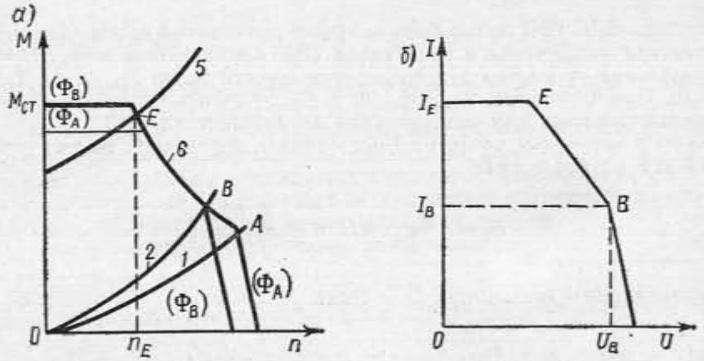



Рис. 4.2.12. Характеристики ГЭД ледокола: *а* — механическая характеристика ГЭД; *б* — внешняя характеристика генератора.

При частоте вращения винта $n_E$ происходит резание льда лопастями винта. Этот кратковременный режим часто повторяется в ледовых условиях и чередуется через промежутки времени, определяемые частотой вращения $n_E$ и числом лопастей гребного винта, но его продолжительность измеряется долями минуты. Поэтому ГЭД выбирают по режиму $B$, с магнитным потоком $\Phi_B$, снижая его в режиме $A$ до значения $\Phi_A$, а генератор — с некоторым запасом по мощности. Внешняя характеристика генератора должна иметь гиперболическую часть между точками $B$ и $E$. В режиме $B$ ток генератора и ГЭД номинальные, а в режиме $E$ — $I_E = M_E/M_B$.

За режимом $E$ следует ограничение тока стоянки. Кривая внешней характеристики генератора ледокола, требуемая для получения механической характеристики ГЭД, показана на рис. 4.2.12, *б*.

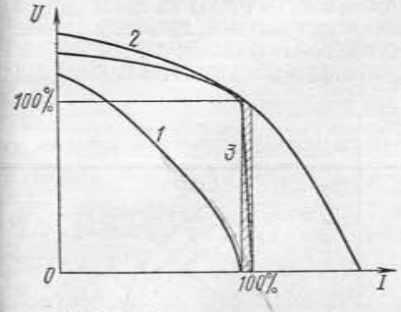



Рис. 4.2.13. Внешние характеристики генератора ГЭУ неизменного тока в управляемой системе при остановке одного ГЭД (*1*), при полной нагрузке (*2*) и в регулируемой системе (*3*).

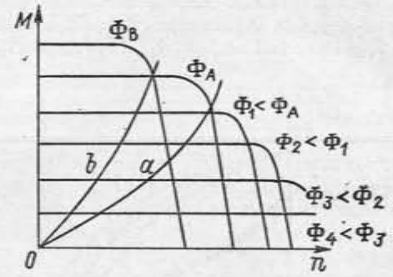



Рис. 4.2.14. Механические характеристики ГЭД при различных магнитных потоках в ГЭУ, работающей при неизменном токе.

*а* — характеристика винта при ходе в свободной воде; *b* — швартовная характеристика винта.

Регулирование тока в пределах $I_B \leqslant I \leqslant I_E$ должно происходить автоматически воздействием на систему возбуждения генератора.

**Механические характеристики ГЭД в системе неизменного тока.** В ГЭУ неизменного тока генераторы имеют внешние характеристики, показанные на

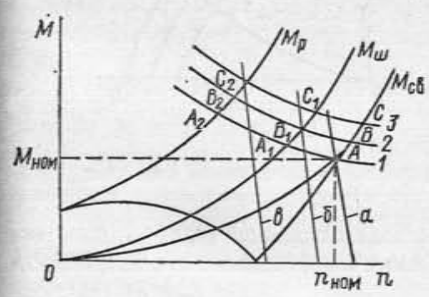



Рис. 4.2.15. Выбор механических характеристик ГЭД по перегрузочным режимам ГЭУ в обычной схеме Г—Д.

*1* — $P_{ном} = 1{,}0$; *2* — $P_{ном} = 1{,}1$; *3* — $P_{ном} = 1{,}2$.

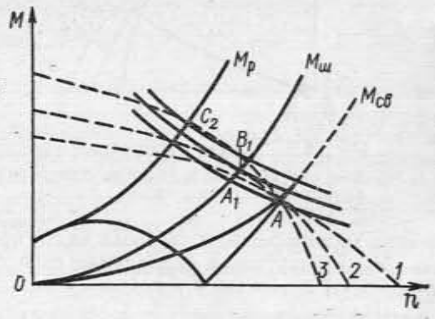



Рис. 4.2.16. Выбор механических характеристик ГЭД по перегрузочным режимам ГЭУ применительно к схеме с ограничением тока главной цепи.

рис. 4.2.13. Генератор работает только на вертикальной части характеристик. Когда $I = \text{const}$ во всех режимах, момент и частота вращения ГЭД пропорциональны магнитному потоку: $M_{дв} = c_M I \Phi = \lambda \Phi$, а так как $M_{дв} = M_B = k_B n_B^2$, то

$$n_B = \left(\frac{\lambda}{k_B}\Phi\right)^{\frac{1}{2}} = (\lambda, \Phi)^{\frac{1}{2}}.$$

Если $\Phi = 0$, то ГЭД неподвижен, хотя ток номинальный. С увеличением магнитного потока растут момент и частота вращения ГЭД.

Задаваясь различными значениями магнитного потока ГЭД, можно построить семейство механических характеристик, соответствующих одной внешней характеристике генератора. На рис. 4.2.14 изображены механические характеристики ГЭД при различных значениях магнитного потока $\Phi_A$, $\Phi_B$, $\Phi_1$, $\Phi_2$ и др.

**Механические характеристики ГЭД для перегрузочных режимов.** Выбор механических характеристик ГЭД с прямолинейной характеристикой (прямые *а*, *б*, *в*) показан на рис. 4.2.15, где изображены предельные статические и динами-

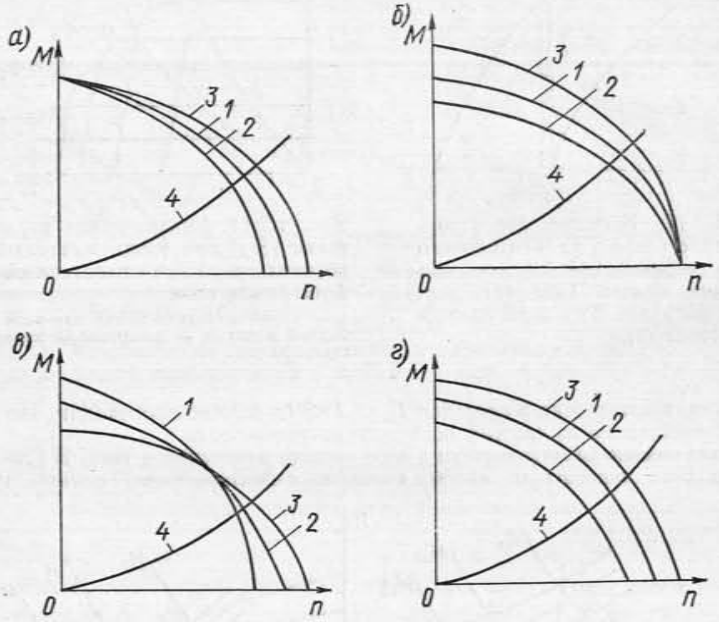



Рис. 4.2.17. Регулировочные характеристики ГЭД.

*1* — при средней МДС; *2* — при малой МДС; *3* — при большой МДС; *4* — характеристика винта.

ческие характеристики гребного винта при ходе в свободной воде $M_{св}$, швартовная $M_ш$ и реверсивная $M_р$, а также гипербола постоянной мощности на валу ГЭД $Mn = 975P_{ном} = \text{const}$.

Наложение механических характеристик ГЭД дает мощность $P_{ном} = \text{const}$ для номинального длительного режима (точка $A$), для швартовного режима с 10%-ной перегрузкой в течение часа (точка $B_1$) и для режима реверса с 20%-ной перегрузкой кратковременно (точка $C_2$). Точки $A_1$, $B_1$, $C_1$ определяют пределы автоматического регулирования мощности ГЭД при изменении режимов работы установки.

Выбор механических характеристик для ГЭД с «экскаваторной» характеристикой (кривые *1*, *2*, *3*) показан на рис. 4.2.16. В зависимости от требований, предъявляемых к ГЭУ, условий плавания, типа судна и т. д. точки, определяющие механические характеристики ГЭД, выбираются различно. Практически возможны три варианта: первый — по точкам $A$ и $A_1$, второй — по $A$ и $B_1$, третий — по $A$ и $C_2$.

**Регулировочные характеристики ГЭД.** На форму механической характеристики ГЭД можно воздействовать следующими способами: а) изменением сопротивления цепи возбуждения генератора; б) изменением МДС ОСВВГ при постоянном



токе в главной цепи ГЭУ; в) изменением возбуждения ГЭД; г) изменением тока в независимой обмотке возбуждения возбудителя генератора. Преобразование механических характеристик указанными способами показано на рис. 4.2.17, *а*, *б*, *в*, *г* соответственно. Для целей регулирования преимущественно используется последний способ, тогда как первые три используются для подрегулирования частоты вращения ГЭД с целью уточнения его механической характеристики, так как винт всегда имеет допуски на частоту вращения в пределах ±5% номинальной и ГЭД — в пределах ±2,5%. В системах неизменного тока для целей регулирования используются последние два способа.

## § 4.2.3. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Переходные процессы, возникающие в ГЭУ, рассчитываются для определения времени разгона, торможения и реверса ГЭД и судна, определения максимального тока главной цепи и превышения частоты вращения теплового двигателя при реверсах и снижениях частоты вращения гребного винта.

В задачу расчета входит определение таких значений параметров системы, при которых ток главной цепи и частота вращения теплового двигателя не превысят допустимых пределов.

**Методы расчета переходных процессов.** Расчет переходных процессов в ГЭУ постоянного тока выполняется следующими методами: 1) методом последовательных приближений (конечных приращений); 2) графическими и графоаналитическими методами; 3) операторным методом для линеаризованной системы; 4) методом вещественных частотных характеристик; 5) методом математического моделирования с помощью АВМ; 6) методом расчета на ЦВМ.

Поведение простейшей ГЭУ постоянного тока с некоторыми допущениями описывается системой дифференциальных уравнений четвертого порядка с нелинейными коэффициентами. Эти уравнения могут быть решены аналитическими и графическими методами.

Применение быстродействующих возбудителей, а также уточнение физических процессов, происходящих в электрических машинах, повышают порядок системы уравнений и делают исследование аналитическими или графическими методами малоудобным. Поэтому сложные системы ГЭУ исследуются на АВМ и ЦВМ.

При исследовании ГЭУ и расчете переходных процессов широкое распространение получил разработанный В. Т. Касьяновым *метод последовательных приближений*. Несмотря на громоздкость и значительную трудоемкость расчетов этим методом, делающим его применение целесообразным для систем дифференциальных уравнений не выше четвертого порядка, он обладает такими достоинствами, как простота и возможность учета всех условий работы гребного электропривода. Численный пример расчета указанным методом дан в [40, 67].

*Графические и графоаналитические методы* расчета переходных процессов в ГЭУ позволяют находить приближенное решение нелинейных дифференциальных уравнений. В практике расчетов и анализа переходных процессов ГЭУ нашел распространение метод А. В. Башарина, который состоит в графическом решении уравнений в конечных разностях и базируется на использовании формулы трапеции [40, 67]. Для этого метода характерны следующие особенности: 1) наглядное отражение физической структуры системы и объекта регулирования; 2) возможность построения переходного процесса с учетом возмущения любого характера, действующего на то или иное звено системы; 3) возможность через основные геометрические соотношения графического построения выявить влияние тех или иных параметров на характер протекания переходного процесса; 4) достаточная для технических расчетов точность. Подробный пример расчета указанным методом приведен в [21, 40, 67].

Переходные процессы в ГЭУ могут быть исследованы *методами операционного исчисления* (*операторными*). Если эти процессы при известных допущениях могут быть описаны системой линейных дифференциальных уравнений, то решение данной системы, т. е. нахождение интегральных кривых в функции времени, может быть сведено к простым математическим действиям прямого и обратного

преобразования Лапласа [40, 67]. Численный пример расчета указанным методом дан в [67].

*Частотный метод* расчета переходных процессов, разработанный В. В. Солодовниковым применительно к исследованию широкого круга задач автоматического регулирования, позволяет несложным путем дать оценку переходного процесса и определить все качественные показатели, характеризующие ГЭУ. Оценка переходного процесса базируется на использовании вещественной части амплитудно-фазовой характеристики $\Phi(j\omega)$ замкнутой системы, полностью определяющей все динамические свойства системы при гармоническом внешнем воздействии со стороны нагрузки или задающего элемента.

Поскольку частотный метод применим к линейным системам дифференциальных уравнений, то в практике расчетов необходимо использовать приемы линейной аппроксимации отдельных нелинейных функций, например, разбиение характеристики гребного винта $m_в = f(n)$ на линейные участки вида $m_в = -m_{в0} + \kappa_л n$, спрямление характеристики намагничивания генераторов и возбудителей и т. д. Пример расчета переходных процессов ГЭУ постоянного тока данным методом приведен в [67].

К методам расчета переходных процессов на АВМ относится метод математического моделирования, весьма широко применяемый при исследовании динамики ГЭУ. Этот метод основан на идентичности дифференциальных уравнений, описывающих явления, происходящие в модели и прототипе.

Общий подход к составлению уравнений генераторов, двигателей и уравнений связи между ними в форме, удобной для решения на АВМ или ЦВМ, преобразование этих уравнений к машинному виду и решение их изложены в [40, 67]. Зависимости $M_в = f(n_в, v)$, представляемые в виде параболического полинома (см. § 4.1.2), могут быть записаны двумя уравнениями, в которых коэффициенты $a_1$, $b_1$, $c_1$ подставляются при $n_в \geqslant 0{,}3v$, а $a_1'$, $b_1'$, $c_1'$ — при $n_в < 0{,}3v$.

## § 4.2.4. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ И ЗАЩИТА

К задачам автоматического регулирования ГЭУ относятся: 1) поддержание постоянства мощности электрической установки судна при переменных значениях момента сопротивления на винте во всех возможных режимах работы; 2) ограничение перегрузки первичных двигателей в динамических режимах (при быстрой перекладке поста управления в режимах реверса, пуска и т. д.); 3) ограничение тока стоянки ГЭД и защита дизелей от перегрузки при заклинивании гребного винта.

**Автоматическое регулирование в системе Г—Д с ограничением тока главной цепи.** Для поддержания приблизительно постоянной мощности, т. е защиты первичных двигателей от перегрузки, используется в основном жесткая отрицательная обратная связь по току главной цепи, воздействующая на вход системы возбуждения генераторов и позволяющая получать крутопадающие «экскаваторные» вольт-амперные характеристики генераторов (см. § 4.2.2). В таких системах обычно используются трехобмоточные возбудители.

На рис. 4.2.18 приведены рабочие характеристики подобной системы. Точка *1* соответствует режиму свободного хода при полной скорости, точка *2* — швартовному режиму. Характеристика привода *д* по сравнению с характеристиками винта *а*, *б* в диапазонах ниже номинальной частоты вращения показывает большой избыток вращающего момента привода, который необходим для ускорения винта и присоединенных масс воды. Точки *3* и *4* пересечения характеристик при частичной *е* или полной *д* мощности привода с реверсивной кривой винта *г* или *в* соответствуют режимам работы после сравнительно быстрого реверса винта при условии, что судно продолжает двигаться полным ходом вперед. Они показывают, что вращение в новом направлении первоначально сдерживается вращающимся по инерции гребным винтом. По мере уменьшения скорости судна в прежнем направлении точки *3* и *4* переходят в рабочие точки *5* и *6*. Остановке судна соответствуют точки *7* и *8*. Вследствие повышения частоты вращения винта полностью проявляется тормозящее действие привода. Поскольку система обеспечивает достаточно быстрый переход от частоты вращения при моменте, равном нулю на переднем ходу, до нулевой частоты вращения, то на первичные двигатели воздействует незначительная энергия рекуперации, не оказывающая заметного влияния даже на высокооборотные дизели.



На рис. 4.2.18, *б* приведены характеристики мощности подобных систем. Превышение мощности в точке *2* незначительное и не вызывает заметных перегрузок в системе, особенно при нешироком растворе винтовых характеристик. Приблизительное поддержание постоянства мощности достигается автоматически. Применение навешенных возбудителей также обеспечивает до некоторой степени защиту от перегрузки первичных двигателей.

В последнее время в таких системах стали применяться статические элементы регулирования, выполненные на управляемых вентилях. Точность регулирования в такой системе значительно выше, чем в схемах с трехобмоточными возбудителями, и обеспечивает практически постоянство мощности во всех рабочих диапазонах винтовых характеристик.

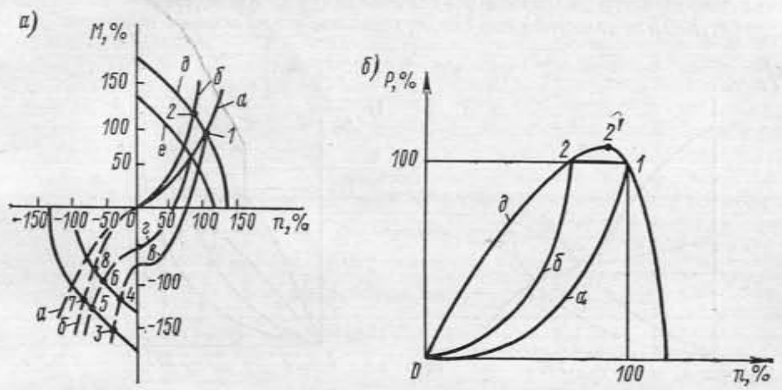



Рис. 4.2.18. Рабочие характеристики системы с ограничением тока: *а* — в координатах момент—частота вращения; *б* — в координатах мощность—частота вращения.

Подробное описание схем электродвижения с трехобмоточными возбудителями дано в [21], с тиристорным возбудителем — в [21, 40].

**Автоматическое регулирование в системах постоянства мощности.** Для ледоколов, в особенности с большими и мощными гребными винтами, необходим более широкий диапазон обеспечения постоянства мощности, чем достигаемый только с помощью соответствующего подбора характеристик электрических машин (см. § 4.2.2), так как гребные винты работают в окружении воды и льда и судно должно постоянно подниматься на ледяной покров. Поэтому для них применяются схемы, обеспечивающие высокую степень поддержания постоянства мощности, а также повышенный момент стоянки и эффективную защиту от ударных нагрузок.

В таких схемах предусматривается одновременно регулирование магнитных потоков генератора и двигателя, причем реверс может осуществляться как по цепи возбуждения генератора, так и по цепи возбуждения ГЭД. Последнее предпочтительно с точки зрения уменьшения энергии рекуперации, по ограничению которой принимаются строгие меры. Для этой цели используются различные способы ограничения величины обратного тока: регулирование возбуждения ГЭД, снижение частоты вращения первичных двигателей при реверсе, а также уменьшение махового момента ГЭД (двухъякорное исполнение или последовательное включение двигателей).

При регулировании магнитного потока ГЭД осуществляется плавное бесступенчатое смещение характеристик мощности (рис. 4.2.19). Огибающая этого семейства (кривая *1*) представляет собой результирующую характеристику мощ-

ности с учетом регулирования возбуждения ГЭД, благодаря чему может быть обеспечен значительный по величине момент стоянки без соответствующего увеличения тока главной цепи. Однако при этом существенно увеличиваются масса и габариты ГЭД, поэтому в ряде случаев повышенный момент стоянки стремятся обеспечить при нормальном магнитном потоке ГЭД.

Автоматическое регулирование ГЭД осуществляется с помощью специальных регуляторов тока, использующих ЭМУ и статические элементы автоматики — полупроводниковые и магнитные усилители.

**Автоматическое регулирование в системах неизменного тока.** По способам регулирования такие системы разделяются на управляемые и регулируемые.

В *управляемых системах* потоки генераторов и исполнительных двигателей регулируются одновременно и изменяются таким образом, чтобы в статических рабочих точках всего диапазона регулирования частоты вращения исполнительных двигателей ток главной цепи поддерживался неизменным и примерно равным

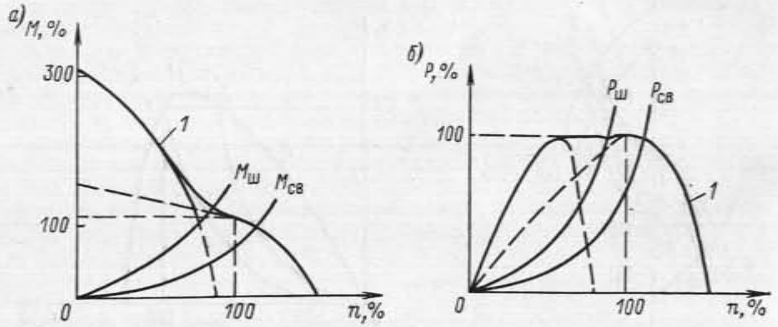



Рис. 4.2.19. Характеристики системы постоянства мощности: *а* — в координатах момент—частота вращения; *б* — в координатах мощность—частота вращения.

номинальному значению (см. рис. 4.2.13, кривые *1*, *2*). Управление производится перемещением рукоятки поста управления, причем каждому ее положению соответствует постоянное и вполне определенное значение потоков возбуждения генераторов и двигателей. Никаких особых требований к внешним характеристикам генераторов, отличных от обычных систем Г—Д с жесткой отрицательной обратной связью по току, а также к системам регулирования по быстродействию и коэффициентам усиления в этих системах не предъявляется.

Управляемые системы применяются обычно в установках с малым количеством идентичных машин в одном контуре и там, где не требуется обеспечение большой точности поддержания постоянства величины тока главной цепи. В таких системах применяются трехобмоточные генераторы и возбудители.

В *регулируемых системах* постоянство величины тока главной цепи обеспечивается независимо от регулирования исполнительного двигателя отдельным самостоятельно действующим регулятором. Напряжение генератора при этом изменяется в зависимости от потребляемой исполнительным электродвигателем мощности.

Одним из основных требований для таких систем является требование по быстродействию системы регулирования, определяющей степень точности поддержания неизменного значения тока главной цепи. Параметры возбудителя рассчитываются таким образом, чтобы получить внешнюю характеристику генератора крутопадающей при $I = I_{ном}$, причем значительно более крутой, чем в управляемых системах (см. рис. 4.2.13, кривая *3*). Это обстоятельство увеличивает возможность появления колебаний тока главной цепи в переходных режимах, что вынуждает принимать специальные меры по его стабилизации. Зато в этих системах совершенно исключается перегрузка генераторов при внезапном увеличении или



снятии нагрузки на одном из исполнительных двигателей, когда другие работают в номинальном режиме. Защита от перегрузок воздействует на ослабление тока возбуждения в исполнительном двигателе.

Регулируемые системы применяются при большом числе генераторов и исполнительных двигателей различного назначения, объединенных в общий контур.

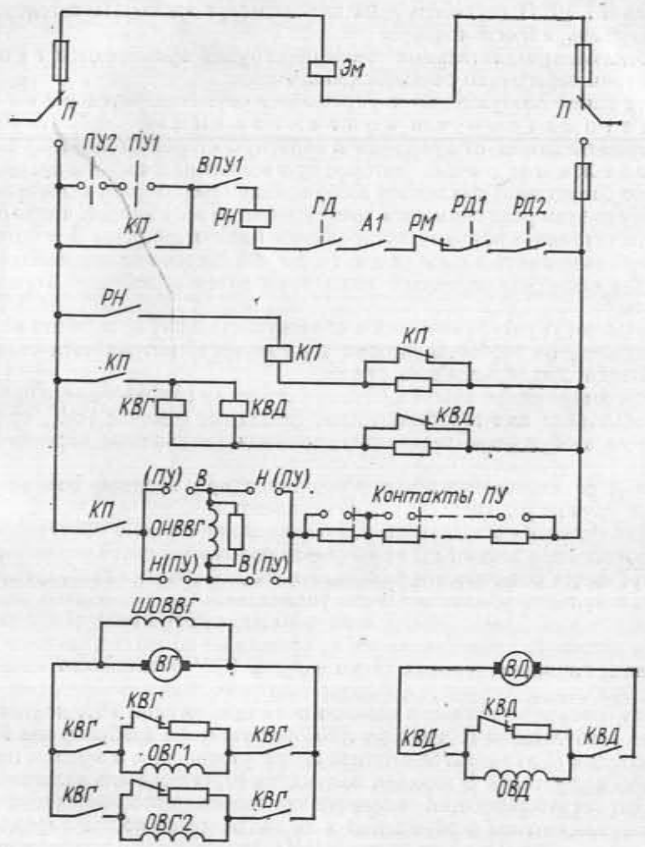



Рис. 4.2.20. Принципиальная схема защиты ГЭУ постоянного тока.

*ВГ* — возбудитель генератора; *ВД* — возбудитель ГЭД; *ОВГ1*, *ОВГ2* — обмотки возбуждения генераторов; *ОВД* — обмотка возбуждения ГЭД; *ШОВВГ* — обмотка параллельного возбуждения возбудителя генератора (шунтовая), *ОНВВГ* — обмотка независимого возбуждения возбудителя генератора.

В таких системах применяются быстродействующие электромашинные, магнитные и полупроводниковые усилители.

Защита ГЭУ постоянного тока представляет комплекс устройств, выполняющих отключения генераторов, ГЭД, отдельных аппаратов и оповещающих обслуживающий персонал об аварийных и ненормальных режимах установки, к которым могут быть отнесены: 1) короткое замыкание в цепях главного тока, возбуждения и управления; 2) самовозбуждение генераторов в нулевом положении поста

управления; 3) вращение ГЭД в нулевом положении поста управления; 4) прекращение подачи топлива одного из дизелей при последовательном соединении генераторов; 5) разгон ГЭД вследствие возможного уменьшения момента сопротивления при ходе на волне.

Для защиты от коротких замыканий в главной цепи устанавливаются максимальные реле, отключающие контакторы возбуждения генераторов и ГЭД. При коротком замыкании одного генератора снимается возбуждение у всех генераторов и ГЭД. В двухконтурных схемах могут отключаться только обмотки возбуждения аварийного контура.

Для отключения длительных токов перегрузки применяются тепловые реле на токи перегрузки с выдержкой времени.

Защита цепей возбуждения и управления осуществляется установочными автоматами или контакторами.

Для защиты дизеля от вращения в обратную сторону генератор снабжается центробежным реле, которое при понижении частоты вращения ниже минимально допустимой выключает возбуждение генератора и включает сигнализацию. Иногда этим реле снимается возбуждение со всех машин, чтобы отключить генератор и устранить причину прекращения подачи топлива. В некоторых ГЭУ роль защиты выполняет реле давления в системе охлаждающей воды дизеля, так как насос охлаждающей воды приводится в действие от коленчатого вала дизеля.

Турбины могут раскручиваться в обратную сторону, и, хотя это не вызывает их повреждения, на турбогенераторах должна предусматриваться сигнализация на случай такого ненормального режима.

Для предотвращения разгона ГЭД при оголении гребного винта применяются центробежные реле или тахогенераторы, связанные с валом ГЭД, которые воздействуют на возбуждение генератора, вызывая уменьшение частоты вращения ГЭД.

Защитой от самовозбуждения генераторов при нулевом положении поста управления служит реле перегрузки с сигнализацией.

Для уничтожения остаточного намагничивания с целью предотвращения самопроизвольного вращения ГЭД при нулевом положении поста управления иногда предусматривается подключение размагничивающей обмотки возбудителя к якорю генератора в нулевом положении поста управления. Однако обычно этого не требуется, так как при правильном положении щеток ГЭД и генератора момент вращения от остаточного намагничивания не превышает момента холостого хода.

