

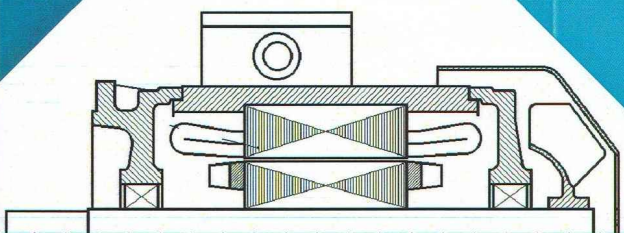
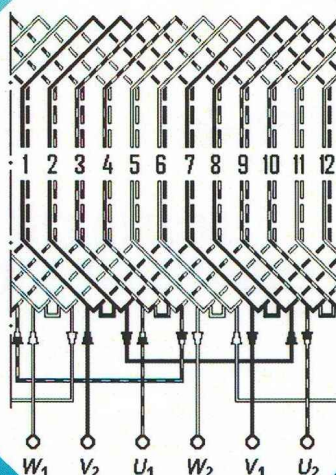
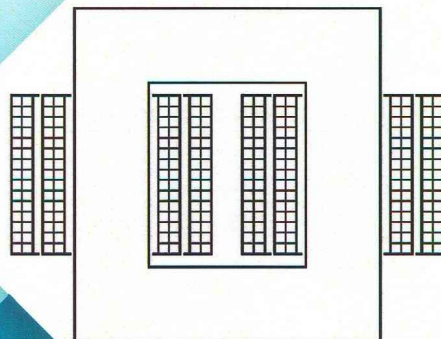
В. В. Сотников

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Часть 1

**Трансформаторы. Общие вопросы
теории электрических машин.
Асинхронные двигатели**

Учебное пособие



**Белгород
2019**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Белгородский государственный технологический университет
им. В. Г. Шухова

В. В. Сотников

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ЧАСТЬ 1

**ТРАНСФОРМАТОРЫ. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ**