Примерная принципиальная схема защиты ГЭУ постоянного тока показана на рис. 4.2.20.

Защита осуществляется при помощи реле напряжения *РН*, контактора *КП*, контактора возбуждения генератора *КВГ* и контактора возбуждения ГЭД *КВД*. Переключателем *П* включается питание цепей управления и защиты (нижнее положение переключателя). В верхнем положении переключатель включает электромагнит *Эм*, освобождающий блокировку селекторного переключателя (см. § 4.1.6), переключателей возбуждения и переключателей постов управления.

Пост управления *ПУ* имеет контакт *ПУ1*, который размыкается при повороте рукоятки управления. Контакт *ПУ2* связан с рукояткой второго поста управления Контакт *ВПУ1* включается вручную перед началом управления. В цепь реле напряжения включены контакты *А1* — селекторного переключателя генератора, контакты *ГД* — готовности дизеля (которые включаются механиком-дизелистом), контакты максимального реле *РМ*, реле давления *РД1* охлаждающей воды дизелей, контакты реле давления *РД2* в системе смазки подшипников генераторов и ГЭД и все другие виды защиты, действующей на отключение гребной установки.

Замыкание сети или цепи якоря на корпус в одной точке не приводит к аварии, поэтому специальной защиты от такого замыкания не имеется. Предусматривается только измерение сопротивления изоляции.



# Глава 4.3. ГЭУ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

## § 4.3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

**Особенности установок переменного тока.** ГЭУ переменного тока применяются в тех случаях, когда нет необходимости в частых изменениях режима плавания, сопровождающихся пусками и реверсами ГЭД. ГЭУ переменного тока подразделяются по принципу построения на автономные и объединенные, а по типу первичных двигателей — на дизель-электрические и турбоэлектрические.

*Турбоэлектрические гребные установки* применяются в основном как автономные при больших мощностях (более 10 000 кВт).

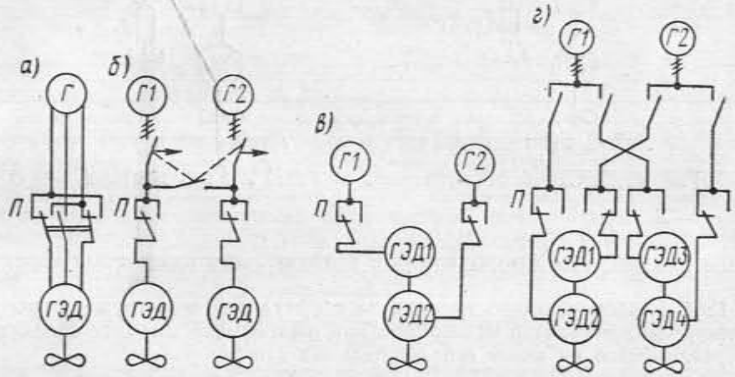



Рис. 4.3.1. Схемы цепи главного тока ТЭГУ.

При проектировании ТЭГУ всю мощность, необходимую для движения судна, делят на наименьшее число агрегатов. Поэтому в ТЭГУ обычно число турбогенераторов равно числу гребных валов.

Схемы главного тока ТЭГУ различаются по числу электрических машин и способам их включения. Принципиальные схемы ТЭГУ показаны на рис. 4.3.1. В схеме одновальной ТЭГУ (рис. 4.3.1, *а*) отключение и реверс ГЭД осуществляются реверсивным переключателем *П* при снятом возбуждении генератора *Г* и ГЭД. В остальных схемах этот переключатель предназначен только для реверса. В схеме рис. 4.3.1, *б* применяется электромагнитная блокировка, не допускающая включения генераторов на параллельную работу. Схемы рис. 4.3.1, *в*, *г* повышают надежность гребной установки и ее экономичность при неполной скорости судна, когда работает один генератор.

*Дизель-электрические гребные установки* могут быть как автономными, так и объединенными и применяются при мощностях до 15 000 кВт. В ДЭГУ применяется параллельное включение генераторов. Типовая схема ДЭГУ показана на рис. 4.3.2. Выключатели *1—6* служат для включения генераторов, выключатель *7* — для соединения шин *13* и *14* и параллельной работы генераторов правого и левого бортов. Реактор *10* служит для грубой синхронизации; выключатели *8*, *9* — для его выключения, *11*, *12* — реверсоры; *15*, *16* — выключатели сопротивления динамического торможения $R_{\text{дин. т}}$.

Частота вращения дизелей меньше частоты вращения турбин, поэтому в ДЭГУ применяются явнополюсные генераторы. Каждый генератор имеет свою систему возбуждения. ГЭД, если он синхронного типа, имеет отдельный возбудитель, не

связанный с его валом. Приводные двигатели машинных возбудителей (или статические системы возбуждения) получают питание от судовой сети.

В автономных ДЭГУ и ТЭГУ регулирование частоты вращения ГЭД обычно осуществляют путем изменения частоты вращения дизель-генераторов. При параллельном включении генераторов необходимо одновременно изменять частоту

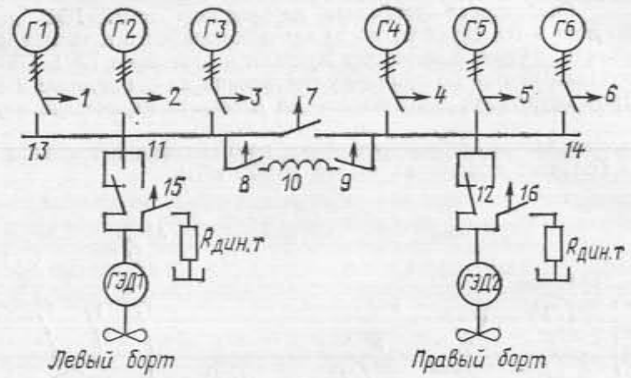



Рис. 4.3.2. Схемы цепи главного тока ДЭГУ с синхронными ГЭД.

вращения дизелей, регуляторы которых должны иметь одинаковые характеристики.

В ГЭУ с отбором мощности питание общесудовой сети осуществляется от шин электродвижения. При маневрировании и экономическом ходе общесудовая сеть переключается на шины вспомогательных генераторов.

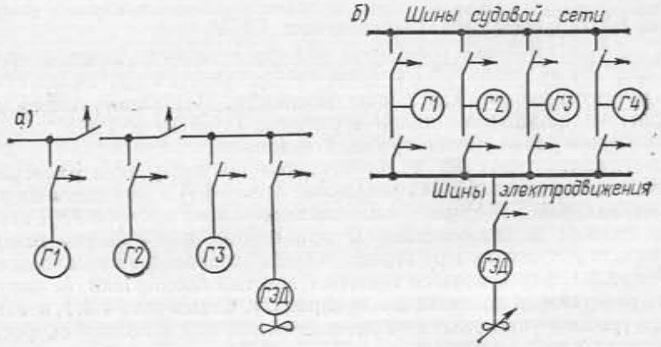



Рис. 4.3.3. Схема цепи главного тока ГЭУ с единой электростанцией: *а* — с секционированными шинами ГРЩ; *б* — с двумя группами шин ГРЩ.

В ГЭУ с единой электростанцией мощность генераторных агрегатов используют одновременно как для обеспечения ходовых режимов, так и для питания судовых потребителей. Частота вращения первичных двигателей в таких системах неизменна. Питание судовых потребителей осуществляется от главных или навешенных генераторов переменного тока со стабильными значениями напряжения и частоты.

Схемы главного тока ГЭУ с единой электростанцией показаны на рис. 4.3.3.



Для включения генераторов на параллельную работу применяются способы точной и грубой синхронизации, а также самосинхронизации. Во всех трех случаях синхронизация может производиться вручную или автоматически.

В ГЭУ мощность нагруженных генераторов соизмерима с мощностью подключаемого генератора и при появлении уравнительного тока значительно снижается напряжение на общих шинах, а при изменении момента сопротивления гребного винта изменяется частота, что ухудшает условия синхронизации.

При неизменной частоте параллельная работа генераторов в ГЭУ не отличается от параллельной работы общесудовых генераторов.

Режимы ГЭУ при работе не всех генераторов можно определить графическим способом, аналогично рассмотренному для ГЭУ постоянного тока (см. § 4.2.1).

Мощность каждого из включенных генераторов понижается пропорционально частоте, а мощность, получаемая ГЭД, — пропорционально частоте и числу работающих генераторов $m$:

$$P_{\text{г}} = P_{\text{г. ном}}\bar{f}_1; \quad P_{\text{дв}} = P_{\text{дв. ном}} = \frac{m}{m_{\text{ном}}}\bar{f}_1,$$

где $\bar{f}_1 = \dfrac{f_1}{f_{1\,\text{ном}}}$.

В двухвальных ТЭГУ режим экономического хода и аварийный получаются при включении одного генератора на два ГЭД. В этом случае мощность, отдаваемая каждому ГЭД, уменьшается, поэтому необходимо снижать частоту их вращения до величины, при которой мощность, отдаваемая одним генератором и изменяющаяся также пропорционально частоте, станет равной мощности двух ГЭД, изменяющейся пропорционально кубу частоты, т. е.

$$P_{\text{г}} = P_{\text{г. ном}}\bar{f}_1 = 2P_{\text{дв}} = 2P_{\text{дв. ном}}\bar{f}_1^3,$$

откуда

$$\bar{f}_1 = \sqrt[3]{\frac{P_{\text{г. ном}}}{2P_{\text{дв. ном}}}} = \sqrt{0{,}5} = 0{,}701,$$

так как $P_{\text{г. ном}} = P_{\text{дв. ном}}$ без учета потерь. Напряжение генератора равно $U_{\text{г}} = 0{,}706U_{\text{г. ном}}$, а ток остается номинальным. Ток каждого ГЭД равен половине номинального.

Напряжение в ГЭУ переменного тока пока еще не стандартизовано и зависит в основном от ее мощности. На основании международной практики строительства и эксплуатации электроходов предусматриваются следующие верхние пределы напряжения (в вольтах):

| | | | |
|---|---|---|---|
| в установках | до 1000 кВт | . . . . . | 230, 400, 525 |
| » » | » 1000—2500 кВт | . . . . . | 1050 |
| » » | » 2500—15 000 кВт | . . . . . | 3150 |
| » » | » 15 000 кВт и выше | . . . . . | 6300 |

При выборе напряжения рекомендуется ориентироваться также на максимально допустимую величину тока главной цепи. Значения тока в каждой фазе ГЭД принимаются равными (в амперах):

| | | | |
|---|---|---|---|
| в установках | малой мощности | . . . . . | 1000—1200 |
| » » | средней » | . . . . . | 1200—1500 |
| » » | большой » | . . . . . | 1500—2000 |

В исключительных случаях допускается превышение этих значений.

Частота тока в ГЭУ не нормируется, но (особенно в объединенных системах) рекомендуется ее стандартная величина 50 Гц. Повышать частоту сверх стандартной целесообразно в ТЭГУ, где имеется возможность использовать турбогенераторы с номинальными частотами вращения свыше 3000 об/мин, и в ГЭУ с синхронными ГЭД, так как последние позволяют поддерживать cos φ в необходимых пределах. В иных вариантах эти мероприятия должны быть для каждого проекта тщательно проанализированы по массе, габаритам, КПД и стоимости.

**ГЭД переменного тока и их характеристики.** ГЭД переменного тока имеют жесткие механические характеристики, и выбор их статических характеристик совпадает с выбором характеристик ГЭД постоянного тока (см. § 4.2.2).

Особым является случай, когда ГЭД должен работать на нескольких статических характеристиках гребного винта, например на свободной и швартовной. Принято выбирать один из двух вариантов: 1) при переходе с нормальной характеристики гребного винта на швартовную поддерживают постоянный момент на валу ГЭД, т. е. переходят на работу по новой механической характеристике; 2) остаются работать на прежней механической характеристике, но с некоторым повышением мощности против номинального ее значения.

На рис. 4.3.4 показаны характеристики фазного асинхронного ГЭД, сопряженные с двумя характеристиками гребного винта: швартовной $M_ш$ и хода в свободной воде $M_{св}$. Точка $A$ определяет режим работы ГЭД и винта при ходе судна в свободной воде, точки $B$ и $C$ соответствуют режиму работы ГЭД на швартовной характеристике. Кривая $Mn = \text{const}$ — гипербола постоянства мощности.

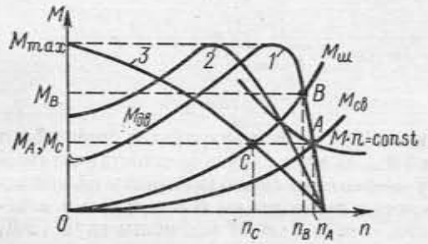



Рис. 4.3.4. Характеристики гребного винта и ГЭД.

*1* — естественная; *2* и *3* — при введении в ротор сопротивления

Для вспомогательных судов, соответствующих первому случаю, в основу выбора мощности кладется номинальный режим работы с моментом на валу ГЭД $M_A$ и частотой вращения $n_A$:

$$P_{\text{расч}} = \frac{M_A n_A}{975}.$$

Так как $M_A = M_C$, а $n_C < n_A$, то ГЭД в швартовном режиме будет несколько недогружен, т. е. $P_C < P_{\text{расч}}$.

Для судов, которым важно сохранять скорость при штормовой погоде и строго выдерживать график хода, особенное значение имеет резервирование мощности, чтобы при переходе гребного винта с работы на одной характеристике на работу по другим характеристикам ГЭД оставался все время на своей естественной механической характеристике. Ввиду жесткости последней значительные колебания момента на валу ГЭД будут сопровождаться незначительными колебаниями частоты вращения ГЭД. Расчетная мощность ГЭД будет определяться точкой $B$:

$$P_{\text{расч}} = \frac{M_B n_B}{975} \text{ или } P_{\text{расч}} = \frac{M_B n_A}{975},$$

так как $n_A \approx n_B$. Мощность же при нормальном режиме работы будет несколько меньше, поскольку $M_A < M_B$; $P_A < P_B$. Отношение $k = \dfrac{P_{\text{расч}}}{P_A} = 1{,}2 \div 1{,}6$ дает значение коэффициента резерва мощности.

Регулирование частоты вращения ГЭД осуществляется изменением частоты питающего ГЭД тока, изменением числа пар полюсов и для асинхронных ГЭД с фазным ротором — изменением скольжения. Последнее достигается изменением активных сопротивлений в цепи обмотки ротора ГЭД посредством регулировочных реостатов (см. рис. 4.3.4) или каскадных соединений.

## § 4.3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЭУ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА

**Изменение частоты ГЭУ.** Электромагнитная мощность генератора $P_г = 3E_0 I \cos\psi$ ($\psi$ — угол между ЭДС $E_0$ и током) при различных частотах определяется допустимым нагревом машины, т. е. величиной тока. При $I = \text{const}$, $\Phi = \text{const}$ и $\psi = \text{const}$ электромагнитная мощность генератора пропорциональна частоте: $P_г \equiv f_1$, так как $E_0 = c_e f_1 \Phi \equiv f_1$ и электромагнитный момент $M = \dfrac{P_г}{\omega} = \text{const}$. Если при всех значениях частоты и тока нагрузки напряжение генератора изменяется пропорционально частоте: $U_1 \equiv f_1$, то при пренебрежении потерями мощность генератора (при $\cos\varphi = 1{,}0$) будет определяться формулой

$$P_г = 3U_1 I \cos\varphi = 3U_1 \frac{f_1}{f_{1\,\text{ном}}} I = P_{\text{дв.ном}} \left(\frac{n}{n_{\text{ном}}}\right)^3,$$

где

$$\bar{I} = \frac{P_{\text{дв.ном}}}{3U_{\text{ном}}} \left(\frac{f_1}{f_{1\,\text{ном}}}\right)^2 = \frac{3U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}}{3U_{\text{ном}}} \bar{f}_1^2 = I_{\text{ном}} \bar{f}_1^2.$$

Если напряжение изменяется пропорционально квадрату частоты: $U_1 \equiv f_1^2$, то $I = I_{\text{ном}} f_1$, т. е. ток изменяется пропорционально частоте тока.

Зависимость между напряжением и частотой при регулировании выбирается из условия наилучшего КПД машины при всех частотах вращения. Оптимальный закон изменения напряжения в ТЭГУ определяется выражением $U = U_{\text{ном}} \bar{f}_1^x$, где $1 < x < 2$. Более точное определение закона изменения магнитного потока требует определения потерь ГЭД при изменении напряжения и частоты в каждом отдельном случае.

Для ДЭГУ определение наивыгоднейшего соотношения между напряжением и частотой не имеет большого значения. При длительном ходе с пониженной скоростью в таких установках отключается часть генераторов, а оставшиеся работают при номинальном токе или близком к нему. Это относится ко всем установкам, у которых в режиме экономического хода отключается часть генераторов.

**Скольжение ГЭД.** При любой частоте питающего тока абсолютное скольжение $s_a$ ГЭД неизменно и определяется отношением частоты ротора к номинальной частоте:

$$s_a = \frac{n_1 - n}{n_{1\,\text{ном}}} = \frac{f_2}{f_{1\,\text{ном}}} = \bar{f}_2 = \bar{f}_1 - \bar{n} = s\bar{f}_1.$$

Относительное скольжение, определяемое частотой генератора, отличающейся от номинальной, равно:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} \frac{n_{1\,\text{ном}}}{n_{1\,\text{ном}}} = \frac{s_a}{n_1/n_{1\,\text{ном}}} = \frac{s_a}{\bar{f}_1} = \frac{\bar{f}_2}{\bar{f}_1}.$$

Так, например, для $f_{1\text{ном}} = 50$ Гц, частоты пуска $f_1 = 25$ Гц (или $\bar{f}_1 = 0{,}5$) и подсинхронной частоты вращения, отличающейся на 5% от синхронной, $s_a = 0{,}05$, $s = 0{,}1$.

**Определение параметров ГЭД при изменении частоты и скольжения.** Ток, напряжение и ток возбуждения генераторов, электромагнитный момент ГЭД и прочие параметры в переходных процессах и установившихся режимах могут быть найдены, если известно эквивалентное сопротивление ГЭД как нагрузки. Общие выражения для параметров асинхронной машины, полученные в [40, 45] с помощью векторной диаграммы и эквивалентных схем, записываются в виде

$$Z_{12 f_1} = Z_{12} \bar{f}_1 = (r_{12} + j x_{12}) \bar{f}_1,$$

где

$$Z_{12} = \frac{1}{\dfrac{1}{jx_0} + \dfrac{1}{r_2/s_a + jx_2}} = r_{12} + j x_{12}.$$

Для глубокопазных и двухклеточных асинхронных двигателей изменение параметров ротора $r_2$ и $x_2$ учитывается посредством выражений $r_2 = k_r r_{20}$; $x_2 = k_x x_{20}$, где $r_{20}$, $x_{20}$ — значения этих величин при $f_2 = 0$, $k_r = \varphi(f_2)$; $k_x =$

$= \varphi_1(f_2)$ — функции, которые определяются из эквивалентной схемы замещения ротора двухклеточного ГЭД, согласно которой

$$r_2 = r_a \frac{r_c(r_a + r_c) + (f_2 x_c)^2}{(r_a + r_c)^2 + (f_2 x_c)^2};$$

$$x_2 = x_a + \frac{r_a^2 x_c}{(r_a + r_c)^2 + (f_2 x_c)^2};$$

при $f_2 = 0$

$$r_{20} = \frac{r_a r_c}{r_a + r_c}; \quad x_{20} = x_a + \frac{r_a^2 x_c}{(r_a + r_c)^2}.$$

Синхронный явнополюсный ГЭД при наличии пусковой обмотки на роторе может быть приведен к эквивалентному асинхронному двигателю с двойной клеткой. На основании схем замещения синхронного ГЭД в асинхронном режиме могут быть получены следующие выражения для эквивалентных сопротивлений и проводимостей ГЭД:

$$Y_{ad} = -jb_{ad} = \frac{1}{jx_{ad}};$$

$$Y_{kd} = g_{kd} - jb_{kd} = \frac{r_{kd}/s_a}{(r_{kd}/s_a)^2 + x_{kd}^2} - j\frac{x_{kd}}{(r_{kd}/s_a)^2 + x_{kd}^2};$$

$$Y_f = g_f - jb_f = \frac{r'_f/s_a}{(r'_f/s_a)^2 + x_f^2} - j\frac{x_f}{(r'_f/s_a)^2 + x_f^2};$$

$$Y_d = Y_{ad} + Y_{kd} + Y_f = g_{kd} + g_f - j(b_{ad} - b_{kd} + b_f) = g_d - jb_d;$$

$$Z_d = r_d + jx_d = \frac{g_d}{g_d^2 + b_d^2} + j\frac{b_d}{g_d^2 + b_d^2};$$

$$Y_{aq} = -jb_{aq} = \frac{1}{jx_{aq}};$$

$$Y_{kq} = g_{kq} - jb_{kq} = \frac{r_{kq}/s_a}{(r_{kq}/s_a)^2 + x_{kq}^2} - j\frac{x_{kq}}{(r_{kq}/s_a)^2 + x_{kq}^2};$$

$$Y_q = Y_{aq} - Y_{kq} = g_{kq} - j(b_{aq} + b_{kq}) = g_q - jb_q;$$

$$Z_q = r_q + jx_q = \frac{g_q}{g_q^2 + b_q^2} + j\frac{b_q}{g_q^2 + b_q^2};$$

$$Z_{12} = r_{12} + jx_{12} = \frac{r_d + r_q}{2} + j\frac{x_d + x_q}{2}.$$

При частоте, отличающейся от номинальной,

$$Z_{0f_1} = r_1 + j\bar{f}_1 x_s + \bar{f}_1(r_{12} + jx_{12}).$$

Пример расчета эквивалентных сопротивлений синхронного ГЭД типа СДСГ-18-44-36 в зависимости от скольжения при $\bar{f}_1 = 1{,}0$ и $r'_f = 10r_f$ в относительных единицах (обмотка возбуждения замкнута на девятикратное сопротивление) приведен в табл. 4.3.1.

**Приведение параметров ГЭД к параметрам генератора.** В ДЭГУ в общем случае мощность генераторов не равна мощности ГЭД, например во время пуска при работе части генераторов. Поэтому полученные эквивалентные параметры ГЭД, выраженные через его базисные значения, приводятся к базисным величи-



*Таблица 4.3.1*

**Определение эквивалентных сопротивлений ГЭД при $\bar{f}_1 = 1{,}0$ и $r'_f = 10r_f$**

| Расчетные величины | Численные значения при $s = 0{,}01$ | Численные значения при $s = 1$ | Расчетные величины | Численные значения при $s = 0{,}01$ | Численные значения при $s = 1$ | Расчетные величины | Численные значения при $s = 0{,}01$ | Численные значения при $f = 1$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $b_{ad}$ | 1,33 | 1,33 | $g_{kq}$ | 0,065 | 4,14 | $r_{12}$ | 0,039 | 0,073 |
| $g_{kd}$ | 0,052 | 3,38 | $b_{kq}$ | 0,0005 | 3,82 | $x_{12}$ | 0,11 | 0,117 |
| $b_{kd}$ | 0,00004 | 2,49 | $g_q$ | 0,065 | 4,14 | $r_0$ | 0,11 | 0,084 |
| $g_f$ | 0,321 | 0,165 | $b_q$ | 2,26 | 6,08 | $x_0$ | 0,697 | 0,254 |
| $b_f$ | 0,045 | 2,31 | $r_d$ | 0,184 | 0,071 | $Z_0$ | 0,704 | 0,268 |
| $g_d$ | 0,373 | 3,55 | $x_d$ | 0,67 | 0,123 | $I$ | 1,42 | 3,74 |
| $b_d$ | 1,38 | 6,13 | $r_q$ | 0,013 | 0,077 | $M$ | 0,21 | 1,08 |
| $b_{aq}$ | 2,26 | 2,26 | $x_q$ | 0,444 | 0,112 | $n$ | 0,99 | 0 |

нам генераторов. Коэффициент приведения равен отношению суммарной мощности работающих генераторов к суммарной мощности ГЭД

$$k_{\text{пр}} = \frac{\sum P_{\text{г. ном}}}{\sum P_{\text{дв. ном}}}.$$

Приведенное эквивалентное сопротивление ГЭД

$$Z_{\text{пр}} = Z_0 k_{\text{пр}} = k_{\text{пр}}(r_0 + jx_0) = r_{\text{пр}} + jx_{\text{пр}}.$$

По току ГЭД определяется ток генераторов

$$I_{\text{г}} = I_{\text{дв}} \frac{I_{\text{дв. ном}}}{mI_{\text{г. ном}}}.$$

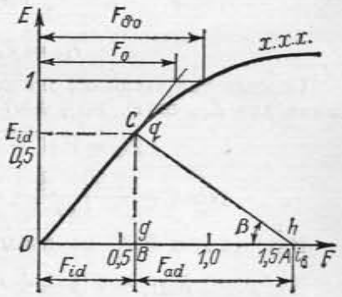



Рис. 4.3.5. Характеристики холостого хода генератора (построение угла и определение МДС $F_{ad}$).

Напряжение и ток генератора, работающего на сопротивление $Z_{\text{ном}}$ при заданных $I_{\text{в}}$ и $\bar{f}_1$, находят при помощи специального построения по характеристике холостого хода [40, 67], согласно которому по рис. 4.3.5 определяется тангенс угла $\beta$:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{BC}{AB} = \frac{C}{x_d - x_s}\left[x_{\text{пр}} + x_s + \frac{(r_{\text{пр}} + r_s)\cos\psi}{\bar{f}_1 \sin\psi}\right] \equiv \frac{E_{id}}{\bar{f}_1 F_{ad}};$$

$$\cos\psi = \frac{r_{\text{пр}} + r}{Z_\psi}; \quad \sin\psi = \frac{(x_{\text{пр}} + x_q)\bar{f}_1}{Z_\psi};$$

$$Z_\psi = \sqrt{(r_{\text{пр}} + r)^2 + \bar{f}_1^2 (x_{\text{пр}} + x_q)^2}.$$

Построив угол β в точке $A$, соответствующий току возбуждения $I_в$, определяют продольную МДС якоря $F_{ad}$ в виде отрезка $BA$. Ток генератора (в о. е.)

$$I_г = \frac{F_{ad}}{c\,(x_d - x_s)\,\sin\psi},$$

где $c$ — масштабный коэффициент.

Напряжение генератора

$$U = I_г \sqrt{r_{пр}^2 + (x_{пр}\bar{f}_1)^2}.$$

Момент генератора, определяющий нагрузку первичного двигателя,

$$M_г = \delta_г I_1^2 \cos\psi \left[(x_{пр} + x_q)\,\sin\psi + \frac{(r_{пр} + r)\cos\psi}{\bar{f}_1}\right],$$

где

$$\delta_г = \frac{1}{\cos\varphi_{г.\,ном} + r_s}.$$

Для турбин перегрузка ограничивается величиной 150%, а для дизелей — 120%.

Сущность метода достаточно ясна из приводимых ниже примеров.

**Пример 1.** Для генератора типа Т2-3,5-2 мощностью 3500 кВт, напряжением 3150 В с параметрами $r = 0{,}0044$; $x_s = 0{,}147$; $x_d = x_q = 1{,}52$ определить полную МДС $F_п$ при номинальной нагрузке, номинальном напряжении, $\bar{f}_1 = 1{,}0$ и $\cos\varphi = 1{,}0$.

Сопротивление нагрузки (в о. е.)

$$Z_{нг} = \frac{U_{ном}}{I_{ном}} = 1{,}0;$$

$$r_{нг} = Z_{нг}\cos\varphi = 1{,}0;\quad x_{нг} = 0.$$

Подстановка числовых значений сопротивлений в приведенные выше выражения для $Z_ψ$, $\cos\psi$, $\sin\psi$ дает

$$Z_ψ = \sqrt{(1 + 0{,}004\,4)^2 + 1^2 \cdot 1{,}52^2} = 1{,}82;$$

$$\cos\psi = \frac{0{,}0044 + 1}{1{,}82} = 0{,}55;\quad \sin\psi = \frac{1{,}52 \cdot 1{,}0}{1{,}82} = 0{,}835.$$

Внутреннюю ЭДС по продольной оси определяют по выражению

$$E_{id\bar{f}_1} = I\,[(r_{пр} + r)\cos\psi + (x_s + x_{пр})\,\bar{f}_1 \sin\psi] =$$
$$= 1\,[(0{,}004\,4 + 1)\,0{,}55 + 0{,}147 \cdot 0{,}835] = 0{,}613.$$

На характеристике холостого хода (х. х. х.) генератора типа Т2-3,5-2 (см. рис. 4.3.5) откладывают величину $\frac{E_{id}}{\bar{f}_1} = \frac{0{,}673}{1{,}0} = 0{,}673$, чтобы можно было пользоваться характеристикой холостого хода, снятой при номинальной частоте вращения. ЭДС $E_{id}/\bar{f}_1$ на характеристике холостого хода соответствует МДС $F_{id} = 0{,}57$.

Магнитодвижущая сила

$$F_{ad} = cIx_{ad}\sin\psi = 0{,}84\,(1{,}52 - 0{,}147) \cdot 0{,}835 = 0{,}965.$$

Если характеристика холостого хода генератора построена в относительных единицах и за единицу МДС принята действительная МДС холостого хода $F_{δ0}$, а не МДС $F_0$, взятая по спрямленной характеристике, то $c = \frac{F_0}{F_{δ0}} = 0{,}84$. Полная МДС находится как сумма МДС

$$F_п = F_{id} + F_{ad} = 0{,}57 + 0{,}965 = 1{,}535.$$



**Пример 2.** Для генератора типа Т2-3,5-2 мощностью 3500 кВт, напряжением 3150 В при полной МДС $F_п$ определить напряжение и ток генератора при $\bar{f}_1 = 0{,}5$; $\cos\varphi = 0{,}5$; $r_{пр} = 0{,}25$; $x_{пр} = 0{,}435$.

В данном случае

$$Z_ψ = \sqrt{(0{,}25 + 0{,}004\,4)^2 + 0{,}5^2\,(0{,}435 + 1{,}52)^2} = 1{,}01;$$

$$\cos\psi = \frac{0{,}25 + 0{,}0044}{1{,}01} = 0{,}247;$$

$$\sin\psi = \frac{0{,}5\,(0{,}435 + 1{,}52)}{1{,}01} = 0{,}967.$$

На графике (см. рис. 4.3.5) из точки $h$, соответствующей на оси абсцисс полной МДС, под углом β проводят прямую $hq$ до пересечения с характеристикой. Угол β определяется из выражения

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{(0{,}25 + 0{,}0044)\,0{,}247 + 0{,}5\,(0{,}435 + 0{,}147)\,0{,}967}{0{,}5 \cdot 0{,}84\,(1{,}52 - 0{,}147)\,0{,}967} = 0{,}708;\quad \beta = 35°40'.$$

Из точки $q$ опускают перпендикуляр $qg$, и отрезок $gh$ дает МДС $F_{ad} = 0{,}96$. Если ЭДС и МДС, выраженные в относительных единицах, имеют разные масштабы, то при построении угла β необходимо вводить масштабный коэффициент. По $F_{ad}$ находят ток из формулы

$$I = \frac{0{,}96}{0{,}84\,(1{,}52 - 0{,}147)\,0{,}967} = 1{,}985.$$

Напряжение генератора определяют по выражению

$$U = 1{,}985\sqrt{0{,}25^2 + (0{,}435 \cdot 0{,}5)^2} = 0{,}657.$$

Электромагнитный момент ГЭД определяют по общим формулам асинхронной машины, данным В. Т. Касьяновым [67], как

$$M_{дв} = \frac{\delta U^2 r_2}{\bar{f}_1\,[\alpha s + \beta + \gamma/s]},$$

где

$$\delta = \frac{1}{r\cos\varphi_{ном}};\quad c_2 = 1 + bx_2;$$

$$\alpha = [c_2 r_1]^2 + \bar{f}_1\,(x_1 + c_1 x_2)^2;$$

$$\beta = 2r_1 r_2;\quad c_1 = 1 + bx_1;$$

$$\gamma = (c_1 r_2)^2 + \left[\frac{br_1 r_2}{\bar{f}_1}\right]^2.$$

Иногда оказывается более удобным пользоваться выражением для электромагнитного момента, полученным из этой формулы и представленным в виде

$$M_{дв} = \frac{I_{ном}^2 r_{12}\,(\bar{f}_1)}{\bar{f}_2\,(\cos\varphi_{ном} - r_1)}.$$

МДС, необходимая для форсировки возбуждения генератора при пуске, реверсе и синхронизации ГЭД, может быть определена по выбранной частоте пуска или реверса, а также по условиям, необходимым для вхождения в синхронизм синхронного ГЭД. Пусковой момент ГЭД должен быть больше момента тро-

гания с места в 1,25 раза. Момент трогания, как правило, не превышает $0{,}25M_{ном}$, на основании чего пусковой момент ГЭД при $s = 1{,}0$ и $s_a = \bar{f}_1$ равен $0{,}25M_{ном}$:

$$1{,}25M_{тр} = 0{,}25M_{ном} = \frac{I^2_{пуск} r_{12} \bar{f}_1}{\cos \varphi_{ном} - r_1},$$

откуда ток, необходимый для получения нужного пускового момента ГЭД, равен

$$I_{пуск} = \sqrt{\frac{0{,}375M_{ном}(\cos \varphi_{ном} - r_1)}{r_{12}}}.$$

Последующее определение МДС выполняется, как было показано выше.

Для получения надежного реверса противовключением полную МДС генератора определяют по тормозному моменту ГЭД, который должен быть больше момента вращения винта, работающего в режиме гидравлической турбины, также в 1,25 раза. При $M_р = 0{,}8M_{ном}$

$$I_р = \sqrt{\frac{M_{ном}(\cos \varphi_{ном} - r_1)}{r_{12}}}.$$

Для вхождения ГЭД в синхронизм подсинхронный момент должен превышать момент сопротивления $M_с$ на 25%. Значение момента ГЭД в конце пуска при абсолютном скольжении $s_a = 0{,}05$ равно

$$1{,}25M_с = \frac{I^2 r_{12} \cdot 0{,}05}{\cos \varphi_{ном} - r_1}.$$

Ток, необходимый для получения нужного момента вращения ГЭД, равен

$$I_1 = \sqrt{\frac{1{,}25M_с(\cos \varphi_{ном} - r_1)}{r_{12}}}.$$

**Динамическое торможение синхронного ГЭД.** В этом режиме ГЭД работает генератором с частотой, изменяющейся от $\bar{f}_1 = 0{,}75$ до $\bar{f}_1 \approx 0{,}05$ при $I_в \leqslant I_{в.ном}$ на тормозное сопротивление $R_{дин.т}$ (см. рис. 4.3.2). Практикой установлено, что активное сопротивление, включаемое при динамическом торможении синхронного ГЭД, равно 0,15 его номинального значения: $R_{дин.т} = 0{,}15Z_{нг} = 0{,}15\frac{U_{дв.ном}}{I_{дв.ном}}$. Тормозной момент ГЭД в режиме динамического торможения определяется по уравнению:

$$M_{дин.т} = \frac{I^2 \cos \psi \left[(r_{пр} + r)\cos \psi + (x_{пр} + x_d)\bar{f}_1 \sin \psi\right]}{\bar{f}_1 (\cos \varphi_{ном} + r)}.$$

Ток $I$ в этом уравнении, так же как и $\cos \psi$ и $\sin \psi$, находится при помощи построения по характеристике холостого хода двигателя (аналогично рассмотренному выше), при этом не учитывается время нарастания тока возбуждения, тока нагрузки и время вхождения в синхронизм.

## § 4.3.3. ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ

Методы расчета переходных процессов изложены в § 4.2.3.

При расчете переходного процесса по методу В. Т. Касьянова последовательно определяют:

1) параметры ГЭД (синхронного или асинхронного), работающего при пониженной частоте с переменным скольжением, так как активное и индуктивное сопротивления его ротора зависят от частоты и скольжения;

2) эквивалентные активное и индуктивное сопротивления ГЭД;

3) необходимые кратности тока возбуждения (полная МДС) генератора для создания пускового и входного моментов вращения ГЭД;



4) ток и напряжение генератора по эквивалентным сопротивлениям двигателя как нагрузки при полученной в § 4.3.2 форсировке;

5) момент вращения ГЭД по параметрам последнего и току при разных значениях частоты вращения, т. е. для различных значений скольжения.

Указанная последовательность справедлива как для асинхронного пуска, так и для асинхронного реверса (противовключением). При расчете реверса с динамическим торможением определяют изменение момента сопротивления двигателя в режиме синхронного генератора, работающего на постоянное сопротивление с переменной частотой (см. § 4.3.2). Время нарастания токов при этом может быть учтено расчетом переходного процесса в цепи возбуждения с постоянной времени установившегося режима, так как ток нарастает постепенно и не превышает значения пускового тока. Расчет длительности динамического торможения производится по уравнениям, приведенным в § 4.1.3.

При расчетах методом В. Т. Касьянова делается основное допущение, что за время пуска или реверса переходные и сверхпереходные процессы не влияют на изменение напряжения генератора. Такой расчет по статическим характеристикам (т. е. по параметрам $x_d$ и $T_{d0}$) соответствует более тяжелым условиям работы ГЭД, так как статический провал напряжения всегда больше динамического, поскольку $x_d > x'_d$. Если расчет с этим приближением показывает, что пуск и реверс ГЭД удовлетворительны, то очевидно, что в действительных условиях с учетом переходных токов момент вращения ГЭД при включении будет больше, а время разгона или торможения сократится.

Примеры расчетов переходных процессов в ГЭУ переменного тока указанным методом можно найти в [40, 45, 51 и 67].

Выбранные режимы пуска и реверса ГЭД следует проверять в отношении допустимых перегревов обмоток. Дополнительный перегрев обмотки, вызванный перегрузкой током кратностью $k$ в течение времени $t$, определяется по формуле

$$\Delta\theta = \frac{\theta_{ном}\left(k^2 - k^2_{нач}\right)t}{T_{ном}},$$

где $\theta_{ном}$ — перегрев при номинальной нагрузке; $k_{нач} = I_{нач}/I_{ном}$ — относительная нагрузка по току перед началом перегрузки (при пуске $k_{нач} = 0$); $k = I_{действ}/I_{ном}$ — перегрузка по току (действующее значение тока за время пуска $I_{д.п} = 0{,}93I_{пуск}$; действующее значение тока за время реверса $I = 0{,}95I_{s=2}$); $T_{ном} = \frac{150\theta_{ном}}{k_f j^2_{s\,ном}}$ — постоянная нагрева обмоток; $j_{s\,ном}$ — номинальная плотность тока в обмотках; $k_f$ — коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления вследствие вытеснения тока.

Для обмотки статора $k_f = 1{,}0$, для обмотки ротора $k_f = 3{,}0$. При определении $\theta_{ном}$ для обмотки ротора при перегрузке, связанной с изменением частоты вращения от нуля до номинальной, $k_f = 2{,}0$.

Если $\theta = \theta_{нач} + \Delta\theta > \theta_{доп}$, то необходимо снижать степень форсировки возбуждения, уменьшать частоту или применять для ГЭД более высокий класс изоляции.

## § 4.3.4. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЗАЩИТА

**Системы автоматического регулирования ГЭУ.** В различных эксплуатационных режимах возбуждение электрических машин ГЭУ регулируется автоматически по соответствующим программам. В зоне синхронной работы возбуждение генераторов и ГЭД регулируется по законам одновременного поддержания постоянства крутящего момента ГЭД и отношения $U/f$. В предпусковом режиме поддерживают минимальное значение тока возбуждения генераторов для удержания их в синхронизме. В асинхронном режиме после включения невозбужденного ГЭД производится форсировка возбуждения генераторов с последующим ограничением, снимающим перегрузку тепловых двигателей, и обеспечением работы при постоянстве номинального крутящего момента. В режиме

синхронизации ГЭД при некотором вполне определенном значении скольжения ГЭД подается возбуждение, обеспечивающее получение максимального синхронизирующего момента. В режимах динамического торможения поддерживается ток возбуждения ГЭД, необходимый для эффективного торможения гребного винта, одновременно поддерживается минимальное значение тока возбуждения генераторов для удержания их в синхронизме.

В схемах частотного регулирования с отбором мощности применяется закон регулирования, обеспечивающий поддержание постоянства отношения напряжения к частоте с одновременным компаундированием по нагрузке. В таких системах используются быстродействующие электромашинные, магнитные и полупроводниковые усилители.

**Автоматическое регулирование перегрузочной способности ГЭУ.** Для повышения устойчивости ГЭУ, т. е. ее перегрузочной способности, применяют автоматическое изменение тока возбуждения генератора и ГЭД от тока нагрузки, сохраняя постоянным равенство $\cos\varphi = 1$. Принципиальная схема такого регулирования для одновальной ТЭГУ показана на рис. 4.3.6, где *Т* — турбина, *ТТ* — трансформатор тока, *ТН* — трансформатор напряжения. Обмотки возбуждения генератора и ГЭД питаются от одного возбудителя *В*, обмотка возбуждения которого *ОВВ* получает питание от *ЭМУ* с тремя обмотками управления *ОУ1*, *ОУ2*, *ОУ3*. Задающей обмоткой *ОУ1* устанавливается необходимый ток возбуждения при номинальном постоянном моменте сопротивления и $\cos\varphi = 1{,}0$. Подбором соотношений МДС обмоток управления *ОУ2* и *ОУ3* и величины дросселя *Др* устанавливается оптимальная зависимость между напряжением и частотой.

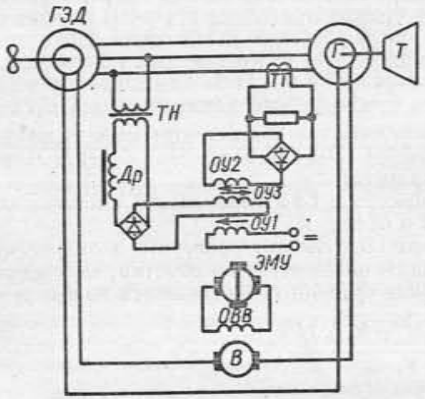



Рис. 4.3.6. Схема автоматического регулирования тока возбуждения генератора и ГЭД в зависимости от тока нагрузки.

Система возбуждения генератора ГЭУ с амплитудно-фазовым компаундированием (АФК) применяется в установках с единой электростанцией (см. § 4.3.1) и по своей структуре не отличается от подобных систем, используемых для общесудовых генераторов.

Внешняя характеристика генератора с системой АФК (рис. 4.3.7) при постоянном $\cos\varphi$ снижается вместе с частотой, при этом в такой же пропорции уменьшается ток установившегося к. з. Трансформатор АФК рассчитывается на поддержание номинального напряжения генератора при 125%-ной нагрузке, пониженной на 5% частоте и токе к. з. около $4I_{ном}$, т. е. рассчитывается с некоторым запасом. При номинальной нагрузке и частоте избыток тока возбуждения снимается дросселем отбора. С понижением частоты (при пусках ГЭД) избыток тока возбуждения уменьшается, так как нагрузкой трансформатора АФК является сопротивление обмотки возбуждения генератора, которое не зависит от частоты. При частоте $f = 0{,}5f_{1ном}$ генератор с системой АФК дает устойчивую внешнюю характеристику.

**Синхронные двигатели с АФК.** Системы фазового и токового компаундирования применяются для возбуждения синхронных ГЭД, что позволяет автоматически поддерживать $\cos\varphi = 1{,}0$ при всех режимах работы ГЭУ и необходимую перегрузочную способность. На судах с единой электростанцией, синхронным ГЭД и ВРШ в режимах неполной нагрузки на винте (шаг винта уменьшен) синхронный двигатель используется для компенсации $\cos\varphi$ электростанции.

Реактивная (емкостная) мощность, которую ГЭД с перевозбуждением может отдавать в сеть, определяется выражением $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$, где $S$ и $P$ — соот-



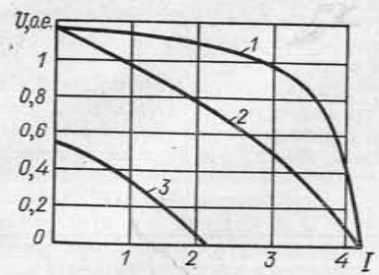



Рис. 4.3.7. Внешние характеристики синхронного генератора с системой АФК.
*1* — $f_1 = 1$, $\cos\varphi = 1$; *2* — $f_1 = 1$, $\cos\varphi = 0$; *3* — $f_1 = 0{,}5$, $\cos\varphi = 0$.

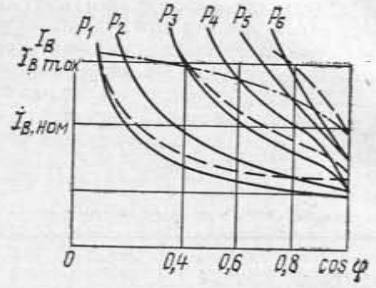



Рис. 4.3.8. Зависимость тока возбуждения от величины опережающего $\cos\varphi$ синхронного ГЭД.

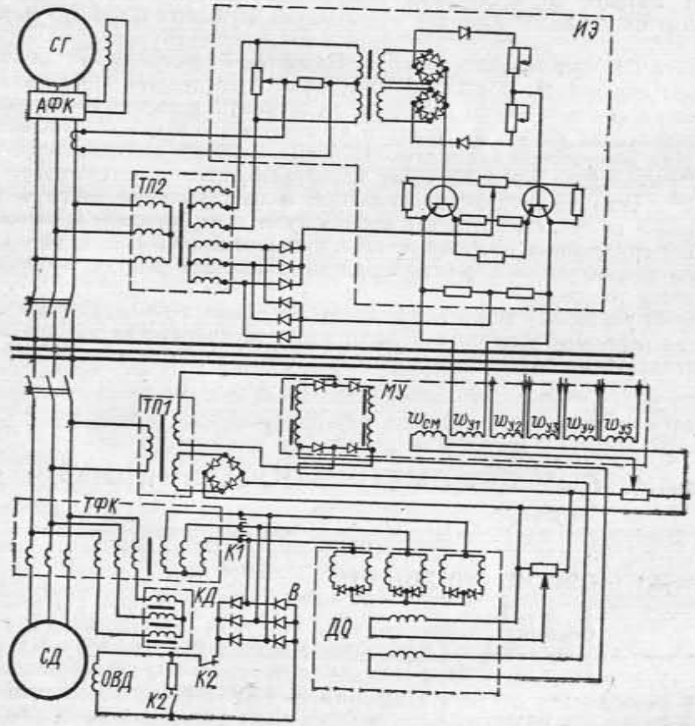



Рис. 4.3.9. Схема возбуждения синхронного ГЭД с системой АФК.

ветственно полная паспортная мощность (кВ·А) ГЭД и активная мощность (кВт) в данном режиме. Реактивная мощность $Q$ определяет значение тока, который ГЭД отдает для компенсации индуктивной составляющей тока судовой сети. Может оказаться, что для получения номинального тока ГЭД с низким опережающим $\cos\varphi$ потребуется увеличить его ток возбуждения до значения, превышающего допустимый по нагреву обмотки возбуждения.

Область допустимых реактивных нагрузок определяется следующим образом: для нескольких значений активной мощности рассчитываются токи возбуждения ГЭД при различных опережающих $\cos\varphi$ и строится график (рис. 4.3.8) зависимости $I_в = f(\cos\varphi)$ при $P = \text{const}$ (сплошные линии). На этом же графике наносится штрихпунктирная линия, определяемая номинальным током двигателя $I_{дв.ном}$. По известной активной мощности и $\cos\varphi$ компенсируемая реактивная мощность определяется из выражения $Q = P\,\mathrm{tg}\,\varphi$. Система компаундирования рассчитывается так, что она дает ток возбуждения, превышающий необходимый (штриховые кривые $I_в$). Избыточный ток отбирается системой автоматического регулирования $\cos\varphi$. Возможный режим работы двигателя ограничивается допустимым током возбуждения $I_{в\,max}$ и номинальным током статора $I_{дв.ном}$.

Система возбуждения ГЭД с регулированием $\cos\varphi$ (схема на рис. 4.3.9) состоит из трансформатора фазового компаундирования *ТФК*, компаундирующего дросселя *КД*, дросселя отбора *ДО*, магнитного усилителя *МУ*, управляющего дросселем отбора, измерительного элемента *ИЭ*, трансформаторов питания *ТП1* и *ТП2*, выпрямителей *В*, контактора *К1*, шунтирующего цепь возбуждения при пуске ГЭД, и контакторов гашения поля *К2*. Электродвигатель получает питание от нескольких генераторов, поэтому *МУ* имеет такое же число обмоток управления $w_у$ для подключения выходных цепей *ИЭ* всех генераторов.

**Защита ГЭУ переменного тока.** По Правилам Регистра СССР для каждого генератора переменного тока предусматриваются следующие виды защит: реле заземления с автоматическим действием на звуковую и световую сигнализацию; дифференциальная защита с действием на отключение цепей возбуждения генератора (для генераторов мощностью 1000 кВт и более); максимальная токовая защита, работающая на отключение цепей возбуждения генераторов.

ГЭД должен иметь дифференциальную и максимальную токовую защиту, действующие на отключение цепей возбуждения и на звуковой и световой сигналы. Для синхронных ГЭД, кроме того, устанавливается защита от выпадания двигателя из синхронизма, действующая на сигнал или (иногда) на форсировку возбуждения генератора.

Помимо указанных видов защит предусматривается температурная сигнализация при перегреве обмоток и подшипников, возникновении пожара и другие виды сигнализации.

# Глава 4.4. ГЭУ ПЕРЕМЕННО-ПОСТОЯННОГО ТОКА

## § 4.4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

**Основные характеристики.** Системы электродвижения с преобразователями рода тока в главной цепи называют ГЭУ двойного рода тока. Они делятся на ГЭУ переменно-постоянного и постоянно-переменного тока. В зависимости от типа выпрямителя ГЭУ переменно-постоянного тока подразделяются на ГЭУ с неуправляемыми (НВ) и управляемыми (УВ) выпрямителями.

В *ГЭУ с неуправляемыми выпрямителями* источником питания ГЭД может быть только автономный генератор переменного тока. Применение ГЭУ с НВ наиболее целесообразно при использовании высокооборотных генераторных



агрегатов (3000 об/мин и выше), в противном случае массогабаритные показатели ГЭУ могут оказаться на уровне ГЭУ постоянного тока. Однако для специальных судов, на которых возможно использование генераторов ГЭУ для питания судовых и других потребителей в режимах стоянки и малых ходов, даже в этих случаях предпочтительнее применение ГЭУ с НВ.

Регулирование частоты вращения ГЭД в ГЭУ с НВ осуществляется изменением напряжения синхронного генератора (СГ), а реверс — изменением полярности тока возбуждения ГЭД. В отличие от ГЭУ постоянного тока для получения требуемого тока стоянки из-за действия реакции статора, увеличивающегося с понижением $\cos\varphi$, ток возбуждения СГ необходимо увеличивать. Положительное действие реакции статора сказывается также при работе ГЭУ в ледовых условиях, что делает более предпочтительным применение СГ в ГЭУ ледоколов и судов ледового плавания. Отсутствие возможности рекуперации энергии при реверсе ГЭД обеспечивает надежную защиту от разгона генераторных агрегатов, но соответственно увеличивает время реверса (существенно при реверсах с полного хода в свободной воде).

В *ГЭУ с управляемыми выпрямителями* питание ГЭД осуществляется как от автономного СГ, так и от общесудовой сети. Система возбуждения СГ обеспечивает стабилизацию напряжения. Регулирование частоты вращения ГЭД осуществляется изменением напряжения с помощью УВ. Реверс ГЭД может производиться с помощью реверсивной схемы УВ в цепи якоря (наибольшее быстродействие) или в цепи возбуждения ГЭД, а также при использовании специального аппарата — реверсора в главной цепи (наименьшая стоимость). В ГЭУ с УВ получили распространение схемы с реверсом тока возбуждения ГЭД.

ГЭУ с УВ целесообразны в тех случаях, когда мощность судовых потребителей и технологических комплексов соизмерима с мощностью ГЭД, что характерно для энергоустановок рыбопромысловых, буровых, спасательных и других судов.

**Особенности ГЭУ.** Применение НВ или УВ в цепи главного тока вызывает ряд особенностей, связанных с появлением высших гармонических в составе тока и напряжения СГ, что необходимо учитывать при расчете известными методами потерь в меди и стали машин, определении возможности питания общесудовых потребителей и безыскровой коммутации ГЭД.

Трехфазный мостовой выпрямитель в зависимости от нагрузки может работать в режиме прерывистого тока (проводят ток одновременно не более чем два вентиля); и режиме непрерывного тока (вентили проводят ток группами по два-три, три-четыре). Основным установившимся режимом ГЭУ является режим непрерывного тока (вентили проводят ток группами по два-три, что соответствует работе с углами коммутации $\gamma \leqslant 60$ эл. град.). В зависимости от конечного значения параметра $\varepsilon = x_н/x_г$ (соотношения реактивных сопротивлений на постоянном и переменном токе) режим непрерывного тока наступает при разном значении нагрузок. При $\varepsilon = \infty$, что соответствует идеально выпрямленному току ($I_d = \text{const}$), прерывистого режима нет при любой нагрузке и угол коммутации лежит в пределах $0 \leqslant \gamma \leqslant 60$ эл. град.

Для оценки работы СГ на выпрямительную нагрузку следует учитывать два фактора:

1) отношение активной мощности выпрямленного тока к требуемой установленной мощности СГ, т. е.

$$x = \frac{P_d}{S} = \frac{U_d I_d}{m U_ф I_ф},$$

где $U_d$, $I_d$ — средние значения выпрямленного напряжения и тока; $U_ф$, $I_ф$ — действующие значения фазного напряжения и тока; $m$ — число фаз;

2) наличие в кривой тока высших гармонических, для которых активные сопротивления статора возрастают. Наибольшее влияние их проявляется в турбогенераторах с массивными роторами и высокими активными сопротивлениями контуров. При проектировании необходимо создавать условия, при которых обеспечивался бы с одной стороны минимум добавочных потерь, с другой — $x \to 1$.

Для уменьшения пульсаций $I_d$, $U_d$ и улучшения формы $I_ф$ и $U_ф$ могут использоваться следующие способы: сглаживающие дроссели, повышенная частота пи-

тания, увеличение числа фаз выпрямителя, снижение реактивности СГ, несимметричные схемы преобразования. Первый способ приводит к значительному увеличению массы и объема ГЭУ, затягиванию переходных процессов. Второй может быть реализован в автономных ГЭУ или в тех случаях, когда судовая сеть независимо от ГЭУ имеет повышенную частоту. Другие способы предполагают использование специальных СГ или трансформаторов. Более предпочтительны трехфазные мостовые схемы преобразования, работающие в шести- или двенадцатифазном режиме. Последний может быть получен с помощью специальных фазосмещающих трансформаторов или сдвоенных генераторов. В этих случаях предполагается питание двух-, трехфазных мостов раздельно от трехфазных обмоток, сдвинутых между собой на 30 эл. град.

Схемы главного тока автономных ГЭУ с НВ и УВ аналогичны схемам ГЭУ постоянного тока, но мощность генераторов не ограничена и число их определяется только соображениями надежности и живучести. В них применяются в основном шести- и двенадцатифазные схемы выпрямления (последние в мощных ГЭУ), а также анодные реакторы и сглаживающие дроссели (в основном в схемах с УВ). Во избежание коротких замыканий через последовательно соединяемые вентили мосты включаются на разные генераторы или группы генераторов, не имеющие параллельного соединения, или через трансформаторы.

В ГЭУ с УВ и единой электростанцией применяются 12-фазные схемы выпрямления с фазосмещающими трансформаторами, автотрансформаторами или воздушными дросселями (в мощных ГЭУ). Последовательное соединение выпрямительных мостов в таких ГЭУ исключается. Использование автотрансформаторов (АТ) вместо трансформаторов позволяет несколько снизить массу. Обмотки каждой фазы АТ разделяются и включаются по схеме «зигзаг—звезда», обеспечивая опережение линейного напряжения одного на 15 эл. град и отставание другого также на 15 эл. град от напряжения сети, что в результате дает подавление пятой и седьмой гармоник.

В отличие от ГЭУ постоянного тока в ГЭУ с НВ и УВ возможно включение и отключение СГ без разрыва цепи главного тока. В схемах неизменного тока с НВ возможно также быстрое включение и отключение исполнительных двигателей воздействием на систему управления их без коммутации силовой цепи.

## § 4.4.2. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

**Особенности расчета.** Расчет статических характеристик ГЭУ переменно-постоянного тока имеет ряд особенностей по сравнению с аналогичными расчетами для ГЭУ постоянного и переменного тока, обусловленных спецификой работы СГ на ГЭД постоянного тока через выпрямитель. Практический учет этих особенностей связан с оценкой влияния изменения $x_г$ и конечного значения $\varepsilon$ на характеристики СГ. Для построения характеристик СГ необходимо знать значения первых гармоник $U_ф$, $I_1$ и угол сдвига фаз между ними $\varphi_1$, так как реакция статора определяется первой гармоникой тока. Действующие значения их зависят от выпрямленных значений $U_d$ и $I_d$ и в общем случае определяются выражениями $I_1 = k_{i1}(\alpha_в, \gamma) I_d$; $U_1 = k_{U1}(\alpha_в, \gamma) U_d$, где $k(\alpha_в, \gamma)$ — функции, учитывающие изменение величин первых гармоник при изменении формы кривых в различных режимах работы выпрямителя, определяемых углом вынужденной задержки открытия вентилей $\alpha_в$ и коммутации $\gamma$. Зная семейство характеристик СГ, например нагрузочных, его можно заменить эквивалентным генератором постоянного тока и дальнейший расчет вести по обычным методам расчета ГЭУ постоянного тока.

**Основные допущения и порядок выполнения расчета.** При выполнении расчета принимаются следующие допущения: $I_d$=const, $\varepsilon = \infty$; $x_г = \frac{x''_d + x_2}{2}$ = const; при определении $\gamma$ пренебрегается активными сопротивлениями статора генератора; вентили считаются идеальными; СГ рассматривается как источник трехфазной синусоидальной ЭДС с амплитудой $E_m$, действующей за $x_г$.



Расчет выполняется в следующей последовательности:

1) строится требуемая механическая характеристика ГЭД;

2) определяются значения напряжения и токов ГЭД для основных режимов или точек всей кривой $U_d(I_d)$;

3) определяется величина $\varepsilon_d = \frac{\pi U_d}{3 x_г I_d}$;

4) если $\varepsilon_d > 3$ ($\gamma < \pi/3$), определяется $\gamma = \arccos \frac{\varepsilon_d - 1}{\varepsilon_d + 1}$;

5) если $\varepsilon_d < 3$ ($\gamma = \pi/3$), определяется угол вынужденной задержки открытия вентилей

$$\alpha_в = \operatorname{arctg} \frac{3 - \varepsilon_d}{\sqrt{3}(1 + \varepsilon_d)};$$

6) для найденных углов $\gamma$ и $\alpha_в$ по графикам рис. 4.4.1, построенным для трехфазной мостовой схемы, определяются соответствующие им коэффициенты

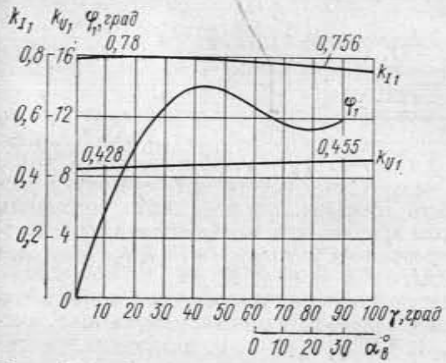



Рис. 4.4.1. Зависимости $k_{U_1} = f_1(\gamma, \alpha_в)$; $k_{I_1} = f_2(\gamma, \alpha_в)$; $\varphi_1 = f_3(\gamma, \alpha_в)$.

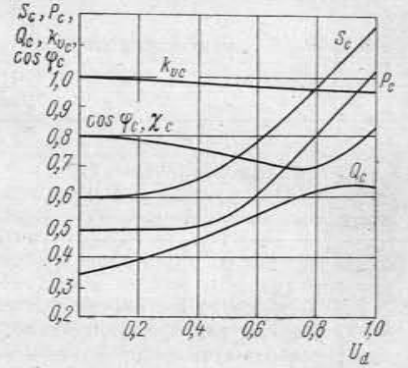



Рис. 4.4.2. Энергетические показатели ГЭУ с УВ и единой электростанцией.

$k_{U_1}$, $k_{I_1}$, $\Psi_1$ и по выражениям $U_1 = k_{U_1} U_d$; $I_1 = k_{I_1} I_d$ вычисляются значения первых гармоник напряжения и тока СГ;

7) с использованием любого из методов, изложенных в курсе электрических машин, находятся МДС возбуждения СГ по нагрузке и напряжению. Для этого вычисляются сопротивления нагрузки:

$$r_в = \frac{U_1 \cos\varphi_1}{I_1}; \quad x_н = \frac{U_1 \sin\varphi_1}{I_1};$$

8) по полученным значениям МДС выбираются возбудитель СГ и закон его управления.

Такой подход к расчету справедлив при работе выпрямителя с углами $\gamma$ до 60 эл. град и $\alpha_в$ до 30 эл. град, т. е. до значения $\pi/3 U_d \geqslant I_d x_г$. При $\pi/3 U_d < I_d x_г$ наступает режим поочередной работы трех и четырех вентилей, что соответствует режиму, близкому к короткому замыканию. Для него достаточно определить ток возбуждения СГ при $U_d = 0$ и заданном значении $I_d$ из характеристики трехфазного короткого замыкания СГ. Подробно методика расчета статических характеристик с примером расчета изложена в [21, 40, 50].

**Выбор параметров элементов в ГЭУ с УВ.** Влияние УВ на энергетические показатели судовой сети может быть получено сложением соответствующих

мощностей при реальном соотношении мощности судовых потребителей и ГЭД. На рис. 4.4.2 показано изменение полной мощности сети $S_с$ и ее составляющих $P_с$, $Q_с$, коэффициентов мощности $\chi_с$ и нелинейных искажений $k_{v_с}$ для всей судовой сети в зависимости от $U_d$ ГЭД. $k_{v_с}$ определялся как отношение действующих значений тока первой гармоники ко всему току. Из графика следует, что снижение $\chi$ выпрямителя не требует увеличения установленной мощности СГ по сравнению с номинальным режимом, в котором они питают всю сеть, включая УВ ГЭД.

Создаваемые УВ высшие гармоники тока оказывают влияние на СГ и всю сеть. Коэффициент допустимой загрузки обмотки статора $\eta_в$ генераторов типа МСК в зависимости от мощности колеблется в пределах от 0,9 до 0,98 (по данным испытаний ЛЭО «Электросила»), что означает соответствующее снижение допустимой активной нагрузки СГ $P_{а.\,доп}$ при работе его на выпрямитель, т. е. $P_{а.\,доп} = \eta_в P_а$. Для наибольшего использования СГ его мощность должна равняться мощности выпрямителя, т. е.

$$S_{г.\,доп} = S_в = \frac{\eta_в P_а}{\cos\varphi_г} = \frac{P_в}{\chi_в},$$

откуда $P_в$, которую может потреблять выпрямитель от СГ, равна

$$P_в = \frac{\eta_в \chi_в P_а}{\cos\varphi_г}.$$

В номинальном режиме при $\alpha = 0$ и $\gamma \approx 25°$ $\chi_в = 0{,}935$ и при $\cos\varphi_г = 0{,}8$ $P_в > P_а$. Однако тепловой двигатель не допускает постоянной перегрузки, поэтому потребляемая полезная мощность выпрямителя не должна превышать $P_{а.\,ном\,СГ}$, если $P_{диз} = P_{а.\,ном\,СГ}$ и $\eta_в$ не принимается во внимание. При составлении таблицы нагрузок судовой электростанции учитывается $P_в$ и $\chi_в$ в наиболее тяжелом для сети режиме выпрямителя.

Для снижения амплитуды высших гармоник могут применяться конденсаторы, фильтры или дроссели. Фильтры настраиваются на гармоники тока, имеющие наибольшую амплитуду (5, 7, 11-ю).

Судовая сеть обладает собственным индуктивным сопротивлением, изменяющимся от нагрузки и частоты, что вызывает нарушение настройки фильтров. Конденсаторы совместно с индуктивностью сети могут составить резонансный контур, что резко снизит их эффективность действия и вызовет нежелательные явления в сети. Наиболее простым и надежным способом подавления помех является включение дросселей в каждую фазу. Выбор дросселя производится по выражению

$$L_{др} = \frac{x_{др}}{\nu\omega_0} = \frac{x_{др} Z_б}{314\nu};$$

$$x_{др} = x_г \left( \frac{k_\nu}{k_{др}} - 1 \right),$$

где $k_\nu$ — отношение амплитуды высшей гармоники тока к амплитуде первой; $k_{др}$ — требуемое отношение амплитуды уменьшаемой высшей гармоники к амплитуде первой; $\nu$ — номер гармоники; $Z_б$ — базисное сопротивление, равное $Z_б = \frac{U_б}{mI_б}$; $m$ — число СГ.

Для снижения пульсаций $I_d$ и уменьшения их влияния на коммутацию ГЭД применяют ненасыщенные дроссели с сердечником. Величина дросселя $L_{др}$ выбирается из условия допустимой величины пульсации тока $k_I = 0{,}02 I_{d\,ном}$ по выражению (при $R = 0$)

$$L_{др} = \frac{k_U U_{d\,ном}}{0{,}02 I_{d\,ном} \nu\omega_0} - L_я,$$



где $k_U$ — коэффициент пульсации выпрямленного тока, определяемый принятой схемой выпрямления и зависящий от угла $\alpha$; $L_я$ — индуктивность якоря ГЭД.

Так, в шестифазной схеме при $U_{d\,ном} = 1080$ В, $I_{d\,ном} = 5000$ А, $L_я = 0{,}273 \cdot 10^{-3}$ г необходим дроссель с индуктивностью

$$L_{др} = \frac{0{,}12 \cdot 1080}{0{,}02 \cdot 5000 \cdot 6 \cdot 314} - 0{,}273 \cdot 10^{-3} = 0{,}427 \cdot 10^{-3}\ \text{Г}.$$

Для оценки габаритов такого дросселя могут быть взяты два реактора типа ФРОС-5600 с индуктивностью $L = 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ Г. Габариты одного реактора 1510×1050×2600 мм, масса 8100 кг.

В 12-фазной схеме с $k_U = 0{,}07$ при заданном $L_я$ и $L_{др} = 0$ $k_I = 0{,}015 \leqslant k_{I\,доп}$, т. е. дроссель не требуется.

При известных параметрах по постоянному току линейное напряжение на входе выпрямительного моста равно:

$$U_л = \frac{k_{дв} U_{дв} + \Delta U_в}{k_в},$$

где

$$k_в = 1{,}35 \frac{\cos\alpha + \cos(\alpha - \gamma)}{2};$$

$\Delta U_в = \frac{\Delta P_в}{I_{ср}}$ — падение напряжения в выпрямительном мосту; $k_{дв}$ — число последовательно включенных на один мост якорей ГЭД; $U_{дв}$ — напряжение якоря ГЭД.

## § 4.4.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЗАЩИТА

В ГЭУ с НВ для повышения быстродействия применяют тиристорные возбудители и подвозбудители. Системы возбуждения СГ могут выполняться по схемам автономного возбуждения или самовозбуждения с коррекцией по нагрузке и мощности. Находит применение параллельно-токовое компаундирование, в котором токовый канал обеспечивает бо́льшую часть мощности и воспринимает все перегрузки. Для возбуждения ГЭД используются реверсивные тиристорные схемы.

Системы управления ГЭУ с НВ сходны с аналогичными системами ГЭУ постоянного тока. Отличием в построении схем является необходимость учета более глубокого изменения напряжения при изменении нагрузки, обусловленного действием реакции статора. При реверсе ГЭД магнитный поток его меняет направление значительно быстрее, чем обороты. В течение времени от момента прохождения через нуль потока до момента прохождения через нуль оборотов ГЭД ток СГ резко возрастает, достигая значения тока стоянки. Выпрямленный ток контура ГЭД может превысить ток стоянки, так как рост его ничем не ограничивается. Для ликвидации этого явления замедляют скорость изменения магнитного потока ГЭД после перемены знака его ЭДС. Защита вентилей НВ в этом режиме может быть осуществлена организацией режима подпитки фаз НВ небольшим по величине током со стороны СГ.

В ГЭУ с УВ при реверсе часто применяется торможение ГЭД с рекуперацией энергии в сеть. УВ переводится в режим зависимого инвертора, напряжение которого изменяется в функции ЭДС ГЭД, работающего в генераторном режиме. В отличие от ГЭУ постоянного тока в ГЭУ с УВ не происходит заметного увеличения частоты вращения тепловых двигателей электростанции, так как мощность последней значительно больше мощности ГЭД, а следовательно, и мощности рекуперации.

Для управления УВ и тиристорных возбудителей применяются быстродействующие регуляторы, построенные на операционных усилителях. В отечестве-

ной практике в качестве регуляторов тока, мощности, напряжения, задатчиков интенсивности, согласующих элементов обратных связей и т. д. используются аналоговые унифицированные блоки системы УБСР-АИ.

В ГЭУ с НВ при любой схеме соединения вентилей невозможна передача энергии от ГЭД к СГ, поэтому исключаются некоторые виды защит и сигнализации, обязательные в ГЭУ постоянного тока.

УВ и НВ имеют необходимые виды защиты: от коммутационных токов и токов к. з. (общая для всего преобразователя), от сверхтоков, индукционные делители, дроссели и т. п.

Наличие СГ в ГЭУ с УВ и НВ требует применения дифференциальной защиты, действующей на отключение цепей возбуждения при мощностях СГ более 1000 кВт.

В остальном защита и сигнализация строятся на принципах, аналогичных ГЭУ постоянного тока.

# РАЗДЕЛ 5

# СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ НА СУДАХ

## Глава 5.1. СУДОВЫЕ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

### § 5.1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При проектировании судового электрического освещения необходимо обеспечить:

а) достаточную яркость рабочих поверхностей, что достигается соответствующим выбором освещенности согласно действующим нормам;

б) ограничение слепящего действия, что обусловливается выбором высоты подвеса, применением рассеивателя или защитного стекла нужного цвета, рациональным выбором типа и мощности источника света;

в) ограничение отраженной блескости, что достигается применением светильников, снабженных рассеивателями, правильным расположением светильников по отношению к освещенной поверхности, изменением положения, а иногда и свойств поверхностей, создающих отраженную блескость;

г) равномерность освещения, что достигается рациональным расположением светильников в заданном интерьере помещения;

д) достаточную вертикальную освещенность подволоки и переборок, что достигается выбором светильников, перераспределяющих часть света в верхнюю полусферу, и окраской помещения преимущественно в светлые тона.

### § 5.1.2. СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ

Применяемое на судах электрическое освещение в зависимости от назначения подразделяется на следующие системы:

а) общее освещение — равномерное или локализованное;

б) комбинированное освещение, состоящее из общего и местного (устройство только местного освещения не допускается);

в) переносное освещение как разновидность местного, обеспечивающее повышение освещенности на рабочих местах при осмотре и ремонте оборудования.

Общее равномерное освещение применяется при производстве однотипных работ по всей площади помещения и при отсутствии необходимости создания дополнительной освещенности на рабочих поверхностях. В этом случае не предъявляется жестких требований к направлению света и светильники, как правило, устанавливаются на подволоке симметрично по площади помещения.

Предпосылками для устройства общего локализованного освещения могут служить:

— различное назначение частей одного помещения;

— наличие громоздкого затеняющего оборудования и трубопроводов;

— необходимость иметь целенаправленное освещение.

Устройство комбинированного освещения обеспечивает необходимую освещенность как помещения в целом, так и отдельных рабочих мест.

В жилых помещениях, а также в камбузах, мастерских и постах радиосвязи рекомендуется устройство комбинированного освещения.

В общественных помещениях (кают-компаниях, столовых, салонах) рекомендуется применение общего равномерного или локализованного освещения с дополнительным декоративным закарнизным освещением.

В служебных и технических помещениях, как правило, применяется общее равномерное освещение с выделением специального подсвета для пультов, щитов, конторок, смотровых стекол и т. п.

Особое внимание в служебных помещениях и, в частности, в машинно-котельных отделениях и постах радиосвязи должно быть уделено устройству переносного освещения с питанием от индивидуальных штепсель-трансформаторов или от отдельной низковольтной сети штепсельных розеток с подключением к ним переносных светильников с помощью гибкого шлангового кабеля длиной 15—20 м.

В табл. 5.1.1 приведены основные характеристики систем освещения, позволяющие произвести их сравнительную оценку, причем знаками «+» и «—» обозначены соответственно преимущество и недостаток, а знаками «++» и «——» отмечены соответственно значительное преимущество и значительный недостаток той или иной системы освещения.

*Таблица 5.1.1*

**Сравнительная оценка систем освещения (по данным В. В. Мешкова)**

| Показатели сравнения | Освещенность более 25 лк | | Освещенность менее 25 лк | |
|---|---|---|---|---|
| | Общее освещение | Комбинированное освещение | Общее освещение | Комбинированное освещение |
| Первоначальные затраты на установку и монтаж | + | — | ++ | —— |
| Эксплуатационные расходы | — | + | + | — |
| Удобство эксплуатации | — | + | — | + |
| Повышение видимости за счет выбора направления света | — — | ++ | — | + |
| Ограничение теней и бликов | — — | ++ | — | + |
| Соотношение яркостей в поле зрения | + | — | + | — |
| Изменение цветности освещения на рабочих местах | — | + | — | + |

## § 5.1.3. ВИДЫ ОСВЕЩЕНИЯ

Различаются следующие виды судового освещения:

внутреннее — для общего и местного освещения внутренних помещений;

наружное — для освещения наружных проходов на палубах и надстройках, открытых палуб и забортных пространств;

аварийное — для обеспечения временной минимальной освещенности в случае исчезновения внутреннего освещения в тех помещениях, где не должна прерываться работа или требуется обеспечить безопасный выход из помещений команде и пассажирам;

дежурное — для освещения проходов и помещений при наличии требования о периодическом отключении внутреннего освещения.

Внутреннее освещение является обязательным для всех помещений судна и выполняется на основании светотехнического расчета и выбранной номенклатуры светильников по назначению и исполнению.



Наружное освещение проходов на открытых палубах должно, как правило, предусматривать установку через 3—3,5 м по линии проходов светильников прямого света.

Интенсивное освещение открытых палуб, предназначенных для производства работ или грузовых операций, может осуществляться как многоваттными светильниками для наружного освещения, так и прожекторами заливающего света, устанавливаемыми в надстройках или на мачтовых конструкциях.

Особое внимание должно быть уделено освещению забортных пространств, мест посадки в шлюпки, мест хранения спасательных плотов и установки забортных трапов. Суда с неограниченным районом плавания должны иметь подсветки государственной эмблемы и транспаранта с названием судна.

Аварийное освещение как часть основного освещения следует рассматривать в качестве меры, обеспечивающей оперативную ликвидацию аварии и восстановление сети основного освещения. Если же рабочий ресурс аварийного источника электроэнергии исчерпывается, аварийное освещение служит для безопасной эвакуации пассажиров и экипажа.

В последнем случае светильники аварийного освещения, как правило, получают питание от групповой или индивидуальной (встроенной в светильник) аккумуляторной батареи.

Светильники аварийного освещения должны устанавливаться в местах, обусловленных Правилами Регистра СССР, при соблюдении нормы минимальной освещенности не менее 10% интенсивности общего освещения для рубок, постов, для лицевой и задней сторон главных и аварийных щитов и не менее 0,2 лк по линии проходов, коридоров, трапов, выходов.

## § 5.1.4. ВЫБОР ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Сравнительная оценка основных типов источников света приводится в табл. 5.1.2.

*Таблица 5.1.2*

**Сравнительная оценка основных типов источников света**

| Сравнительный признак | Место, занимаемое лампой | | |
|---|---|---|---|
| | ЛН | ЛЛ | ДРЛ |
| Световая отдача | 3 | 1 | 2 |
| Срок службы | 3 | 1 | 2 |
| Комплектность | 1 | 3 | 2 |
| Простота схемы включения | 1 | 3 | 2 |
| Слепящее действие | 1 | 3 | 2 |
| Спектр излучения и возможность его варьирования | 2 | 1 | 3 |
| Виброударостойкость | 3 | 1 | 2 |
| Чувствительность к температурным воздействиям | 3 | 2 | 1 |

Условные обозначения: ДРЛ — ртутная лампа высокого давления.

Наибольшее распространение в судовом освещении получили нормальные и малогабаритные судовые лампы накаливания (ЛН).

Предусматривается установка в ряде светильников криптоновых ламп. Применение ламп накаливания не связано с необходимостью жесткой стабилиза-

*Таблица 5.1.3*

**Зависимость параметров ламп накаливания от фактически подводимого напряжения (по данным Г. М. Кнорринга)**

| Напряжение | Ток | Мощность | Сопротивление | Световой поток | Световая отдача | Срок службы |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | в процентах от номинальных величин | | | | |
| 50 | 69 | 34 | 74 | 6,5 | 19 | — |
| 55 | 72 | 40 | 76 | 10 | 25 | — |
| 60 | 76 | 46 | 78 | 14,5 | 31 | — |
| 65 | 79 | 52 | 81 | 20,5 | 39 | — |
| 75 | 86 | 64 | 88 | 35 | 55 | — |
| 80 | 89 | 71 | 90 | 45 | 63 | — |
| 90 | 95 | 85 | 95 | 70 | 82 | 500 |
| 92 | 96 | 88 | 96 | 75 | 85 | 350 |
| 94 | 97 | 91 | 97 | 81 | 89 | 260 |
| 96 | 98 | 94 | 98 | 86 | 92 | 200 |
| 98 | 99 | 97 | 99 | 93 | 96 | 130 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 104 | 102 | 107 | 102 | 115 | 107 | 60 |
| 106 | 103 | 110 | 102 | 122 | 111 | 40 |
| 108 | 105 | 114 | 103 | 129 | 113 | — |
| 110 | 106 | 117 | 103 | 137 | 117 | — |

ции параметров питающей сети, тем не менее выходные параметры ламп накаливания существенно зависят от колебаний напряжения сети (табл. 5.1.3).

В последние годы на судах всех классов и назначений находят преимущественное применение газоразрядные источники света, в частности, люминесцентные лампы (ЛЛ).

При выборе типа ЛЛ следует руководствоваться следующими положениями:

а) для жилых, общественных и медицинских помещений рекомендуется применять лампы типа ЛБ или ЛТБ, близкие по своей цветности к лампам накаливания;

б) для служебных и производственных судовых помещений рекомендуются лампы типа ЛБ.

Люминесцентные лампы предназначены для работы в следующих условиях:

положение ламп во время горения — любое;

температура окружающего воздуха — от +5 до +70° С;

относительная влажность воздуха — до 98%;

высота над уровнем моря — не более 2000 м;

отсутствие взрывоопасной и химически активной среды.

Световой поток ЛЛ снижается в процессе работы, и к концу срока службы он должен быть не менее 50% номинального значения.

Любая ЛЛ, в принципе, может быть включена на любое напряжение сети в зависимости от характеристик пускорегулирующего аппарата (ПРА).

В настоящее время промышленностью выпускаются судовые светильники с ЛЛ мощностью 8, 15 и 20 Вт и ПРА на напряжение 127 В, а также с ЛЛ мощностью 40 и 20 Вт на 220 В.

Из перспективных источников света для целей судового освещения следует выделить: лампы накаливания с йодным циклом, газоразрядные натриевые лампы низкого и высокого давления, а также ксеноновые лампы.

В настоящее время промышленность располагает конструкцией встроенных светильников прямого света, рассчитанных на применение зеркальных ламп накаливания. Такие лампы характерны тем, что отражатель является конструктивной и технологической частью источника света.



Зеркальные лампы концентрированного светораспределения типа ЗК имеют внутренний зеркальный отражатель и матированный купол и рекомендуются для местного или локализованного освещения.

Зеркальные лампы среднего светораспределения типа ЗС имеют зеркально-диффузное внутреннее покрытие, матированный купол и могут быть рекомендованы для общего и декоративного освещения.

Светильники с зеркальными лампами применяются в общественных помещениях (салонах, кают-компаниях, комнатах отдыха, курительных) и особенно там, где необходимо локализованное освещение (над игральными столами, у телевизора, радиолы, над диванами и т. д.).

## § 5.1.5. ОГРАНИЧЕНИЕ ОСЛЕПЛЕННОСТИ И РАВНОМЕРНОСТЬ ОСВЕЩЕНИЯ

Для ограничения слепящего действия ламп тип светильника следует выбирать соответственно высоте подвеса или наоборот высоту — по заданному типу светильника.

Согласно «Нормам искусственного освещения на судах морского флота», введенным в действие Приказом ММФ № 241 от 6 октября 1960 г., высота установки (высота светового центра) светильников общего освещения над уровнем палубы во внутренних помещениях и над открытой палубой в целях ограничения слепящего действия должна быть не менее указанной в табл. 5.1.4.

Применение открытых (незащищенных) ЛЛ для общего освещения не допускается. Исключение составляют ЛЛ, применяемые в общественных помещениях в установках отраженного или карнизного освещения.

*Таблица 5.1.4*

**Рекомендуемая высота установки светильников над палубой**

| Характеристика светильника | Наименьшая высота установки, м, при лампах | |
|---|---|---|
| | 200 Вт и менее | более 200 Вт |
| Светильники без рассеивателей с диффузными отражателями и защитным углом: | | |
| от 10 до 30° | 3 | 4 |
| более 30° | Не ограничивается | 3 |
| Светильники с диффузными отражателями, снабженные рассеивателями, а также светильники без отражателей с рассеивателями | 2,5—3 | 3—4 |
| Светильники с зеркальными отражателями: | | |
| глубокого излучения | 2,5 | 3 |
| широкого излучения | 4 | 6 |

Примечания. 1. Указанные значения высоты светового центра светильников над уровнем палубы могут быть снижены на 0,5 м в помещениях, где требуемая освещенность от общего освещения составляет менее 50 лк, в помещениях, длина которых не превышает двойной высоты установки светильников над палубой, а также в помещениях с временным пребыванием людей.

2. Высота установки светильников не регламентируется при использовании ламп накаливания:

а) мощностью до 60 Вт включительно в матированной колбе или прозрачной колбе с рассеивателем в зоне 0—90°;

б) большей мощности, если светильник (или тело накала лампы) не попадает в поле зрения в пределах угла до 40° к горизонту.

**Минимальная освещенность в производственных помещениях**

*Таблица 5.1.5*

| Наименование помещений | Вид освещения и наименование рабочей поверхности | Нормируемая освещенность, лк | | | | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | при ЛЛ | | при ЛН | | |
| | | комбинированное освещение | одно общее освещение | комбинированное освещение | одно общее освещение | |
| 1. Штурманские и радиорубки, трансляционные узлы | а. Общее освещение | — | 100 | — | 100 * | На уровне 0,8 м от палубы |
| | б. Рабочие столы в радиорубках, трансляционных и т. п. | 400 | — | 200 | — | На площади диаметром 0,5 м |
| | в. Штурманские столы | 150 | — | 150 | — | То же |
| 2. Рулевые рубки | Общее освещение | | 75 | — | 50 * | На уровне 0,8 м от палубы |
| 3. Шкиперские и другие вспомогательные помещения, в которых возможны кратковременные работы | а. Общее освещение | — | 50 | — | 10 | На палубе по линии проходов |
| | б. Рабочие поверхности столов, верстаков | 150 | 100 | 150 | 50 | То же |
| 4. Машинное отделение, отделение вспомогательных машин и механизмов, помещения распределительных щитов, постов, пультов | а. Общее освещение | — | 75 | — | 75 * | На уровне 0,8 м от настила |
| | б. Щиты и пульты контрольно-измерительных приборов с диаметром шкал до 100 мм; | | | | | |
| | при темной шкале | 750 | 200 | 400 | 100 | На шкалах приборов |
| | » светлой » | 500 | 150 | 300 | 75 | То же |

*Продолжение табл. 5.1.5*

| Наименование помещений | Вид освещения и наименование рабочей поверхности | Нормируемая освещенность, лк | | | | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | при ЛЛ | | при ЛН | | |
| | | комбинированное освещение | одно общее освещение | комбинированное освещение | одно общее освещение | |
| 4. Машинное отделение, отделение вспомогательных машин и механизмов, помещения распределительных щитов, постов, пультов | в. Щиты и пульты контрольно-измерительных приборов с диаметром шкал свыше 100 (до 200) мм: | | | | | |
| | при темной шкале | — | 75 | — | 20 | На шкалах приборов |
| | » светлой » | 500 | 150 | 300 | 75 | То же |
| | г. Щиты и пульты контрольно-измерительных приборов с диаметром шкал свыше 200 мм | 150 | 100 | 150 | 50 | То же |
| | д. Схемы и таблички с надписями на щитах (у щитов), пультах и т. п. при высоте шрифта, мм: | | | | | |
| | до 5 | 200 | 100 | 100 | 50 | На схемах и табличках |
| | более 5 | 100 | 75 | 100 | 30 | То же |
| | е. Наружные поверхности электрических аппаратов с задней стороны щита (при наличии прохода) | 100 | 75 | 100 | 30 | На высоте 0,5 м и выше |

*Продолжение табл. 5.1.5*

| Наименование помещений | Вид освещения и наименование рабочей поверхности | Нормируемая освещенность, лк | | | | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | при ЛЛ | | при ЛН | | |
| | | комбинированное освещение | одно общее освещение | комбинированное освещение | одно общее освещение | |
| 4. Машинное отделение, отделение вспомогательных машин и механизмов, помещения распределительных щитов, постов, пультов | ж. Посты местного управления главными двигателями | 150 | 100 | 150 | 50 | На шкалах приборов |
| | з. Отдельно установленные пускорегулирующие аппараты, вентили основных трубопроводов и т. п. | 100 | 75 | 100 | 30 | У мест обслуживания |
| | и. Конторки | 150 | 100 | 150 | 50 | |
| | к. Трапы и переходные площадки | — | 75 | — | 20 | |
| 5. Помещения гребных электродвигателей, автоматизированных установок (холодильных, климатических, фекальных и т. д.), агрегатные, гирокомпасные, румпельные отделения, насосные отделения танкеров и т. п. | а. Общее освещение | — | 75 | — | 20 | На палубе или настиле |
| | б. Рабочие поверхности оборудования, приборов, аппаратов | См. п. 4, б—е | | | | |
| | в. Трапы и переходные площадки | — | 50 | — | 50 | |

*Продолжение табл. 5.1.5*

| Наименование помещений | Вид освещения и наименование рабочей поверхности | Нормируемая освещенность, лк | | | | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | при ЛЛ | | при ЛН | | |
| | | комбинированное освещение | одно общее освещение | комбинированное освещение | одно общее освещение | |
| 6. Котельные отделения | а. Общее освещение у фронта котлов | — | 75 | — | 30 | На палубе или настиле |
| | б. Общее освещение в проходах между котлами, на трапах и переходных площадках, решетках и т. п. | — | 50 | — | 15 | То же |
| | в. Фронт котлов | 100 | 75 | 100 | 30 | В районе обслуживания |
| | г. Рабочие поверхности аппаратов, приборов | См. п. 4, б—е | | | | |
| 7. Аккумуляторные помещения | а. Общее освещение | — | 75 | — | 50 * | На уровне 0,8 м от палубы |
| | б. Стеллажи с аккумуляторами | — | 75 | — | 30 | На высоте 0,8 м |
| 8. Туннели гребного вала, рецессы, шахты лага и эхолота, угольные ямы и цепные ящики | а. Общее освещение | — | 75 | — | 50 | На уровне 0,8 м от палубы |
| | б. Рабочие поверхности подшипников, соединительных муфт и т. п. | — | 100 | — | 50 | |

*Продолжение табл. 5.1.5*

| Наименование помещений | Вид освещения и наименование рабочей поверхности | Нормируемая освещенность, лк | | | | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | при ЛЛ | | при ЛН | | |
| | | комбинированное освещение | одно общее освещение | комбинированное освещение | одно общее освещение | |
| 9. Механические, электротехнические, плотницкие и другие мастерские | а. Общее освещение | — | 100 | — | 50 | На уровне 0,8 м от палубы |
| | б. Рабочие столы, слесарные верстаки, обрабатываемые поверхности металлических деталей | 750 | 300 | 400 | 150 | |
| | в. Обрабатываемые поверхности деревянных деталей | 750 | 200 | 400 | 100 | |
| 10. Лаборатория точных анализов, лаборатории с микроскопами, мастерские по ремонту точных приборов | а. Общее освещение | — | 150 | — | 75 | То же |
| | б. Рабочие столы и рабочие поверхности обрабатывающих станков и т. п. | 1500 | — | 750 | — | |
| 11. Фотолаборатории, типографии, пошивочные мастерские и т. п. | Общее освещение | — | 100 | — | 50 | » |
| 12. Производственные цехи промысловых судов | а. Общее освещение | — | 75 | — | 30 | На палубе |
| | б. Рабочие столы | 500 | 150 | 300 | 75 | |
| | в. Варочные котлы | 150 | 100 | 150 | 50 | |

* Нормируется Регистром СССР.



*Таблица 5.1.6*

**Освещенность от общего освещения в жилых, служебных и вспомогательных помещениях**

| Наименование помещений | Нормируемая освещенность, лк | | Примечание |
|---|---|---|---|
| | ЛЛ | ЛН | |
| *Жилые, служебные и вспомогательные помещения* | | | |
| Каюты всех классов * | 100 | 50 | На уровне 0,8 м от палубы |
| Спальни * | 75 | 30 | То же |
| Кабинеты, приемные * | 150 | 75 | » |
| Салоны (курительные, музыкальные и т. п.) | 150 | 75 | » |
| Детские комнаты | 200 | 100 | » |
| Библиотеки, читальни, красные уголки * | 150 | 75 | » |
| Вестибюли | 75 | 30 | На палубе |
| Коридоры и главные проходы жилых помещений | 75 | 20 | » » |
| Коридоры и проходы служебного назначения | — | 10 | » » |
| Трапы и лестницы: | | | |
| а) в вестибюлях | 75 | 20 | В горизонтальной плоскости на средних ступенях |
| б) в жилых, служебных и вспомогательных помещениях | 50 | 20 | То же |
| Лифты пассажирские и грузовые | 75 | 30 | В шахте и кабине |
| Почтовые отделения, телеграф: | | | |
| а) на рабочих столах * | 200 | 100 | На палубе |
| б) на стеллажах | 75 | 20 | В вертикальной плоскости |
| *Помещения общественного питания* | | | |
| Рестораны | 200 | 100 | На уровне 0,8 м от палубы |
| Кают-компании, кафе, столовые, бары, буфеты, закусочные | 150 | 75 | На уровне 0,8 м от палубы |
| Камбузы, пекарни, кондитерские, моечные | 150 | 75 | То же |
| *Лечебно-профилактические помещения* | | | |
| Операционные | 300 | 150 | На уровне 0,8 м от палубы |
| Кабинеты врачей, амбулатории, перевязочные, приемный покой, лаборатории медицинские, аптеки * | 200 | 100 | То же |
| Изоляторы, лазареты * | 75 | 30 | » |
| *Санитарные и бытовые помещения* | | | |
| Парикмахерские * | 200 | 100 | На уровне 1 м от палубы в горизонтальной плоскости |

*Продолжение табл. 5.1.6*

| Наименование помещений | Нормируемая освещенность, лк | | Примечание |
|---|---|---|---|
| | ЛЛ | ЛН | |
| Раздевальные и моечные помещения в банях, душевых, умывальные и уборные | 75 | 30 | На палубе |
| Прачечные и гладильные: | | | |
| а) на рабочих столах | 200 | 100 | |
| б) на палубе | 75 | 30 | |
| Сушильные | — | 10 | То же |
| *Помещения для грузов, складские помещения* | | | |
| Рефрижераторные кладовые | 75 | 30 | » |
| Помещения почтового багажа | 75 | 20 | » |
| Камеры хранения багажа: | | | |
| а) на рабочих столах * | 100 | 50 | |
| б) на стеллажах | 50 | 10 | |
| в) на палубе | 75 | 20 | |
| Кладовые фонарные, малярные и ЗИП | 75 | 20 | » |
| Кладовые шкиперские и одежды | — | 10 | » |

Примечания. 1. Для помещений, отмеченных знаком *, требуется дополнительное местное освещение.

2. Для освещения операционного поля необходимо применение дополнительного локализованного освещения специальными светильниками.

3. В жилых и общественных помещениях, а также помещениях общественного питания нормируется средняя освещенность, в остальных помещениях — минимальная.

4. Для освещения штурманских столов следует применять специальные светильники с регулировкой силы света и цветными светофильтрами.

5. Освещенность на отдельно установленных измерительных приборах, предназначенных для периодического контроля, при расстоянии до глаза не более 1 м может быть снижена на одну ступень шкалы освещенности по сравнению с указанной для щитов и пультов, но не ниже 75 лк при ЛЛ и 30 лк при ЛН.

6. В случае установки на щитах и пультах измерительных приборов с различным диаметром шкал освещенность принимается по диаметру шкал большинства приборов с учетом степени важности.

7. При наличии подсветки шкал у контрольно-измерительных приборов освещенность их от общего комбинированного освещения не нормируется.

8. Для получения повышенной освещенности на рабочих поверхностях и при невозможности размещения светильников местного освещения рекомендуется устройство системы локализованного освещения в районе рабочих мест.

Помимо этих требований необходимо учитывать особенности того или иного помещения.

Особые требования предъявляются к габаритной яркости светильников, которая для жилых и общественных помещений при нахождении светильников в поле зрения до 40° к горизонту должна быть не более 5 ккд/м², а в медицинских помещениях — не более 2 ккд/м² по всей нижней полусфере светильника.

Не менее важным является соблюдение равномерности освещения $E_{min}$, $E_{max}$, которая для рабочей поверхности должна быть не ниже 0,4, а при системе одного общего освещения — не ниже 0,3. При этом следует стремиться к бестеневому освещению, т. е. исключению теней от работающего или от посторонних предметов.



## § 5.1.6. ВЫБОР ОСВЕЩЕННОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПАСА

«Нормы искусственного освещения на судах морского флота» являются частью «Санитарных правил для морских судов СССР», изданных в 1964 г. Нормы освещенности, соответствующие этим документам, приведены в табл. 5.1.5 и 5.1.6.

Эксплуатационное снижение освещенности учитывается введением в формулу расчета освещенности коэффициента запаса, значения которого приведены в табл. 5.1.7.

*Таблица 5.1.7*

**Коэффициент запаса**

| Характеристика и наименование помещений и палуб | Коэффициент запаса | | Расчетные сроки чистки светильников |
|---|---|---|---|
| | ЛЛ | ЛН | |
| Помещения с большим выделением пыли, дыма, копоти (угольные бункера и т. п.) | 2,0 | 1,7 | 4 раза в месяц |
| Помещения со средним выделением пыли, дыма и копоти (котельные отделения, камбузы, варочные цехи и т. п.): | | | |
| а) при высоте установки светильников до 2,5 м | 1,5 | 1,3 | 4 раза в месяц |
| б) при высоте установки светильников более 2,5 м | 1,8 | 1,5 | 3 раза в месяц |
| Помещения с малым выделением пыли, дыма и копоти (машинные отделения, отделения вспомогательных механизмов, мастерские, агрегатные, рубки, жилые, служебные, вспомогательные помещения и т. п.): | | | |
| а) при высоте установки светильников до 2,5 м | 1,3 | 1,15 | 3 раза в месяц |
| б) при высоте установки светильников более 2,5 м | 1,5 | 1,3 | 2 раза в месяц |
| Открытые палубы: | | | |
| а) при высоте установки светильников до 2,5 м | 1,3 | 1,15 | 4 раза в год |
| б) при высоте установки светильников более 2,5 м | 1,5 | 1,3 | 3 раза в год |

# Глава 5.2. РАСЧЕТ СУДОВЫХ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

## § 5.2.1. СВЕТОВЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ

Световой поток $F$ — мощность светового излучения, оцениваемая по световому ощущению, — равен:

$$F = I\Omega,$$

где $I$ — сила света; $\Omega$ — телесный угол.

Единица — люмен (лм) — световой поток, испускаемый точечным источником в телесном угле 1 стер при силе света 1 кд (стер — стерадиан — отвлеченная единица телесного угла).

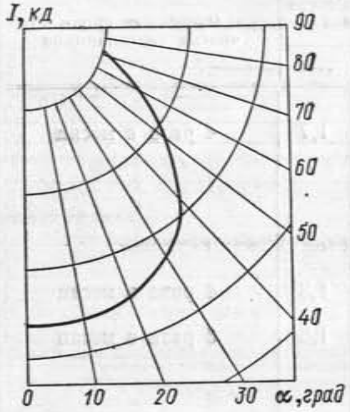



Рис. 5.2.1. Продольная кривая силы света примерного источника.

Сила света $I$ — отношение светового потока к телесному углу, в котором он распространяется:

$$I = \frac{F}{\Omega}. \qquad (5.2.1)$$

Единица — кандела (кд).

Яркость $B$ — поверхностная плотность силы света в заданном направлении, равная отношению силы света светильника в этом направлении к площади проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную к этому направлению:

$$B = \frac{dI}{dS}\frac{1}{\cos\alpha}, \qquad (5.2.2)$$

где $dS$ — площадь светящейся поверхности (испускающей, отражающей или пропускающей свет); $\alpha$ — угол между нормалью к светящейся поверхности и направлением силы света.

Единица — кандела на квадратный метр (кд/м²).

Освещенность $E$ — поверхностная плотность светового потока $F$, падающего на поверхность $S$;

$$E = \frac{dE}{dS}. \qquad (5.2.3)$$

Единица — люкс (лк) — освещенность поверхности площадью 1 м² при световом потоке падающего на нее излучения, равном 1 лм.

Кривая силы света — геометрическое место концов отрезков, изображающих по величине и направлению силу света для одной из меридиональных плоскостей (рис. 5.2.1). На рисунке изображена часть кривой силы света примерного симметричного источника. Каждая точка кривой определяет в принятом масштабе значение силы света $I$ в направлении угла $\alpha$, отсчитываемого против часовой стрелки от вертикальной оси.

## § 5.2.2. МЕТОД КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Для расчетов общего равномерного освещения помещений и пространств применяется метод коэффициента использования светового потока.

Расчетная формула этого метода имеет вид:

$$F_л = \frac{E_{min}K_{зап}SZ}{NU_{о.у}}, \qquad (5.2.4)$$



где $F_л$ — световой поток лампы, установленной в светильнике, лм; $E_{min}$ — минимальная освещенность, лк; $K_{зап}$ — коэффициент запаса; $N$ — число светильников; $U_{о.у}$ — коэффициент использования светового потока (в долях единицы), т. е. отношение потока, падающего на расчетную поверхность, к суммарному потоку всех ламп; $Z$ — отношение средней освещенности к минимальной (при расчете на среднюю освещенность не вводится); $S$ — площадь помещения, м².

При выбранном источнике света определяется его световой поток, затем находится число светильников по формуле:

$$N = \frac{E_{min}K_{зап}SZ}{nF_лU_{о.у}}, \qquad (5.2.5)$$

где $n$ — число ламп в каждом светильнике.

Входящий в формулы (5.2.4) и (5.2.5) коэффициент использования $U_{о.у}$ зависит от следующих данных:

а) КПД и кривой светораспределения светильника;

б) расчетной высоты подвеса светильника $h_{расч}$ (возрастает с ее уменьшением);

в) площади помещения $S$ (возрастает с ее увеличением);

г) отношения длины $a$ помещения к ширине $b$ (уменьшается с увеличением этого соотношения);

д) коэффициентов отражения подволоки, переборок, палубы: $\rho_1$, $\rho_2$, $\rho_3$.

Средние значения коэффициентов отражения для основных применяемых на судах декоративно-отделочных материалов приведены в табл. 5.2.1.

*Таблица 5.2.1*

**Коэффициенты отражения основных декоративно-отделочных материалов и красок**

| Характеристика отражающей поверхности | Значение коэффициента отражения | |
|---|---|---|
| | среднее | принимаемое при расчете |
| Краска белая (белила, эмалевая, клеевая и др.) | 0,65—0,75 | 0,70 |
| Краска желтая (слоновая кость и др.) | 0,69—0,77 | 0,70 |
| Краска светло-серая (шаровая и др.) | 0,40—0,55 | 0,50 |
| Линолеум | 0,10—0,15 | 0,10 |
| Темные породы дерева (красное дерево, темный дуб и др.) | 0,5—0,10 | 0,10 |
| Светлые породы дерева (ясень, береза и др.) | 0,20—0,40 | 0,30 |
| Павинол (желтый, салатный, голубой) | 0,40—0,55 | 0,50 |
| Павинол серый | 0,20—0,42 | 0,30 |
| Ковровые дорожки темных тонов | 0,10 | 0,10 |
| Гобелены темные | 0,10 | 0,10 |

Значения коэффициентов использования светового потока в функции индекса помещения $\varphi$ и коэффициентов отражения $\rho_1$, $\rho_2$, $\rho_3$ для отдельных типов светильников даны в табл. 5.2.2, 5.2.3.

Коэффициент, учитывающий взаимосвязь размеров помещения и высоты подвеса светильника над освещаемой поверхностью, называется индексом помещения $\varphi$ и определяется по формуле

$$\varphi = \frac{ab}{h_{расч}}, \qquad (5.2.6)$$

где $a$ — длина помещения, м; $b$ — ширина помещения, м; $h_{расч}$ — высота подвеса светильника над рабочей поверхностью, м.

*Таблица 5.2.2*

**Коэффициенты использования светового потока $U_{о.у}$ светильников с люминесцентными лампами**

| Тип светильника с опаловым рассеивателем | Коэффициент отражения, % | | | $U_{о.у}$, %, для помещений с φ, равным | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | подволоки $\rho_1$ | переборки $\rho_2$ | палубы $\rho_3$ | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,25 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
| 14; 14А | 70 | 50 | 30 | 27 | 34 | 39 | 44 | 47 | 52 | 56 | 58 |
| | 70 | 50 | 10 | 26 | 32 | 37 | 40 | 43 | 47 | 50 | 51 |
| | 70 | 50 | 10 | 23 | 29 | 33 | 37 | 39 | 43 | 45 | 46 |
| | 50 | 30 | 10 | 19 | 25 | 29 | 32 | 35 | 39 | 41 | 43 |
| СС-30 | 50 | 50 | 10 | 28 | 34 | 40 | 45 | 49 | 55 | 58 | 61 |
| | 50 | 30 | 10 | 22 | 28 | 34 | 39 | 43 | 49 | 54 | 57 |
| СС-33 | 50 | 50 | 10 | 20 | 25 | 31 | 33 | 36 | 40 | 43 | 44 |
| | 50 | 30 | 10 | 16 | 21 | 28 | 30 | 33 | 37 | 40 | 41 |
| СС-100 | 70 | 50 | 30 | 23 | 28 | 33 | 38 | 41 | 46 | 50 | 53 |
| | 70 | 50 | 10 | 22 | 27 | 31 | 35 | 38 | 42 | 45 | 47 |
| | 50 | 50 | 10 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 | 39 | 41 | 43 |
| | 50 | 30 | 10 | 16 | 22 | 25 | 30 | 33 | 36 | 38 | 40 |
| СС-104 | 70 | 50 | 30 | 25 | 31 | 35 | 41 | 45 | 50 | 53 | 56 |
| | 70 | 50 | 10 | 24 | 30 | 32 | 38 | 41 | 45 | 48 | 49 |
| | 50 | 50 | 10 | 22 | 28 | 30 | 36 | 39 | 43 | 46 | 48 |
| | 50 | 30 | 10 | 19 | 23 | 27 | 32 | 36 | 40 | 43 | 45 |
| СС-109 | 70 | 50 | 30 | 22 | 28 | 33 | 37 | 39 | 45 | 48 | 51 |
| | 70 | 50 | 10 | 21 | 27 | 31 | 34 | 37 | 40 | 44 | 46 |
| | 50 | 50 | 10 | 19 | 24 | 28 | 32 | 33 | 37 | 39 | 42 |
| | 50 | 30 | 10 | 16 | 20 | 23 | 27 | 30 | 34 | 37 | 39 |
| СС-111 | 70 | 50 | 30 | 19 | 24 | 28 | 32 | 34 | 38 | 40 | 42 |
| | 70 | 50 | 10 | 18 | 23 | 26 | 29 | 31 | 34 | 36 | 37 |
| | 50 | 50 | 10 | 17 | 22 | 25 | 28 | 29 | 33 | 35 | 36 |
| | 50 | 30 | 10 | 15 | 19 | 22 | 25 | 27 | 31 | 33 | 35 |
| СС-112 | 70 | 50 | 30 | 25 | 32 | 37 | 42 | 46 | 51 | 54 | 57 |
| | 70 | 50 | 10 | 24 | 31 | 36 | 32 | 42 | 46 | 48 | 51 |
| | 50 | 50 | 10 | 23 | 29 | 34 | 37 | 40 | 44 | 46 | 49 |
| | 50 | 30 | 10 | 19 | 24 | 30 | 33 | 37 | 41 | 43 | 46 |
| СС-118 | 70 | 50 | 30 | 27 | 33 | 38 | 43 | 46 | 50 | 52 | 55 |
| | 70 | 50 | 10 | 26 | 31 | 36 | 39 | 42 | 45 | 47 | 49 |
| | 50 | 50 | 10 | 25 | 30 | 35 | 38 | 41 | 44 | 46 | 48 |
| | 50 | 30 | 10 | 21 | 27 | 32 | 36 | 39 | 42 | 44 | 46 |



*Таблица 5.2.3*

**Коэффициенты использования светового потока $U_{о.у}$ светильников с лампами накаливания**

| Тип светильника и цвет рассеивателя | Коэффициент отражения, % | | | $U_{о.у}$, %, для помещений с φ, равным | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | подволоки $\rho_1$ | переборки $\rho_2$ | палубы $\rho_3$ | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,25 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
| В4А-60 бесцветный | 50 | 50 | 10 | 14 | 19 | 23 | 26 | 30 | 33 | 36 | 38 |
| | 50 | 30 | 10 | 10 | 15 | 19 | 22 | 25 | 29 | 32 | 35 |
| В3Г-100 матированная колба | 50 | 50 | 10 | 16 | 19 | 22 | 26 | 28 | 32 | 34 | 37 |
| | 50 | 30 | 10 | 12 | 16 | 19 | 22 | 25 | 28 | 31 | 34 |
| В3Г-200АМ с отражателем | 50 | 50 | 10 | 19 | 23 | 27 | 31 | 33 | 37 | 39 | 41 |
| | 50 | 30 | 10 | 16 | 20 | 24 | 28 | 31 | 34 | 37 | 39 |
| | 30 | 30 | 10 | 15 | 20 | 23 | 27 | 30 | 34 | 36 | 38 |
| СС-49 со шторкой бесцветный | 70 | 50 | 30 | 16 | 21 | 24 | 28 | 31 | 36 | 39 | 41 |
| | 70 | 50 | 10 | 16 | 20 | 23 | 26 | 29 | 32 | 36 | 37 |
| | 70 | 50 | 10 | 13 | 16 | 19 | 22 | 24 | 27 | 29 | 31 |
| | 50 | 30 | 10 | 9 | 12 | 16 | 18 | 21 | 24 | 26 | 28 |
| СС-183 | 70 | 50 | 30 | 22 | 28 | 32 | 37 | 39 | 45 | 49 | 52 |
| СС-328-1 опаловый | 70 | 50 | 30 | 22 | 27 | 32 | 37 | 42 | 47 | 52 | 55 |
| | 70 | 50 | 10 | 21 | 26 | 30 | 34 | 38 | 43 | 46 | 49 |
| | 50 | 50 | 10 | 18 | 22 | 26 | 30 | 33 | 38 | 41 | 42 |
| | 50 | 30 | 10 | 14 | 18 | 22 | 26 | 29 | 34 | 37 | 39 |
| СС-373; 373М молочный | 70 | 50 | 30 | 14 | 18 | 21 | 15 | 28 | 31 | 34 | 36 |
| | 70 | 50 | 10 | 14 | 17 | 20 | 23 | 25 | 27 | 30 | 32 |
| | 50 | 50 | 10 | 12 | 14 | 17 | 19 | 21 | 24 | 26 | 27 |
| | 50 | 30 | 10 | 9 | 12 | 14 | 17 | 18 | 21 | 24 | 25 |
| | 30 | 30 | 60 | 7 | 9 | 12 | 24 | 15 | 18 | 20 | 21 |
| 383у опаловый | 70 | 50 | 30 | 20 | 25 | 30 | 34 | 38 | 42 | 46 | 49 |
| | 70 | 50 | 10 | 19 | 24 | 28 | 32 | 34 | 38 | 41 | 43 |
| | 50 | 50 | 10 | 17 | 21 | 25 | 28 | 31 | 35 | 37 | 39 |
| | 50 | 30 | 10 | 13 | 17 | 21 | 25 | 27 | 32 | 34 | 36 |
| 434у опаловый | 70 | 50 | 30 | 28 | 35 | 41 | 47 | 51 | 58 | 63 | 65 |
| | 70 | 50 | 10 | 27 | 33 | 38 | 43 | 47 | 52 | 56 | 59 |
| | 50 | 50 | 10 | 23 | 29 | 33 | 38 | 41 | 46 | 49 | 51 |
| | 50 | 30 | 10 | 18 | 24 | 29 | 33 | 37 | 42 | 46 | 48 |

*Продолжение табл. 5.2.3*

| Тип светильника и цвет рассеивателя | Коэффициент отражения, % | | | $U_{о.у}$, %, для помещений с φ, равным | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | подволоки $\rho_1$ | переборки $\rho_2$ | палубы $\rho_3$ | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,25 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
| СС-818 бесцветный | 70 | 50 | 30 | 48 | 52 | 55 | 58 | 60 | 63 | 65 | 66 |
| | 70 | 50 | 10 | 46 | 48 | 52 | 54 | 56 | 57 | 58 | 60 |
| | 50 | 30 | 10 | 43 | 47 | 50 | 52 | 53 | 55 | 56 | 57 |
| СС-833 бесцветный | 50 | 50 | 10 | 18 | 23 | 27 | 32 | 35 | 40 | 43 | 45 |
| | 50 | 30 | 10 | 14 | 19 | 23 | 27 | 31 | 36 | 39 | 42 |
| СС-834-1 молочный | 70 | 50 | 30 | 21 | 27 | 31 | 35 | 40 | 45 | 49 | 51 |
| | 70 | 50 | 10 | 20 | 25 | 29 | 32 | 36 | 41 | 44 | 46 |
| | 50 | 50 | 10 | 17 | 22 | 25 | 28 | 32 | 36 | 39 | 41 |
| | 50 | 30 | 10 | 13 | 17 | 21 | 24 | 28 | 31 | 34 | 36 |
| СС-835 бесцветный | 50 | 50 | 10 | 21 | 26 | 30 | 34 | 37 | 42 | 45 | 47 |
| | 50 | 30 | 10 | 16 | 21 | 25 | 29 | 33 | 37 | 41 | 43 |
| СС-837 молочный | 70 | 50 | 30 | 24 | 30 | 35 | 40 | 44 | 50 | 54 | 57 |
| | 70 | 50 | 10 | 23 | 29 | 33 | 37 | 40 | 46 | 49 | 51 |
| | 50 | 50 | 10 | 20 | 24 | 28 | 32 | 35 | 40 | 42 | 45 |
| | 50 | 30 | 10 | 15 | 20 | 24 | 28 | 31 | 35 | 38 | 41 |
| СС-838, 839 молочный | 70 | 50 | 30 | 23 | 28 | 33 | 39 | 42 | 47 | 51 | 52 |
| | 70 | 50 | 10 | 22 | 27 | 31 | 36 | 38 | 43 | 45 | 48 |
| | 50 | 50 | 10 | 20 | 25 | 29 | 33 | 36 | 40 | 42 | 44 |
| | 50 | 30 | 10 | 16 | 20 | 25 | 29 | 32 | 36 | 39 | 42 |
| СС-840 молочный | 70 | 50 | 30 | 16 | 21 | 24 | 27 | 30 | 34 | 36 | 37 |
| | 70 | 50 | 10 | 15 | 20 | 22 | 25 | 27 | 30 | 32 | 33 |
| | 50 | 50 | 10 | 14 | 13 | 21 | 24 | 25 | 29 | 30 | 32 |
| | 50 | 30 | 10 | 11 | 15 | 18 | 21 | 23 | 26 | 29 | 30 |
| СС-858 молочный | 70 | 50 | 30 | 17 | 22 | 26 | 30 | 33 | 38 | 41 | 43 |
| | 70 | 50 | 10 | 16 | 21 | 25 | 28 | 30 | 34 | 36 | 38 |
| | 50 | 50 | 10 | 15 | 18 | 21 | 24 | 26 | 30 | 32 | 34 |
| | 50 | 30 | 10 | 12 | 15 | 18 | 21 | 23 | 27 | 29 | 31 |
| СС-868 опаловый | 70 | 50 | 30 | 20 | 24 | 28 | 32 | 35 | 39 | 42 | 44 |
| | 70 | 50 | 10 | 19 | 23 | 26 | 30 | 32 | 35 | 37 | 39 |
| | 50 | 50 | 10 | 18 | 22 | 25 | 29 | 31 | 34 | 36 | 38 |
| | 50 | 30 | 10 | 15 | 19 | 23 | 26 | 29 | 32 | 34 | 36 |
| 967М опаловый | 50 | 50 | 10 | 16 | 20 | 23 | 26 | 29 | 32 | 35 | 36 |
| | 50 | 30 | 10 | 12 | 16 | 20 | 23 | 25 | 30 | 32 | 34 |



*Таблица 5.2.4*

**Индексы помещений**

| Высота $h_{расч}$, м, при отношении длины к ширине | | | Площадь $S$, м², помещения с индексом φ, равным | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1—1,5 | 1,5—2,5 | 2,5—3,5 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,1 | 1,25 | 1,5 | 1,75 | 2,0 |
| 1,8 | 1,7 | 1,6 | 4 | 5,6 | 7,5 | 9,5 | 11,9 | 14,6 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | | 47,0 |
| 2 | 1,9 | 1,8 | 5 | 6,9 | 9,2 | 11,8 | 14,4 | 17,6 | 23,0 | 31,0 | 43,0 | | 57,0 |
| 2,2 | 2,1 | 1,9 | 6 | 8,3 | 11,1 | 14,3 | 17,8 | 22,0 | 27,0 | 37,0 | 52,0 | | 69,0 |
| 2,4 | 2,3 | 2,1 | 7,2 | 10,0 | 13,2 | 17,0 | 21,2 | 26,0 | 33,0 | 45,0 | 62,0 | | 83,0 |
| 2,6 | 2,5 | 2,3 | 8,5 | 11,8 | 15,6 | 20,1 | 25,0 | 30,0 | 37,0 | 52,0 | 73,0 | | 97,0 |
| 2,8 | 2,6 | 2,5 | 9,7 | 13,5 | 18,0 | 23,2 | 29,0 | 35,2 | 44,0 | 61,0 | 85,0 | | 112,0 |
| 3,0 | 2,8 | 2,6 | 11,2 | 15,6 | 20,7 | 26,7 | 33,0 | 40,0 | 51,0 | 70,0 | 97,0 | | 130,0 |
| 3,2 | 3,0 | 2,8 | 12,7 | 17,7 | 23,5 | 30,0 | 37,7 | 46,0 | 58,0 | 80,0 | 110,0 | | 147,0 |
| 3,4 | 3,2 | 3,0 | 14,4 | 20,0 | 26,5 | 34,0 | 42,0 | 52,0 | 65,0 | 89,0 | 124,0 | | 165,0 |
| 3,6 | 3,4 | 3,2 | 16,2 | 22,6 | 30,0 | 38,5 | 48,0 | 58,0 | 73,0 | 101,0 | 142,0 | | 188,0 |
| 3,9 | 3,7 | 3,4 | 19,0 | 26,4 | 35,0 | 45,0 | 56,0 | 68,0 | 86,0 | 118,0 | 165,0 | | 220,0 |
| 4,2 | 4,0 | 3,7 | 22,0 | 30,5 | 40,0 | 52,0 | 65,0 | 80,0 | 100,0 | 137,0 | 191,0 | | 253,0 |

Для помещений с длиной $a$, превышающей ширину $b$ в 3,5 раза и более, $\varphi$ можно определить по формуле

$$\varphi = \frac{b}{h_{\text{расч}}}. \qquad (5.2.7)$$

Если при расчете значение $\varphi$ получится менее 0,6 или более 3,0, то берутся соответственно эти крайние значения. Если расчетом получено промежуточное значение $\varphi$, отсутствующее в таблицах, то принимается среднее арифметическое значение $U_{\text{о. у}}$.

Для нахождения индекса помещения в практике проектирования используют таблицу Дубинкина (табл. 5.2.4). В одной из трех вертикальных граф находят значение $a/b$ в зависимости от принятой высоты подвеса $h_{\text{расч}}$. Перемещаясь по горизонтальной строчке вправо до вертикальной линии, разделяющей два ближайших значения площади помещения, и поднимаясь вверх по вертикали, находят искомое значение индекса помещения.

Для ускорения расчета общего равномерного освещения по методу коэффициента использования может быть применена упрощенная формула

$$N = \frac{cS}{nU_{\text{о. у}}}, \qquad (5.2.8)$$

где $c$ — расчетный коэффициент, определяемый по табл. 5.2.5 и 5.2.6.

*Таблица 5.2.5*

**Расчетный коэффициент $c$ для люминесцентных ламп**

| Напряжение, В | Мощность, Вт | Световой поток, лм | Коэффициент запаса | Коэффициент $c$ при минимальной освещенности $E$, равной | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 50 | 75 | 100 | 150 | 200 | 300 |
| 127 | 15 | 630 | 1,3 | 12 | 18 | 24 | 36 | 48 | 72 |
| | | | 1,5 | 15 | 22 | 29 | 44 | 58 | 87 |
| | 20 | 950 | 1,3 | 8,2 | 12,3 | 16,4 | 24,6 | 32,8 | 49,2 |
| | | | 1,5 | 9,5 | 14,3 | 19,0 | 28,4 | 38,0 | 57,0 |
| 200 | 40 | 2400 | 1,3 | 3,2 | 4,8 | 6,4 | 9,6 | 12,8 | 19,2 |
| | | | 1,5 | 3,7 | 5,5 | 7,4 | 11,1 | 14,8 | 22,2 |

*Таблица 5.2.6*

**Расчетный коэффициент $c$ для ламп накаливания**

| Напряжение, В | Мощность, Вт | Световой поток, лм | Коэффициент запаса | Коэффициент $c$ при минимальной освещенности $E$, равной | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 10 | 20 | 30 | 50 | 75 | 100 |
| | 40 | 304 | 1,15 | 4,5 | 9,0 | 13,5 | 22,5 | 33,8 | 45,0 |
| | | | 1,5 | 6,0 | 12,0 | 18,0 | 30,0 | 45,0 | 60,0 |
| 127 | 60 | 516 | 1,15 | 2,7 | 5,4 | 8,1 | 13,5 | 20,0 | 27,0 |
| | | | 1,5 | 3,5 | 7,0 | 10,5 | 17,5 | 26,3 | 35,0 |
| | 40 | 268 | 1,15 | 5,1 | 10,2 | 15,3 | 25,5 | 38,0 | 51,0 |
| | | | 1,5 | 6,7 | 13,4 | 20,0 | 33,8 | 50,0 | 67,0 |
| | | | 1,15 | 3,2 | 6,4 | 9,6 | 15,0 | 24,0 | 32,0 |
| 220 | 60 | 432 | 1,5 | 4,1 | 8,2 | 12,3 | 20,5 | 30,5 | 41,0 |
| | 200 | 2700 | 1,15 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,5 | 3,8 | 5,0 |
| | | | 1,5 | 0,6 | 1,2 | 1,8 | 3,0 | 4,5 | 6,0 |



Значения расчетного коэффициента $c$ получены по формуле

$$c = \frac{E_{\min} K_{\text{зап}} Z \cdot 100}{F_{\text{л}}} \text{ при } Z = 1,\ 2. \qquad (5.2.9)$$

Фактическую освещенность помещения можно определить из выражения

$$E_{\text{факт}} = E_{\min} \frac{N_{\text{факт}}}{N}, \qquad (5.2.10)$$

где $E_{\min}$ — нормируемая освещенность; $N_{\text{факт}}$ — фактически установленное количество светильников; $N$ — количество светильников, определенное расчетом (без округления).

## § 5.2.3. УДЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ

Удельной мощностью $W$ (Вт/м²) называется отношение установленной мощности ламп к освещаемой площади. Расчет общего равномерного освещения с помощью таблиц удельной мощности может быть рекомендован для большинства судовых помещений практически любой площади (с увеличением площади точность расчета повышается). Сущность расчета заключается в том, что в зависимости от выбранного типа светильника, высоты установки его над рабочей поверхностью, нормы горизонтальной освещенности и площади помещения по табл. 5.2.7—5.2.17 определяется значение удельной мощности и по площади помещения и ближайшей мощности стандартной лампы находится число светильников:

$$N = \frac{WS}{P_{\text{л}}}, \qquad (5.2.11)$$

где $P_{\text{л}}$ — мощность одной лампы, Вт; $W$ — удельная мощность, Вт/м²; $S$ — площадь помещения, м².

В таблицах приводятся значения удельной мощности для различных светильников в зависимости от площади освещаемой поверхности $S$, высоты подвеса светильников над освещаемой поверхностью $h_{\text{расч}}$, отражающих свойств поверхностей $\rho_1$, $\rho_2$, $\rho_3$, освещенности $E$ и коэффициента запаса $K_{\text{зап}}$.

Значения удельной мощности для тех же светильников, но с другими параметрами источников света или коэффициентов запаса могут быть определены из соотношений:

$$W_x = W \frac{F}{F_x}; \qquad (5.2.12)$$

$$W_x = W \frac{K_{\text{зап}}}{K_{\text{зап}\,x}}, \qquad (5.2.13)$$

где $W$ и $W_x$ — соответственно имеющееся и определяемое значения удельной мощности, Вт; $F$ и $F_x$ — табличное и искомое значения светового потока источника света; $K_{\text{зап}}$ и $K_{\text{зап}\,x}$ — табличное и искомое значения коэффициентов запаса.

Для помещений площадью до 5 м² количество светильников можно определить из табл. 5.2.18.

**Пример.** Рассчитать количество светильников общего люминесцентного освещения, необходимое для установки в двухместной каюте площадью $S = ab = 4 \cdot 2{,}5 = 10$ м². Освещенность, требуемая нормами, $E = 100$ лк (из табл. 5.1.6).

При напряжении сети освещения 127 В и высоте установки светильников $h_{\text{расч}} = 2{,}2$ м намечаем к установке светильник типа СС-104 с четырьмя ЛЛ типа ЛТБ-15 со световым потоком $F_{\text{л}} = 700$ лм.

По формуле (5.2.6) найдем индекс помещения:

$$\varphi = \frac{4 \cdot 2{,}5}{(4 + 2{,}5)\, 2{,}2} = 0{,}7.$$

*Таблица 5.2.7*

**Удельная мощность общего равномерного освещения для светильника типа СС-328-1 с лампой накаливания С220-60 ($\rho_1 = 0{,}5$; $\rho_2 = 0{,}3$; $\rho_3 = 0{,}3$; $K_{зап} = 1{,}3$)**

| $h_{расч}$, м | $S$, м² | $W$ при $E$, лк | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 10 | 20 | 30 | 50 | 75 | 100 |
| 1,3—2 | 5—10 | 10,2 | 20,3 | 30,4 | 50,7 | 76,1 | 101,4 |
| | 10—15 | 8 | 16 | 24 | 40 | 60 | 80 |
| | 15—25 | 6,8 | 13,5 | 20,3 | 33,8 | 50,9 | 67,6 |
| | 25—50 | 5,8 | 11,6 | 17,4 | 29 | 43,4 | 57,9 |
| | 50—150 | 4,8 | 9,6 | 14,4 | 24 | 36 | 48 |
| 2—3 | 5—10 | 12,9 | 25,8 | 38,7 | 64,5 | 96,7 | 129 |
| | 10—15 | 11,6 | 23,2 | 34,7 | 57,9 | 86,8 | 115,8 |
| | 15—25 | 9,4 | 18,8 | 28,2 | 47 | 70,6 | 94 |
| | 25—50 | 7,4 | 14,7 | 22 | 36,7 | 55 | 73,4 |
| | 50—150 | 5,7 | 11,4 | 17,2 | 28,6 | 42,8 | 57,2 |

*Таблица 5.2.8*

**Удельная мощность общего равномерного освещения для светильника типа СС-435 с лампой накаливания С127-60-2 ($\rho_1 = 0{,}7$; $\rho_2 = 0{,}5$; $\rho_3 = 0{,}3$; $K_{зап} = 1{,}3$)**

| $h_{расч}$, м | $S$, м | $W$ при $E$, лк | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 20 | 30 | 50 | 75 | 100 | 150 |
| 1,3—2 | 5—10 | 10,2 | 15,3 | 25,5 | 38,2 | 51,0 | 76,4 |
| | 10—15 | 8,6 | 12,9 | 21,4 | 32,2 | 43,0 | 64,5 |
| | 15—25 | 7,2 | 10,6 | 18,0 | 27,0 | 36,0 | 54,0 |
| | 25—50 | 6,2 | 9,4 | 15,6 | 23,5 | 31,3 | 46,5 |
| | 50—150 | 5,4 | 8,1 | 13,5 | 20,2 | 27,0 | 40,4 |
| 2—3 | 5—10 | 13,0 | 19,5 | 32,5 | 48,6 | 65,0 | 97,5 |
| | 10—15 | 11,0 | 16,4 | 27,4 | 41,1 | 54,8 | 82,2 |
| | 15—25 | 9,2 | 13,7 | 22,9 | 34,5 | 45,8 | 68,6 |
| | 25—50 | 7,8 | 11,7 | 19,0 | 29,2 | 39,0 | 58,5 |
| | 50—150 | 6,0 | 9,0 | 15,0 | 22,5 | 30,0 | 45,0 |



*Таблица 5.2.9*

**Удельная мощность общего равномерного освещения для светильника типа СС-834 с лампой накаливания Г220-500-1 ($\rho_1 = 0{,}7$; $\rho_2 = 0{,}5$; $\rho_3 = 0{,}3$: $K_{зап} = 1{,}3$)**

| $h_{расч}$, м | $S$, м² | $W$, при $E$, лк | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 20 | 30 | 50 | 75 | 100 | 150 |
| 2—3 | 5—10 | 8,2 | 12,8 | 20,5 | 30,7 | 41,0 | 61,5 |
| | 10—15 | 7,0 | 10,2 | 17,5 | 26,4 | 35,0 | 52,7 |
| | 15—25 | 5,8 | 8,8 | 14,6 | 21,9 | 29,0 | 43,8 |
| | 25—50 | 5,0 | 7,7 | 12,5 | 18,7 | 25,0 | 37,7 |
| | 50—150 | 4,0 | 6,0 | 10,1 | 15,0 | 20,0 | 30,0 |
| 3—4 | 15—25 | 7,8 | 11,7 | 14,5 | 29,2 | 39,0 | 53,5 |
| | 25—50 | 6,2 | 9,3 | 15,3 | 23,5 | 31,0 | 46,5 |
| | 50—150 | 4,8 | 7,2 | 12,0 | 18,2 | 24,0 | 36,4 |
| 4—6 | 25—50 | 7,0 | 10,5 | 17,7 | 26,2 | 35,0 | 52,5 |
| | 50—150 | 5,4 | 8,1 | 13,5 | 20,2 | 27,0 | 40,5 |

*Таблица 5.2.10*

**Удельная мощность общего равномерного освещения для светильника типа СС-837 с лампой накаливания С127-60-2 ($\rho_1 = 0{,}7$; $\rho_2 = 0{,}5$; $\rho_3 = 0{,}3$; $K_{зап} = 1{,}5$)**

| $h_{расч}$, м | $S$, м | $W$ при $E$, лк | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 20 | 30 | 50 | 75 | 100 | 150 |
| 1,3—2 | 5—10 | 8,0 | 12,0 | 20,0 | 30,0 | 40,0 | 60,0 |
| | 10—15 | 7,0 | 10,5 | 17,5 | 25,0 | 35,0 | 52,5 |
| | 15—25 | 6,0 | 9,0 | 15,0 | 22,5 | 30,0 | 45,0 |
| | 25—50 | 5,2 | 7,8 | 13,0 | 19,3 | 26,0 | 39,0 |
| | 50—150 | 4,2 | 6,3 | 10,5 | 15,7 | 21,0 | 31,5 |
| 2—3 | 5—10 | 10,5 | 15,9 | 26,5 | 49,8 | 53,0 | 79,5 |
| | 10—15 | 9,0 | 13,5 | 22,3 | 38,0 | 45,0 | 67,5 |
| | 15—25 | 7,6 | 12,4 | 20,0 | 28,5 | 38,0 | 57,0 |
| | 25—50 | 6,4 | 9,6 | 16,0 | 24,0 | 32,0 | 47,0 |
| | 50—150 | 5,0 | 7,5 | 12,5 | 18,7 | 25,0 | 37,5 |

*Таблица 5.2.11*

**Удельная мощность общего равномерного освещения для светильника типа СС-838 с лампой накаливания СС220-60 ($\rho_1 = 0,7$; $\rho_2 = 0,5$; $\rho_3 = 0,3$; $K_{зап} = 1,15$)**

| $h_{расч}$, м | S, м | W при E, лк | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 20 | 30 | 50 | 75 | 100 | 150 |
| 1,3—2 | 5—10 | 10,2 | 15,3 | 25,5 | 38,2 | 51,5 | 76,5 |
| | 10—15 | 8,8 | 13,1 | 22,0 | 33,0 | 44,0 | 66,0 |
| | 15—25 | 7,2 | 10,8 | 18,0 | 26,8 | 36,0 | 54,0 |
| | 25—50 | 6,4 | 9,6 | 16,0 | 24,0 | 32,0 | 47,8 |
| | 50—150 | 5,6 | 8,4 | 14,0 | 21,0 | 28,0 | 42,4 |
| 2—3 | 5—10 | 13,0 | 19,5 | 32,5 | 48,7 | 65,0 | 97,5 |
| | 10—15 | 11,2 | 16,8 | 28,0 | 42,0 | 51,0 | 84,0 |
| | 15—25 | 9,6 | 14,4 | 24,3 | 30,0 | 48,0 | 72,0 |
| | 25—50 | 7,8 | 11,7 | 19,3 | 39,2 | 39,0 | 58,5 |
| | 50—100 | 6,4 | 9,6 | 16,0 | 24,1 | 32,0 | 48,2 |

*Таблица 5.2.12*

**Удельная мощность общего равномерного освещения для светильника типа СС-840 с лампой накаливания БК220-60-1 ($\rho_1 = 0,7$; $\rho_2 = 0,5$; $\rho_3 = 0,3$; $K_{зап} = 1,15$)**

| $h_{расч}$, м | S, м² | W при E, лк | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 20 | 30 | 50 | 75 | 100 | 150 |
| 1,3—2 | 5—10 | 8,4 | 12,9 | 21,0 | 31,5 | 42,0 | 63,0 |
| | 10—15 | 7,4 | 11,1 | 18,8 | 27,7 | 37,0 | 55,5 |
| | 15—25 | 6,2 | 9,3 | 15,3 | 23,2 | 31,0 | 46,8 |
| | 25—50 | 5,4 | 8,1 | 13,2 | 20,2 | 27,0 | 40,6 |
| | 50—150 | 4,8 | 7,1 | 12,1 | 18,0 | 24,2 | 36,0 |
| 2—3 | 5—10 | 11,6 | 17,4 | 29,0 | 43,2 | 58,0 | 87,0 |
| | 10—15 | 9,4 | 14,1 | 23,6 | 35,4 | 47,2 | 70,5 |
| | 15—25 | 8,0 | 12,0 | 19,9 | 30,0 | 40,0 | 60,0 |
| | 25—50 | 7,0 | 10,3 | 17,6 | 26,2 | 35,2 | 52,7 |
| | 50—150 | 5,4 | 8,1 | 13,5 | 20,2 | 27,0 | 40,5 |



*Таблица 5.2.13*

**Удельная мощность общего равномерного освещения для светильника типа СС-967 с лампой накаливания С220-60 ($\rho_1 = 0,5$; $\rho_2 = 0,5$; $\rho_3 = 0,1$; $K_{зап} = 1,15$)**

| $h_{расч}$, м | S, м² | W при E, лк | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 20 | 30 | 50 | 75 | 100 | 150 |
| 1,3—2 | 5—10 | 16,2 | 24,4 | 24,3 | 40,5 | 81,1 | 121,5 |
| | 10—15 | 14,2 | 14,2 | 21,1 | 35,5 | 71,1 | 106,2 |
| | 15—25 | 12,0 | 12,0 | 18,2 | 30,0 | 60,0 | 90,0 |
| | 25—50 | 10,6 | 10,5 | 15,0 | 26,5 | 53,0 | 79,6 |
| | 50—150 | 9,2 | 9,2 | 13,8 | 23,1 | 45,8 | 69,0 |
| 2—3 | 5—10 | 21,6 | 21,6 | 32,4 | 54,1 | 108,0 | 162,0 |
| | 10—15 | 18,0 | 18,0 | 27,0 | 45,0 | 90,0 | 135,0 |
| | 15—25 | 15,6 | 15,8 | 23,4 | 39,0 | 78,1 | 117,2 |
| | 25—50 | 13,0 | 13,1 | 19,5 | 32,7 | 65,2 | 97,3 |
| | 50—150 | 10,6 | 10,6 | 15,9 | 26,6 | 52,8 | 79,2 |

*Таблица 5.2.14*

**Удельная мощность общего равномерного освещения для светильников типов 10 и 11 с люминесцентными лампами ЛБ15-4 ($\rho_1 = 0,5$; $\rho_2 = 0,5$; $\rho_3 = 0,3$; $K_{зап} = 1,5$)**

| $h_{расч}$, м | S, м² | W при E, лк | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 75 | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 |
| 1,3—2 | 5—10 | 9,7 | 14,3 | 21,5 | 28,6 | 43,0 | 57,2 |
| | 10—15 | 7,9 | 12,3 | 18,5 | 24,7 | 36,9 | 49,2 |
| | 15—25 | 7,0 | 10,4 | 15,6 | 20,8 | 31,2 | 41,6 |
| | 25—50 | 6,2 | 9,2 | 13,6 | 18,5 | 27,6 | 36,9 |
| | 50—150 | 5,3 | 7,9 | 11,8 | 15,8 | 23,7 | 31,6 |
| 2—3 | 5—10 | 11,7 | 18,8 | 28,2 | 37,6 | 56,4 | 75,2 |
| | 10—15 | 10,7 | 16,2 | 24,5 | 32,4 | 48,6 | 64,8 |
| | 15—25 | 9,1 | 13,2 | 19,9 | 26,4 | 39,6 | 52,7 |
| | 25—50 | 7,5 | 11,3 | 17,0 | 22,6 | 33,9 | 45,2 |
| | 50—150 | 6,1 | 9,2 | 13,5 | 18,3 | 27,6 | 36,9 |

*Таблица 5.2.15*

**Удельная мощность общего равномерного освещения для светильников типа СС-100 с люминесцентной лампой ЛБ15 ($\rho_1 = 0,5$; $\rho_2 = 0,5$; $\rho_3 = 0,1$; $K_{зап} = 1,5$)**

| $h_{расч}$, м | $S$, м² | $W$ при $E$, лк | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 75 | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 |
| 1,3—2 | 5—10 | 9,3 | 12,4 | 18,6 | 24,8 | 37,2 | 49,6 |
| | 10—15 | 7,9 | 10,5 | 15,7 | 21,0 | 31,5 | 42,0 |
| | 15—25 | 6,8 | 8,9 | 13,4 | 17,8 | 26,7 | 35,6 |
| | 25—50 | 5,8 | 7,9 | 11,8 | 15,9 | 23,7 | 31,6 |
| | 50—150 | 5,3 | 7,1 | 10,6 | 14,2 | 21,3 | 28,4 |
| 2—3 | 5—10 | 11,7 | 15,6 | 23,4 | 31,2 | 46,8 | 62,4 |
| | 10—15 | 10,2 | 13,5 | 20,2 | 27,0 | 40,4 | 54,0 |
| | 15—25 | 8,6 | 11,4 | 17,2 | 22,8 | 34,2 | 45,6 |
| | 25—50 | 7,4 | 9,7 | 14,6 | 19,4 | 29,1 | 38,8 |
| | 50—150 | 6,2 | 8,2 | 12,4 | 16,4 | 24,6 | 32,8 |

*Таблица 5.2.16*

**Удельная мощность общего равномерного освещения для светильника типа СС-104 с люминесцентной лампой ЛБ15 ($\rho_1 = 0,7$; $\rho_2 = 0,5$; $\rho_3 = 0,3$; $K_{зап} = 1,5$)**

| $h_{расч}$, м | $S$, м² | $W$ при $E$, лк | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 75 | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 |
| 1,3—2 | 5—10 | 7,2 | 9,6 | 14,4 | 19,2 | 28,8 | 38,6 |
| | 10—15 | 6,5 | 8,7 | 13,0 | 17,4 | 26,1 | 34,9 |
| | 15—25 | 5,3 | 7,1 | 10,6 | 14,3 | 21,3 | 28,3 |
| | 25—50 | 4,7 | 6,3 | 9,4 | 12,6 | 18,9 | 25,2 |
| | 50—150 | 4,1 | 5,5 | 8,2 | 11,0 | 16,5 | 22,0 |
| 2—3 | 5—10 | 9,3 | 12,4 | 18,6 | 24,8 | 37,2 | 49,6 |
| | 10—15 | 7,8 | 10,5 | 15,8 | 21,0 | 31,5 | 42,1 |
| | 15—25 | 6,9 | 9,6 | 13,8 | 18,4 | 27,6 | 36,8 |
| | 25—50 | 5,9 | 7,9 | 11,8 | 15,8 | 23,7 | 31,6 |
| | 50—150 | 4,6 | 6,1 | 9,2 | 12,2 | 18,3 | 24,8 |



*Таблица 5.2.17*

**Удельная мощность общего равномерного освещения для светильника типа СС-109 с люминесцентной лампой ЛБ15 ($\rho_1 = 0,7$; $\rho_2 = 0,5$; $\rho_3 = 0,3$; $K_{зап} = 1,5$)**

| $h_{расч}$, м | $S$, м² | $W$ при $E$, лк | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 75 | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 |
| 1,3—2 | 5—10 | 6,9 | 9,2 | 13,8 | 18,4 | 27,6 | 36,8 |
| | 10—15 | 5,9 | 7,9 | 11,8 | 15,8 | 23,7 | 31,6 |
| | 15—25 | 5,1 | 6,8 | 10,2 | 13,6 | 20,4 | 27,2 |
| | 25—50 | 4,5 | 6,0 | 9,0 | 12,0 | 18,0 | 24,0 |
| | 50—150 | 4,1 | 5,5 | 8,2 | 11,0 | 16,5 | 22,0 |
| 2—3 | 5—10 | 9,1 | 12,1 | 18,2 | 24,2 | 36,2 | 48,4 |
| | 10—15 | 7,7 | 10,3 | 15,4 | 20,6 | 30,9 | 41,2 |
| | 15—25 | 6,4 | 8,5 | 12,8 | 17,0 | 25,5 | 34,0 |
| | 25—50 | 5,4 | 7,2 | 10,8 | 14,4 | 21,6 | 28,8 |
| | 50—150 | 4,4 | 5,9 | 8,8 | 11,8 | 17,7 | 23,6 |

*Таблица 5.2.18*

**Количество светильников и мощность ламп для помещений площадью до 5 м²**

| $S$, м² | При $E$, лк | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10—15 | | 20 | | 30 | | 50 | |
| | $n$ | $P_л$ | $n$ | $P_л$ | $n$ | $P_л$ | $n$ | $P_л$ |
| 1—3 | 1 | 25 | 1 | 40 | 1 | 60 | 2 | 40 |
| 3—5 | 1 | 40 | 1 | 60 | 2 | 40 | 2 | 60 |

Примечание. Таблица составлена применительно к светильникам типов СС-328, СС-837, СС-839 с учетом средних коэффициентов отражения.

Ориентировочное значение $\varphi$ может быть определено из табл. 5.2.4 при $h_{расч} = 4,2$ м; $a/b = 1,6$ и $S = 10$ м². Учитывая окраску заданного помещения, принимаем $\rho_1 = 70\%$, $\rho_2 = 50\%$, $\rho_3 = 30\%$. По табл. 5.2.2 определяем коэффициент использования осветительной установки для светильника типа СС-104 $U_{о.у} = 0,27$ (среднее промежуточное значение при $\varphi = 0,7$).

По формуле (5.2.5) требуемое количество светильников составит:

$$N = \frac{100 \cdot 1,3 \cdot 10}{4 \cdot 700 \cdot 0,27} = 1,72.$$

При $K_{зап} = 1,3$ (из табл. 5.1.7) и $Z = 1$ (нормируется средняя освещенность) принимаются к установке два светильника типа СС-104.

Ориентировочное число светильников может быть также найдено по упрощенной формуле (5.2.8) при коэффициенте $c$, определяемом по табл. 5.2.5 ($c = 24$ при $Z = 1{,}2$ и $c = 20$ при $Z = 1$),

$$N = \frac{20 \cdot 10}{100 \cdot 4 \cdot 0{,}27} \approx 1{,}8.$$

## § 5.2.4. ТОЧЕЧНЫЙ МЕТОД

Точечный метод дает возможность определить освещенность в заданной точке освещаемой поверхности, расположенной любым образом.

Пусть данная точка освещается несколькими светильниками, расположение которых известно, а в каждом светильнике установлена лампа с условным потоком 1000 лм. Суммарная условная освещенность в точке от нескольких ближайших светильников обозначается через $\Sigma e$; влияние удаленных светильников и отраженного света приближенно учитывается коэффициентом $\mu$ ($\mu \geqslant 1$). Таким образом, в каждом светильнике должна быть установлена лампа с потоком

$$F_л = \frac{EK_{зап} \cdot 1000}{n\mu \Sigma e}. \qquad (5.2.14)$$

Значения коэффициента $\mu$ лежат в пределах от 1—1,05 (для светильников прямого света; расчетная точка удалена от стен) до 1,25—1,3 (для светильников преимущественно прямого света; светлые отражающие поверхности или точка находятся вблизи переборки; много удаленных светильников).

Следовательно, истинное значение освещенности в намеченной точке определяется по формуле

$$E = \frac{nF_л \mu \Sigma e}{1000K_{зап}}. \qquad (5.2.15)$$

Точечный метод справедлив при любом расположении рабочей поверхности и светильников, но при условии, что отраженный свет существенной роли не играет, т. е. светильники должны быть прямого или преимущественно прямого светораспределения.

Для локализованного и наружного освещения, для больших и ответственных помещений, таких как машинно-котельное отделение, точечный метод расчета наиболее предпочтителен, поскольку он дает возможность проанализировать распределение освещенности по площади помещения.

Условная горизонтальная освещенность $e$ от выбранного типа светильника определяется по пространственным изолюксам.

В качестве примера приведем изолюксы для светильников типа СС-839 с лампами накаливания (рис. 5.2.2) и типа СС-755 с люминесцентными лампами (рис. 5.2.3).

**Пример.** Рассчитать освещенность кабинета капитана со следующими данными: $S = 4 \cdot 3$ м$^2$; $h = 2{,}5$ м; $\rho_1 = 0{,}7$; $\rho_2 = 0{,}5$; $\rho_3 = 0{,}5$; $K_{зап} = 1{,}5$; расчетная плоскость расположена горизонтально на уровне 0,8 м от палубы, поэтому $h_{расч} = 2{,}5 - 0{,}8 = 1{,}7$ м.

Предварительно задаемся четырьмя светильниками типа СС-755 с четырьмя ЛЛ типа ЛТБ-15-4 и размещением светильников на плане, показанном на рис. 5.2.4.

Определяем расстояния $d$ от расчетных точек *1—4* до перпендикуляров светового центра светильников *I—IV* на расчетную плоскость:

$$d_{1I} = 1{,}25 \quad d_{2I} = 2{,}8; \quad d_{3I} = 1{,}0; \quad d_{4I} = 1{,}5;$$
$$d_{1II} = 1{,}25 \quad d_{2II} = 1{,}0; \quad d_{3II} = 1{,}0; \quad d_{4II} = 2{,}5;$$
$$d_{1III} = 1{,}25 \quad d_{2III} = 1{,}0; \quad d_{3III} = 1{,}8; \quad d_{4III} = 2{,}0;$$
$$d_{1IV} = 1{,}25 \quad d_{2IV} = 2{,}8; \quad d_{3IV} = 1{,}8; \quad d_{4IV} = 0.$$



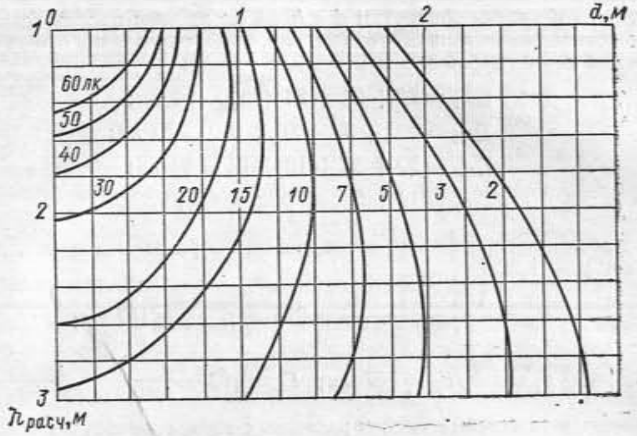



Рис. 5.2.2. Изолюксы условной горизонтальной освещенности светильника типа СС-839.

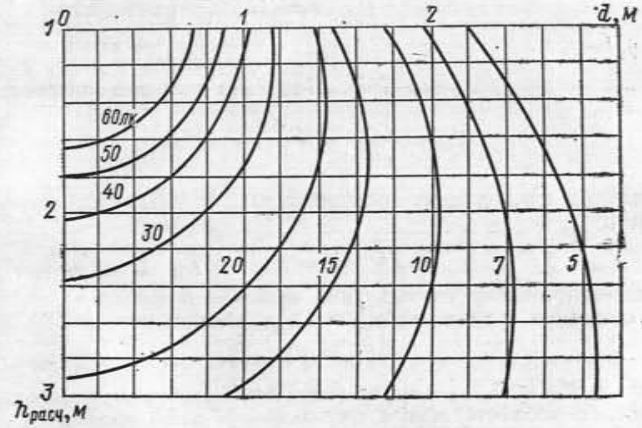



Рис. 5.2.3. Изолюксы условной горизонтальной освещенности светильника типа СС-755.

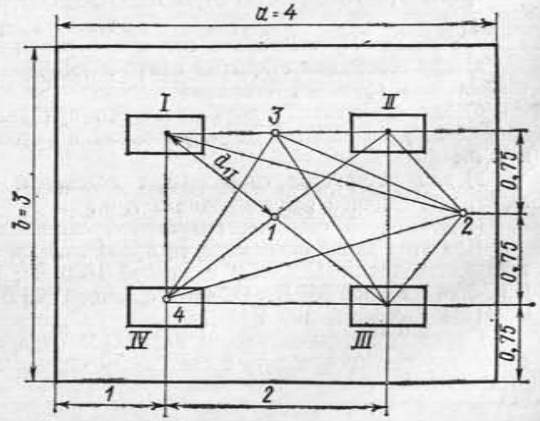



Рис. 5.2.4. Расположение светильников к расчету освещенности точечным методом.

Согласно найденным значениям $d$ и $h_{расч}$ по кривым пространственных изолюксов для светильника типа СС-755 (см. рис. 5.2.3) определяем суммарные условные значения освещенностей в намеченных точках:

$$\Sigma e_1 = 24 + 24 + 24 + 24 = 96 \text{ лк};$$
$$\Sigma e_2 = 5{,}0 + 30 + 30 + 5{,}0 = 70 \text{ лк};$$
$$\Sigma e_3 = 30 + 30 + 12 + 12 = 84 \text{ лк};$$
$$\Sigma e_4 = 17 + 5 + 9 + 55 = 86 \text{ лк}.$$

Находим истинные значения освещенностей в расчетных точках по формуле (5.2.15) при $\mu = 1{,}2$:

$$E_1 = \frac{4 \cdot 7000 \cdot 1{,}2 \cdot 96}{1000 \cdot 1{,}5} = 215 \text{ лк}; \quad E_2 = 157 \text{ лк};$$

$$E_3 = 187 \text{ лк}; \quad E_4 = 192 \text{ лк}.$$

После подсчета освещенности в расчетных точках вычисляем среднее значение освещенности в помещении по формуле

$$E_{ср} = \frac{\sum E}{m}, \qquad (5.2.16)$$

где $m$ — количество расчетных точек. Подставив числовые значения, получаем:

$$E_{ср} = \frac{\sum E}{m} = \frac{751}{4} = 187 \text{ лк}.$$

Таким образом, средняя освещенность больше нормируемой (см. табл. 5.1.6):

$$E_{ср} > E_{норм} = 150 \text{ лк},$$

и, следовательно, выбор светильников произведен правильно.

При сравнении полученной $E_{ср}$ и $E_{норм}$ должны иметь

$$E_{ср} \gg E_{норм}. \qquad (5.2.17)$$

В случае $E_{ср} < E_{норм}$ следует увеличить количество светильников, ламп или единичную мощность ламп в светильнике и затем произвести поверочный расчет указанным методом.

## § 5.2.5. ПРОЖЕКТОРНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

Прожекторное освещение рекомендуется:

а) для освещения открытых палуб и забортных пространств в период швартовных или грузовых операций;

б) для освещения водной акватории при аварийно-спасательных работах, проводке судна за ледоколом, плавании в условиях ограниченной видимости и т. п.;

в) для устройства специальных подсветок: названия судна, эмблемы и герба, праздничной иллюминации и т. п.;

г) для целей световой визуальной сигнализации.

Для этих целей используются прожекторы и светильники преимущественно следующих типов: ПЗС-45М с лампой 1000 Вт; ПНК-60-1 с лампой 5000 Вт; ПЗС-35М с лампой 500 Вт; СС-410М с лампой 500 Вт; МСПл45/2 с лампой 1000 Вт; СС-411М с лампой 300 Вт.

Определение освещенности на палубе от прожекторов заливающего света рекомендуется производить в следующем порядке:



1. В масштабе построить схему расположения прожектора относительно расчетной плоскости $РП$ (рис. 5.2.5) и определить координаты расположения точки возможного минимума освещенности $M$ $(x, y)$; построение осей $x$ и $y$ выполнить, как показано на рис. 5.2.5, при этом ось $x$ — направление вдоль проекции оптической оси прожектора; ось $y$ — перпендикуляр к оси $x$.

Определить расчетную высоту подвеса $h$ и угол наклона оптической оси прожектора $\theta$.

2. Из табл. 5.2.19 для вычисленных значений $x/h$ и $\theta$ определить величины $\xi$, $\rho$ и $\rho^3$.

3. Вычислить координату $\eta$ по следующей формуле:

$$\eta = \frac{y}{\rho h}. \qquad (5.2.18)$$

4. По значениям $\xi$ и $\eta$, являющимся координатами на условной плоскости, перпендикулярной к оптической оси прожектора, определить относительную освещенность $E$ по кривым изолюкс (рис. 5.2.6).

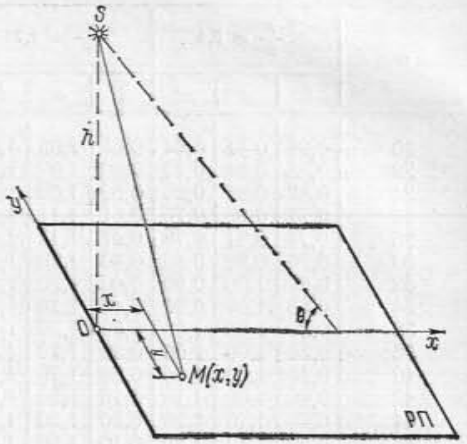



Рис. 5.2.5. К расчету освещенности от прожекторов заливающего света.

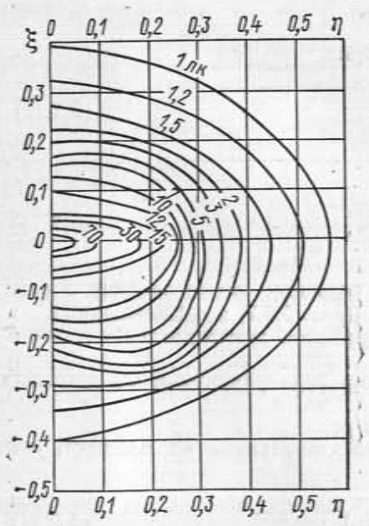



Рис. 5.2.6. Изолюксы на условной плоскости прожектора типа ПЗС-35М. (У кривых указаны килолюксы).

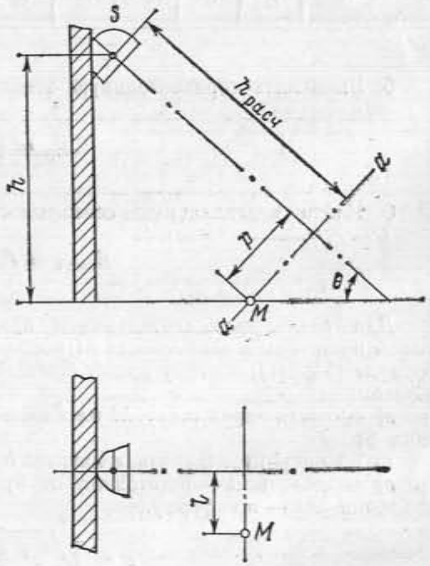



Рис. 5.2.7. К расчету освещенности от салинговых светильников.

**Значения вспомогательных величин**

| θ | $\frac{x}{h}=0{,}5$ | | | $\frac{x}{h}=0{,}75$ | | | $\frac{x}{h}=1{,}0$ | | | $\frac{x}{h}=1{,}25$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ξ | ρ | $\rho^3$ | ξ | ρ | $\rho^3$ | ξ | ρ | $\rho^3$ | ξ | ρ | $\rho^3$ |
| 20 | 0,95 | 0,81 | 0,54 | 0,65 | 1,05 | 1,07 | 0,47 | 1,28 | 2,10 | 0,44 | 1,17 | 1,62 |
| 22 | 0,88 | 0,84 | 0,59 | 0,60 | 1,07 | 1,22 | 0,42 | 1,30 | 2,20 | 0,40 | 1,16 | 1,55 |
| 24 | 0,82 | 0,86 | 0,65 | 0,57 | 1,09 | 1,31 | 0,38 | 1,33 | 2,30 | 0,26 | 1,55 | 3,72 |
| 26 | 0,77 | 0,89 | 0,70 | 0,51 | 1,11 | 1,38 | 0,37 | 1,34 | 2,39 | 0,22 | 1,56 | 3,80 |
| 28 | 0,74 | 0,91 | 0,76 | 0,47 | 1,13 | 1,44 | 0,30 | 1,35 | 2,47 | 0,19 | 1,57 | 3,90 |
| 30 | 0,70 | 0,90 | 0,80 | 0,40 | 1,20 | 1,50 | 0,30 | 1,40 | 2,60 | 0,20 | 1,60 | 3,90 |
| 32 | 0,60 | 1,00 | 0,90 | 0,40 | 1,20 | 1,60 | 0,20 | 1,40 | 2,60 | 0,10 | 1,60 | 4,00 |
| 34 | 0,60 | 1,00 | 0,90 | 0,40 | 1,20 | 1,60 | 0,20 | 1,40 | 2,70 | 0,10 | 1,60 | 4,00 |
| 36 | 0,50 | 1,00 | 1,00 | 0,30 | 1,20 | 1,70 | 0,20 | 1,40 | 2,70 | 0 | 1,60 | 4,10 |
| 38 | 0,50 | 1,00 | 1,00 | 0,30 | 1,20 | 1,80 | 0,10 | 1,40 | 2,80 | 0 | 1,60 | 4,20 |
| 40 | 0,40 | 1,00 | 1,00 | 0,20 | 1,20 | 1,80 | 0,10 | 1,40 | 2,80 | 0 | 1,60 | 4,10 |
| 42 | 0,40 | 1,00 | 1,10 | 0,20 | 1,20 | 1,90 | 0,10 | 1,40 | 2,80 | 0 | 1,60 | 4,00 |
| 44 | 0,40 | 1,10 | 1,20 | 0,20 | 1,20 | 1,90 | 0,9 | 1,40 | 2,80 | 0,10 | 1,60 | 4,00 |
| 46 | 0,30 | 1,10 | 1,20 | 0,10 | 1,20 | 1,90 | 0,6 | 1,40 | 2,80 | 0,10 | 1,60 | 3,90 |
| 48 | 0,30 | 1,10 | 1,20 | 0,10 | 1,30 | 2,00 | 0,10 | 1,40 | 2,80 | 0,10 | 1,60 | 3,90 |
| 50 | 0,20 | 1,10 | 1,30 | 0,10 | 1,30 | 2,00 | 0,10 | 1,40 | 2,80 | 0,20 | 1,60 | 3,80 |
| 52 | 0,20 | 1,10 | 1,30 | 0 | 1,30 | 2,00 | 0,10 | 1,40 | 2,80 | 0,20 | 1,60 | 3,80 |
| 54 | 0,20 | 1,10 | 1,30 | 0 | 1,30 | 2,00 | 0,20 | 1,40 | 2,70 | 0,30 | 1,60 | 3,70 |
| 56 | 0,10 | 1,10 | 1,40 | 0,10 | 1,30 | 2,00 | 0,20 | 1,40 | 2,70 | 0,30 | 1,50 | 3,60 |
| 58 | 0,10 | 1,10 | 1,40 | 0,10 | 1,30 | 2,00 | 0,20 | 1,40 | 2,60 | | | |
| 60 | 0,10 | 1,10 | 1,40 | 0,10 | 1,30 | 2,00 | | | | | | |

5. Вычислить горизонтальную освещенность:

$$E_{\text{гор}} = \frac{E}{h^2\rho^3}. \qquad (5.2.19)$$

6. Найти вертикальную освещенность:

$$E_{\text{верт}} = E_{\text{гор}}\frac{x}{h}. \qquad (5.2.20)$$

Для салинговых светильников кривые условных освещенностей — изолюксы построены в зависимости от координат $p$ (рис. 5.2.7) и $d$ [вычисляется по формуле (5.2.21)], поэтому расчет освещенности рекомендуется вести следующим образом:

а) провести через точку $M$ плоскость $aa$, перпендикулярную к оси светильника $S$;

б) по рисунку измерить величины $h_{\text{расч}}$ и $p$;

в) вычислить $d$ — расстояние от проекции светильника на плоскость $aa$ до точки $M$ — по формуле

$$d = \sqrt{p^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}; \qquad (5.2.21)$$

г) в соответствии с измеренным $h_{\text{расч}}$ и вычисленным $d$ по кривым пространственных изолюкс (рис. 5.2.8) определить условную горизонтальную освещенность $e$, лк;



*Таблица 5.2.19*

**для расчета прожекторного освещения**

| $\frac{x}{h}=1{,}5$ | | | $\frac{x}{h}=1{,}75$ | | | $\frac{x}{h}=2{,}0$ | | | $\frac{x}{h}=2{,}5$ | | | $\frac{x}{h}=3{,}0$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ξ | ρ | $\rho^3$ | ξ | ρ | $\rho^3$ | ξ | ρ | $\rho^3$ | ξ | ρ | $\rho^3$ | ξ | ρ | $\rho^3$ |
| 0,25 | 1,8 | 5,3 | 0,17 | 1,98 | 7,80 | 0,12 | 2,2 | 11,0 | 0,04 | 2,7 | 19,0 | 0,03 | 3,2 | 32,0 |
| 0,21 | 1,8 | 5,6 | 0,14 | 2,00 | 7,95 | 0,08 | 2,2 | 11,0 | 0,01 | 2,7 | 19,0 | 0,06 | 3,2 | 31,0 |
| 0,17 | 1,8 | 5,6 | 0,10 | 2,00 | 8,00 | 0,01 | 2,2 | 11,0 | 0,04 | 2,7 | 19,0 | 0,10 | 3,1 | 31,0 |
| 0,14 | 1,8 | 5,7 | 0,01 | 2,20 | 11,0 | 0,08 | 2,2 | 11,0 | 0,08 | 2,7 | 19,0 | 0,14 | 3,1 | 31,0 |
| 0,10 | 1,8 | 5,7 | 0,03 | 2,00 | 8,24 | 0,03 | 2,2 | 11,0 | 0,11 | 2,7 | 19,0 | 0,17 | 3,1 | 30,0 |
| 0,10 | 1,8 | 5,9 | 0 | 1,80 | 6,00 | 0,10 | 2,2 | 11,0 | 0,10 | 2,7 | 19,0 | 0,20 | 3,1 | 30,0 |
| 0 | 1,8 | 5,9 | 0 | 2,10 | 9,30 | 0,10 | 2,2 | 11,0 | 0,20 | 2,7 | 18,2 | 0,20 | 3,1 | 29,0 |
| 0 | 1,8 | 5,9 | 0,10 | 2,10 | 9,30 | 0,10 | 2,2 | 11,0 | 0,20 | 2,6 | 18,0 | 0,30 | 3,1 | 28,0 |
| 0 | 1,8 | 5,8 | 0,10 | 2,00 | 8,00 | 0,20 | 2,2 | 11,0 | 0,30 | 2,6 | 17,9 | 0,30 | 3,0 | 27,5 |
| 0,10 | 1,8 | 5,8 | 0,20 | 2,00 | 8,00 | 0,20 | 2,2 | 11,0 | 0,30 | 2,6 | 17,0 | 0,40 | 3,0 | 26,6 |
| 0,10 | 1,8 | 5,7 | 0,20 | 2,00 | 7,80 | 0,20 | 2,2 | 10,0 | 0,30 | 2,6 | 17,0 | 0,40 | 3,0 | 25,5 |
| 0,10 | 1,8 | 5,6 | 0,30 | 2,00 | 7,50 | 0,30 | 2,2 | 9,8 | 0,40 | 2,5 | 16,0 | 0,40 | 2,9 | 24,5 |
| 0,20 | 1,8 | 5,5 | 0,30 | 1,90 | 7,30 | 0,30 | 2,1 | 9,6 | 0,40 | 2,5 | 15,0 | 0,50 | 2,9 | 23,0 |
| 0,20 | 1,8 | 5,3 | 0,30 | 1,90 | 7,10 | 0,40 | 2,1 | 9,2 | 0,50 | 2,5 | 14,8 | 0,50 | 2,8 | 21,0 |
| 0,30 | 1,7 | 5,2 | 0,40 | 1,90 | 7,00 | 0,40 | 2,1 | 8,9 | 1,00 | 2,4 | 14,0 | 0,60 | 2,8 | 20,9 |
| 0,30 | 1,7 | 5,1 | 0,40 | 1,90 | 6,80 | 0,40 | 2,1 | 8,6 | 1,10 | 2,4 | 13,0 | 0,60 | 2,7 | 19,2 |
| 0,30 | 1,7 | 5,0 | 0,50 | 1,90 | 6,50 | 0,50 | 2,0 | 8,3 | 1,10 | 2,3 | 13,0 | | | |
| 0,40 | 1,7 | 4,8 | 0,50 | 1,80 | 6,40 | 0,50 | 2,0 | 7,8 | | | | | | |
| 0,40 | 1,7 | 4,6 | | | | | | | | | | | | |

д) вычислить действительную освещенность в точке $M$ по формуле

$$E_{\text{д}} = \frac{Neh}{K_{\text{зап}}h_{\text{расч}}}, \qquad (5.2.22)$$

где $N$ — количество светильников в одной точке; $h$ и $h_{\text{расч}}$ — фактическая и расчетная высоты.

**Пример 1.** Определить освещенность, создаваемую одним прожектором типа ПЗС-35М с лампой ПЖ127-500 на палубе в точке с координатами $x = 20$ м; $y = 5$ м; высота установки прожектора $h = 16$ м; угол наклона его оптической оси $\theta = 50°$.

Р а с ч е т. 1) Вычислить отношение

$$\frac{x}{h} = \frac{20}{16} = 1{,}25;$$

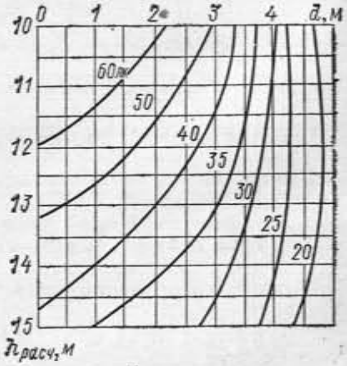



Рис. 5.2.8. Изолюксы условной горизонтальной освещенности светильника типа СС-410М.

2) из табл. 5.2.19 для полученного значения $x/h$ и угла $\theta$ найти значения вспомогательных величин: $\xi = 0{,}2$; $\rho = 1{,}6$; $\rho^3 = 3{,}8$;

3) определить величину $\eta$ по формуле (5.2.18):

$$\eta = \frac{5}{1{,}6 \cdot 16} = 0{,}195;$$

4) по кривым изолюкс прожектора ПЗС-35М (см. рис. 5.2.6) определить значение относительной освещенности:

$$e = 2 \cdot 10^3 \text{ лк};$$

5) освещенность точки в горизонтальной плоскости вычислить по формуле (5.2.19):

$$E_{\text{гор}} = \frac{2 \cdot 10^3}{16^2 \cdot 3{,}8} = 2{,}1 \text{ лк};$$

6) освещенность точки в вертикальной плоскости определить по формуле (5.2.20):

$$E_{\text{верт}} = 2{,}1 \cdot 1{,}25 = 2{,}6 \text{ лк}.$$

**Пример 2.** Определить освещенность на палубе в точке $M$ (см. рис. 5.2.7) от салингового светильника типа СС-410М, установленного на высоте 11 м над палубой. Угол наклона оптической оси светильника $\theta = 45°$. Точка $M$ находится на расстоянии 2 м от вертикальной плоскости, проходящей через оптическую ось светильника, т. е. $l = 2$ м.

Расчет. 1) Из чертежа, выполненного в масштабе, определить $h_{\text{расч}} = 12{,}0$ м; $p = 4$ м;

2) вычислить расстояние $d$ от проекции светильника на плоскость $aa$ до точки $M$ по формуле (5.2.21):

$$d = \sqrt{4^2 + \left(\frac{2}{2}\right)^2} = 4{,}15 \text{ м};$$

3) по кривым пространственных изолюкс светильника типа СС-410М (см. рис. 5.2.8) согласно значениям $d$ и $h_{\text{расч}}$ определить условную горизонтальную освещенность точки $M$: $E = 28$ лк (по промежуточной изолюксе между кривыми 25 и 30 лк);

4) действительную освещенность в точке $M$ вычислить по формуле (5.2.22):

$$E_{\text{д}} = \frac{1 \cdot 28 \cdot 11}{1{,}3 \cdot 12} = 20 \text{ лк}.$$

# УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ


1. Аналитический расчет токов и напряжений в некоторых режимах работы судовых электростанций по формулам, выведенным из уравнений Горева—Парка./А. А. Азовцев, О. Н. Климанов, А. Я. Котовщиков, Л. Н. Токарев. — Труды/ЦНИИМФ, 1969, вып. 109, с. 20—35.
2. Басин А. М., Минкович И. Я. Теория и расчет гребных винтов. Л., Судпромгиз, 1963.
3. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М., Наука, 1975.
4. Болотин Б. И., Вайнер В. Л. Инженерные методы расчета устойчивости судовых автоматизированных электростанций. Л., Судостроение, 1974.
5. Васильев Д. В., Михайлов В. А., Норневский Б. И. Примеры и задачи по расчету судовых автоматизированных систем. Л., Судостроение, 1973.
6. Васильев Д. В., Чуич В. Г. Системы автоматического управления. М., Высшая школа, 1967.
7. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М., Высшая школа, 1970.
8. Веников В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). М., Высшая школа, 1970.
9. Веретенников Л. П. Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах. Теория и методы. Л., Судостроение, 1975.
10. Веретенников Л. П., Потапкин А. И., Раимов М. М. Моделирование, вычислительная техника и переходные процессы в СЭС. Л., Судостроение, 1964.
11. Веретенников Л. П., Раимов М. М. Исследование устойчивости малого синхронного генератора, работающего на сеть. — Электромеханика, 1962, № 7, с. 796.
12. Веретенников Л. П., Ясаков Г. С. Вопросы синтеза автономных электроэнергетических систем по условию качества переходных процессов. — Электричество, 1977, № 10, с. 7—13.
13. Вилесов Д. В., Рябинин И. А. Судовые самовозбуждающиеся синхронные генераторы. Л., Воениздат, 1962.
14. Вирьянский З. Я., Пиневский Н. М. Стратегия проектирования сложных систем. Л., Судостроение, 1978.
15. Горев А. А. Избранные труды по вопросам устойчивости электрических систем. Л., изд. ГЭИ, 1960.
16. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины. Л., изд. ГЭИ, 1950.

17. ГОСТ 7866.1—76. Кабели судовые с резиновой изоляцией в резиновой или свинцовой оболочке. М., Изд-во стандартов, 1976.
18. ГОСТ 7866.2—76. Кабели судовые с резиновой изоляцией в оболочке из поливинилхлоридного пластиката. М., Изд-во стандартов, 1976.
19. ГОСТ 7866.3—76. Кабели с изоляцией из кремнийорганической резины или радиационно-сшитого полиэтилена в оболочке из поливинилхлоридного пластиката. М., Изд-во стандартов, 1976.
20. Губинский А. И., Евграфов В. Г. Эргономическое проектирование судовых систем управления. Л., Судостроение, 1977.
21. Гребные электрические установки: Справочник/Ю. Н. Авик, Е. Б. Айзенштадт, Ю. М. Гилерович, Б. А. Горбунов, В. В. Сержантов. Л., Судостроение, 1975.
22. Жданов П. С. Устойчивость электрических систем. Л., изд. ГЭИ, 1948.
23. Зубарев Ю. Я., Норневский Б. И. Эффективность судовых автоматизированных систем. Л., Судостроение, 1975.
24. Китаенко Г. И. Влияние емкости на безопасность и другие характеристики судовых сетей. — Судостроение, 1966, № 1, с. 51.
25. Китаенко Г. И. О судовых заземлениях и грозозащитных устройствах. Л., Машгиз, 1953.
26. Китаенко Г. И. Судовые электроэнергетические системы повышенных параметров. Л., Судостроение, 1970.
27. Климанов О. Н., Токарев Л. Н., Толчеев В. Н. Особенности математического описания параллельной работы при исследовании колебаний мощности генераторов. — Труды/ЦНИДИ, 1968, вып. 56, с. 171—188.
28. Климанов О. Н., Токарев Л. Н., Толчеев В. Н. Расчет напряжений и токов синхронного генератора с помощью уравнений Горева—Парка. — Электричество, 1968, № 1, с. 36—39.
29. Князевский Б. А. Охрана труда в электроустановках. М., 1977.
30. Коваленко В. П. Автоматическое регулирование возбуждения и устойчивость судовых синхронных генераторов. Л., Судостроение, 1976.
31. Константинов В. И. Системы и устройства автоматизации судовых электроэнергетических установок. Л., Судостроение, 1972.
32. Костенко М. П. Электрические машины. Специальная часть. М.—Л., изд. ГЭИ, 1949.
33. Логика. Автоматы. Алгоритм./М. А. Айзерман, Л. А. Гусев, Л. И. Розоноэр, И. М. Смирнова, А. А. Толь. М., Физматгиз, 1963.
34. Максимов Б. К., Обух А. А. Статическое электричество в промышленности и защита от него. Л., Энергия, 1978.
35. Мелешкин Г. А. Генераторные установки отбора мощности на судах. Л., Судостроение, 1967.
36. Мелешкин Г. А. Переходные режимы судовых электроэнергетических систем. Л., Судостроение, 1971.
37. Мелешкин Г. А. Судовые синхронные генераторы с автоматическим регулированием напряжения. Л., Судостроение, 1962.
38. Михайлов В. А. Автоматизированные электроэнергетические системы судов. Л., Судостроение, 1977.
39. Никифоровский Н. Н. Электроснабжение судов с берега от системы с заземленной нейтралью. — Судостроение, 1970, № 6. с. 34.
40. Основы проектирования гребных электрических установок/Н. А. Кузнецов, П. В. Куропаткин, А. Б. Хайкин, Н. М. Хомяков. Л., Судостроение, 1972.
41. О молниезащите крупнотоннажных танкеров/Г. И. Китаенко, В. А. Курилов, В. С. Семенов, Г. Н. Смирнов, В. С. Аносов. — Судостроение, 1973, № 1, с. 6.
42. ОСТ 5.6109—77. Устройства грозозащитные и заземления для снятия зарядов статического электричества с металлических конструкций и деталей. Л., 1977.
43. Петров Ю. П. Вариационные методы оптимального управления. М.—Л., Энергия, 1965.
44. Полонский В. И. Судовые электроприводы. М., Морской транспорт, 1952.
45. Полонский В. И. Гребные электрические установки. М., Морской транспорт, 1958.



46. Попов Е. П., Пальтов Н. П. Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем. М., Физматгиз, 1960.
47. Пошерстник М. Ю., Салютина М. А. Справочник по судовым кабелям и проводам. Л., Судостроение, 1966.
48. Пошерстник М. Ю., Салютина М. А. Тепловой расчет судовых кабелей. Л., Судостроение, 1964.
49. Регистр СССР. Правила классификации и постройки морских судов. Т. 2, ч. XI. Л., Транспорт, 1977.
50. Речной Регистр РСФСР. Правила классификации и постройки судов внутреннего плавания. Ч. IX. М., Транспорт, 1975.
51. Рукавишников С. Б. Автоматизированные гребные электрические установки. Л., Судостроение, 1976.
52. Рябинин И. А., Киреев Ю. Н. Надежность судовых электроэнергетических систем и судового электрооборудования. Л., Судостроение, 1974.
53. Солодовников В. В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. М., Физматгиз, 1960.
54. Солодовников Г. С. Электробезопасность при работе на судах и под водой. Л., Судостроение, 1971.
55. Способ повышения молниезащищенности крупнотоннажных танкеров/Г. И. Китаенко, В. А. Курилов, В. С. Семенов, Г. Н. Смирнов, В. С. Аносов. — Судостроение, 1974, № 1, с. 38.
56. Справочник судового электротехника. Т т. 1. Л., Судостроение, 1975.
57. Справочник электромонтажника. Т т. 1. Л., Судпромгиз, 1952—1953.
58. Справочное пособие по теории систем автоматического регулирования и управления/Под ред. Е. А. Санковского. Минск, Вышэйшая школа, 1973.
59. Супрун Г. Ф. Синтез систем электроэнергетики судов. Л., Судостроение, 1972.
60. Токарев Л. Н. Устройство автоматического распределения активной нагрузки судовых синхронных генераторов. — Судостроение, 1963, № 5, с. 31—35.
61. Топорков В. П. Переходные процессы в ЭСК. Статическая устойчивость. Л., изд. ВМА, 1977.
62. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.—Л., Энергия, 1970.
63. Федосеев А. М. Основы релейной защиты. М.—Л., изд. ГЭИ, 1961.
64. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М., Наука, 1966.
65. Финагин В. И. Автоматическое формирование на ЦВМ алгоритмов расчета процесса короткого замыкания для автономной энергосистемы произвольной структуры. В кн.: Сборник НТО им. акад. А. Н. Крылова. Л., 1976, вып. 232, с. 65—71.
66. Фрейдзон И. Р. Судовые автоматизированные электроприводы и системы. Л., Судостроение, 1967.
67. Хайкин А. Б. Динамика гребных электрических установок. Л., Морской транспорт, 1962.
68. Решение комиссии по установлению критериев безопасности электрического тока. — Электричество, 1967, № 10, с. 85—86.
69. Цыпкин Я. З. Теория линейных импульсных систем. М., Физматгиз, 1963.
70. Черкасов В. Н. Защита взрывоопасных сооружений от молнии и статического электричества. Л., Стройиздат, 1973.
71. Электротехнический справочник/Под ред. профессоров МЭИ. Изд. 5-е. Т. 2. М., Энергия, 1975.
72. Энергетические системы. Терминология. М., Наука, 1970.
73. Яковлев Г. С. Судовые электроэнергетические системы. Л., Судостроение, 1967.

# ОГЛАВЛЕНИЕ


От редактора . . . . . 5
Предисловие . . . . . 7

**Раздел 1 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СУДОВ** 9

Глава 1.1. **Вопросы расчета автоматических судовых электроустановок и систем** . . . . . —

§ 1.1.1. Общие сведения . . . . . —
§ 1.1.2. Линейные непрерывные автоматические системы . . . . . 14
Установившийся режим работы автоматических систем —
Динамический режим работы автоматических систем 15
Расчет автоматических систем . . . . . 25
§ 1.1.3. Дискретные автоматические системы . . . . . 26
§ 1.1.4. Нелинейные автоматические системы . . . . . 27
§ 1.1.5. Оптимальное управление в автоматических системах 35

Глава 1.2. **Моделирование процессов в судовых электроэнергетических системах** . . . . . 37

§ 1.2.1. Области применения средств моделирования в судовых электроэнергетических системах . . . . . —
§ 1.2.2. Принцип комплексного моделирования — основа исследования процессов в СЭЭС . . . . . 38
§ 1.2.3. Основные положения теории подобия . . . . . 41
§ 1.2.4. Физическое моделирование. Критерии подобия СЭЭС и их реализация . . . . . 49
§ 1.2.5. Аналоговое моделирование. Блок-схемы элементов СЭЭС. Моделирование системы на ЭАМ . . . . . 52
§ 1.2.6. Цифровое моделирование. Особенности алгоритмизации процессов в СЭЭС . . . . . 57
§ 1.2.7. Обзор некоторых разработанных и реализованных на ЦВМ алгоритмов расчета процессов в СЭЭС . . . . . 61

Глава 1.3. **Надежность судовых электрических устройств и систем**

§ 1.3.1. Общие положения . . . . . 65
§ 1.3.2. Формулировка задачи исследования и расчета надежности СЭЭС . . . . . — 66
§ 1.3.3. Выбор метода расчета надежности СЭЭС . . . . . 67
Составление условий работоспособности . . . . . —
Табличный метод расчета надежности СЭЭС . . . . . 74
Схемно-логический метод расчета надежности СЭЭС . . . 75
§ 1.3.4. Примеры практического использования точных логико-вероятностных методов расчета . . . . . 77
Табличный метод расчета надежности СЭЭС . . . . . —
Схемно-логический метод расчета надежности СЭЭС . . . 80
Некоторые замечания по проведению расчета надежности методом несовместных гипотез . . . . . 81
§ 1.3.5. Приближенный логико-вероятностный метод расчета надежности СЭЭС с учетом восстановления . . . . . —

Глава 1.4. **Электропожаробезопасность на судах** . . . . . 85

§ 1.4.1. Общие положения . . . . . —
§ 1.4.2. Электробезопасность в судовых электрических сетях —
§ 1.4.3. Защитное заземление . . . . . 89
§ 1.4.4. Электропожаробезопасность судового переносного электрооборудования . . . . . 94
§ 1.4.5. Электропожаробезопасность при электроснабжении судна с берега . . . . . 98
§ 1.4.6. Нормирование величины сопротивления изоляции . . . . 101
§ 1.4.7. Грозозащитные устройства и защита от статического электричества . . . . . 108
Основные определения . . . . . —
Накопление атмосферного электричества, молния и ее основные характеристики . . . . . 109
Грозозащитные устройства . . . . . 111
Электростатическая защита . . . . . 113

Глава 1.5. **Электрические измерения электрических величин** . . . . 114

§ 1.5.1. Основные определения и общие сведения . . . . . —
Основные определения . . . . . —
Основная классификация методов измерений и электроизмерительных приборов . . . . . 115
Погрешности измерений и электроизмерительных приборов . . . . . 116
§ 1.5.2. Основные методы измерения параметров судовых электрических сетей постоянного и переменного тока . . . . . 118
§ 1.5.3. Измерение емкости судовых кислотных аккумуляторных батарей . . . . . 119
§ 1.5.4. Особенности и основные методы измерения сопротивления изоляции в судовых сетях . . . . . 120
§ 1.5.5. Определение совпадения фаз трехфазного тока . . . . . 123
§ 1.5.6. Определение порядка следования фаз трехфазного тока 124

**Раздел 2 СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ** 126

Глава 2.1. **Термины, показатели, род тока, частота и напряжение СЭЭС** —

§ 2.1.1. Основные термины и определения . . . . . —
§ 2.1.2. Основные показатели СЭЭС . . . . . 128
§ 2.1.3. Род тока, частота и напряжение СЭЭС . . . . . 129

Глава 2.2. **Структурные схемы СЭЭС и судовых электростанций** 130

§ 2.2.1. Классификация СЭЭС . . . . . —
§ 2.2.2. Автономные СЭЭС . . . . . —
§ 2.2.3. СЭЭС с отбором мощности от силовой установки . . . . . 132
§ 2.2.4. Единые СЭЭС . . . . . 133
§ 2.2.5. Структурные схемы электростанций СЭЭС . . . . . 134

Глава 2.3. **Определение нагрузки и выбор состава генераторов судовых электростанций** . . . . . 136

§ 2.3.1. Определение нагрузки генераторов судовых электростанций . . . . . —

§ 2.3.2. Выбор состава генераторов судовых электростанций . . . 139

Глава 2.4. **Параллельная работа судовых источников электроэнергии** 142

§ 2.4.1. Параллельная работа синхронных генераторов . . . . . —

Основные понятия и определения . . . . . —

Распределение нагрузки при параллельной работе генераторных агрегатов . . . . . 146

Колебания мощности при параллельной работе генераторных агрегатов . . . . . 150

Распределение активной нагрузки после синхронизации 151

Распределение активной нагрузки при параллельной работе агрегатов с комбинированными регуляторами частоты вращения . . . . . 152

Распределение активной нагрузки при параллельной работе агрегатов со статическими регуляторами и агрегатов с комбинированными регуляторами . . . . . 153

Распределение активной нагрузки в переходном процессе —

Автоматическое регулирование режима параллельной работы по частоте и активной мощности . . . . . 155

Автоматическое регулирование частоты при параллельной работе генераторов . . . . . 158

Включение синхронных машин на параллельную работу —

§ 2.4.2. Параллельная работа генераторов постоянного тока . . . 165

Глава 2.5. **Расчет судовой кабельной сети** . . . . . 167

§ 2.5.1. Расчет кабельной сети по условию нагрева кабеля . . . . —

§ 2.5.2. Определение расчетных токов участков кабельной сети 183

§ 2.5.3. Расчет потерь напряжения в кабельной сети . . . . . —

Глава 2.6. **Токи короткого замыкания в СЭЭС постоянного тока** 190

§ 2.6.1. Общая характеристика и порядок расчета токов короткого замыкания . . . . . —

§ 2.6.2. Расчет токов короткого замыкания и фиктивных сопротивлений генераторов и двигателей . . . . . 192

§ 2.6.3. Расчет токов короткого замыкания в СЭЭС . . . . . 195

Глава 2.7. **Токи короткого замыкания в СЭЭС переменного тока** 199

§ 2.7.1. Общие требования к выполнению расчетов и характеристика методов расчета токов короткого замыкания . . . . 201

§ 2.7.2. Основные величины, характеризующие ток короткого замыкания электрической цепи . . . . . 206

§ 2.7.3. Эквивалентирование генераторов и асинхронной нагрузки 210

§ 2.7.4. Токи короткого замыкания в установившихся режимах 216

Расчет установившегося тока при неучете насыщения генератора и активного сопротивления цепи . . . . . —

Расчет установившегося тока короткого замыкания через сопротивление $z = r + jx$ при неучете насыщения генератора . . . . . 217

Расчет установившегося тока с учетом насыщения генератора . . . . . 218

§ 2.7.5. Периодическая составляющая тока короткого замыкания на начальный момент времени . . . . . —

§ 2.7.6. Токи короткого замыкания от асинхронных двигателей 220





§ 2.7.7. Расчет процесса изменения тока короткого замыкания уточненным аналитическим методом . . . . . 223

§ 2.7.8. Метод расчетных кривых полного тока короткого замыкания . . . . . 227

§ 2.7.9. Упрощенный аналитический метод расчета токов короткого замыкания . . . . . 234

Расчет значений ударного тока цепи короткого замыкания —

Расчет значений полного тока цепи короткого замыкания на заданные моменты времени после первого полупериода 237

Рост величины теплового импульса тока . . . . . 240

§ 2.7.10. Расчет токов короткого замыкания на ЦВМ . . . . . 243

Глава 2.8. **Защита СЭЭС и выбор аппаратов защиты** . . . . . 248

§ 2.8.1. Общие требования к защите . . . . . —

§ 2.8.2. Требования к защите основных видов электрооборудования . . . . . 249

§ 2.8.3. Выбор аппаратов защиты . . . . . 251

Выбор устройств защиты электродвигателей от перегрузки и снижения напряжения . . . . . —

Выбор выключателей . . . . . 253

Выбор предохранителей . . . . . 259

Выбор устройств автоматической разгрузки генераторных агрегатов и автоматического включения резерва . . . . . —

Выбор реле обратного тока или обратной мощности . . . . 260

Глава 2.9. **Практические методы расчета провалов напряжения в судовых электроэнергетических системах** . . . . . 265

§ 2.9.1. Общие положения . . . . . —

§ 2.9.2. Аналитические методы расчета провалов напряжения 268

§ 2.9.3. Графоаналитический метод (метод расчетных кривых) 276

§ 2.9.4. Расчеты на цифровых вычислительных машинах . . . . . 282

Глава 2.10. **Качество электрической энергии СЭЭС** . . . . . 284

§ 2.10.1. Показатели качества электрической энергии . . . . . —

§ 2.10.2. Требования к качеству электроэнергии . . . . . 286

§ 2.10.3. Оценка качества электроэнергии и меры по его улучшению 288

Глава 2.11. **Устойчивость судовых электроэнергетических систем** 303

§ 2.11.1. Общие понятия. Определения . . . . . —

§ 2.11.2. Статическая устойчивость параллельной работы судовых синхронных генераторов. Возможные причины нарушения устойчивости . . . . . 304

§ 2.11.3. Статическая устойчивость работы судового синхронного генератора параллельно с мощной береговой сетью (элементарная система) . . . . . 305

§ 2.11.4. Статическая устойчивость параллельной работы судовых генераторов соизмеримой мощности . . . . . 312

§ 2.11.5. Статическая устойчивость системы синхронный генератор — комплексная нагрузка (устойчивость нагрузки) 314

§ 2.11.6. Примеры оценки статической устойчивости СЭЭС. Влияние различных факторов на статическую устойчивость . . . . 318

§ 2.11.7. Динамическая устойчивость системы. Возможные причины нарушения устойчивости . . . . . 320

§ 2.11.8. Динамическая устойчивость параллельной работы генераторов по первому полуциклу качаний. Методы расчета 322

§ 2.11.9. Влияние различных факторов на динамическую устойчивость генераторов по первому полуциклу качаний . . . . 324

§ 2.11.10. Результирующая динамическая устойчивость. Качество электроэнергии при качаниях роторов генераторов . . . . 326
§ 2.11.11. Динамическая устойчивость системы генератор—комплексная нагрузка (устойчивость нагрузки) . . . . . 327

Глава 2.12. **Расчет колебаний напряжения, частоты, роторов синхронных генераторов и частоты вращения асинхронных электродвигателей в СЭЭС** . . . . . 331
§ 2.12.1. Расчет начальных значений параметров . . . . . —
§ 2.12.2. Расчет изменения напряжения и частоты на шинах электростанции при пусках и самозапусках асинхронных электродвигателей . . . . . 335
§ 2.12.3. Расчет частоты вращения при пуске и самозапуске электродвигателей с учетом изменения напряжения и частоты сети . . . . . 343
§ 2.12.4. Расчет колебаний напряжения синхронного генератора при работе электроприводов грузовых лебедок и кранов . . . 349
§ 2.12.5. Расчет колебаний роторов синхронных и асинхронных машин . . . . . 354
§ 2.12.6. Расчет изменения напряжения на шинах электростанции при самосинхронизации генераторов и синхронизации через реактор . . . . . 365

**Раздел 3 СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ** 375

Глава 3.1. **Электроприводы рулевых устройств** . . . . . —
§ 3.1.1. Основные требования, предъявляемые к рулевым электроприводам . . . . . —
§ 3.1.2. Классификация рулевых электроприводов . . . . . —
§ 3.1.3. Типизированный ряд судовых рулевых машин . . . . . 376
§ 3.1.4. Выбор электродвигателей привода насосных агрегатов —
§ 3.1.5. Системы и электрические схемы управления рулевых электроприводов . . . . . 378
§ 3.1.6. Схемы управления электроприводами . . . . . 382

Глава 3.2. **Электроприводы якорно-швартовных механизмов** . . . . 383
§ 3.2.1. Назначение и особенности работы . . . . . —
§ 3.2.2. Классификация якорно-швартовных и швартовных механизмов . . . . . 384
§ 3.2.3. Основные параметры якорного устройства . . . . . 385
§ 3.2.4. Силы, действующие в якорной цепи при стоянке судна на якоре . . . . . 386
§ 3.2.5. Нагрузочные диаграммы электропривода . . . . . 388
§ 3.2.6. Типы и основные параметры якорно-швартовных механизмов . . . . . 390
§ 3.2.7. Требования к электроприводам якорно-швартовных механизмов . . . . . 393
§ 3.2.8. Типы электроприводов якорно-швартовных механизмов 394
§ 3.2.9. Методика расчета для выбора электродвигателей и электромагнитных тормозов к якорно-швартовным и швартовным механизмам . . . . . —
§ 3.2.10. Управление электроприводами якорно-швартовных механизмов . . . . . 403

Глава 3.3. **Электроприводы вспомогательных механизмов энергетических установок и судовых систем** . . . . . 407
§ 3.3.1. Основные объекты управления . . . . . —
§ 3.3.2. Выбор электропривода механизмов судовых систем . . . 412
§ 3.3.3. Схемы управления регулируемыми и исполнительными органами с помощью электроприводов . . . . . 417



§ 3.3.4. Управляющие системы электроприводов . . . . . 419

Глава 3.4. **Электроприводы палубных грузовых механизмов** . . . . 421
§ 3.4.1. Классификация грузоподъемных механизмов . . . . . —
§ 3.4.2. Требования, предъявляемые к электроприводам грузоподъемных устройств . . . . . —
§ 3.4.3. Электропривод грузовых лебедок . . . . . 422
§ 3.4.4. Нагрузочные диаграммы электроприводов грузовых лебедок и механизмов подъема судовых кранов . . . . . 424
§ 3.4.5. Ряд унифицированных судовых грузовых лебедок с электрическим приводом . . . . . 435

**Раздел 4 ГРЕБНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ** 436

Глава 4.1. **Основные вопросы гребных электрических установок** —
§ 4.1.1. Общие сведения . . . . . —
§ 4.1.2. Мощность для движения судов и характеристики гребного винта и ГЭУ . . . . . —
§ 4.1.3. Маневренные качества судна с ГЭУ . . . . . 439
§ 4.1.4. Характеристики электрических машин ГЭУ . . . . . 440
§ 4.1.5. Возбуждение электрических машин ГЭУ . . . . . 441
§ 4.1.6. Распределительные устройства, сигнализация и управление ГЭУ . . . . . 445

Глава 4.2. **ГЭУ постоянного тока** . . . . . 447
§ 4.2.1. Общие сведения . . . . . —
§ 4.2.2. Статические характеристики . . . . . 452
§ 4.2.3. Переходные процессы . . . . . 459
§ 4.2.4. Автоматическое регулирование и защита . . . . . 460

Глава 4.3. **ГЭУ переменного тока** . . . . . 465
§ 4.3.1. Общие сведения . . . . . —
§ 4.3.2. Определение параметров ГЭУ по характеристикам установившегося режима . . . . . 468
§ 4.3.3. Переходные режимы . . . . . 474
§ 4.3.4. Автоматизация и защита . . . . . 475

Глава 4.4. **ГЭУ переменно-постоянного тока** . . . . . 478
§ 4.4.1. Общие сведения . . . . . —
§ 4.4.2. Статические характеристики . . . . . 480
§ 4.4.3. Автоматизация и защита . . . . . 483

**Раздел 5 СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ НА СУДАХ** 485

Глава 5.1. **Судовые светотехнические системы** . . . . . —
§ 5.1.1. Общие положения . . . . . —
§ 5.1.2. Системы освещения . . . . . —
§ 5.1.3. Виды освещения . . . . . 486
§ 5.1.4. Выбор источников света . . . . . 487
§ 5.1.5. Ограничение ослепленности и равномерность освещения 489
§ 5.1.6. Выбор освещенности и коэффициент запаса . . . . . 497

Глава 5.2. **Расчет судовых светотехнических установок** . . . . . 498
§ 5.2.1. Световые величины и единицы . . . . . —
§ 5.2.2. Метод коэффициента использования . . . . . —
§ 5.2.3. Удельная мощность . . . . . 505
§ 5.2.4. Точечный метод . . . . . 512
§ 5.2.5. Прожекторное освещение . . . . . 514
Указатель литературы . . . . . 519

# СПРАВОЧНИК СУДОВОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

## ТОМ 1

## СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

---

Редакторы: З. В. Озерова, Т. Н. Сморкалова
Художественные редакторы: О. П. Андреев, В. А. Пурицкий
Технический редактор А. П. Ширяева
Оформление переплета художника В. И. Харькова
Корректоры: Е. М. Реутская, В. Ю. Самохина

ИБ № 490

Сдано в набор 23.01.80. Подписано в печать 30.05.80. М-27054.
Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2.
Гарнитура шрифта литературная. Печать высокая.
Усл. печ. л. 33,0. Уч.-изд. л. 44,7. Тираж 22 000 экз.
Изд. № 3538—79. Заказ № 36
Цена 2 р. 60 к.

Издательство «Судостроение», 191065, Ленинград,
ул. Гоголя, 8

Ленинградская типография № 6 ордена Трудового
Красного Знамени Ленинградского объединения
«Техническая книга» им. Евгении Соколовой
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
193144, г. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.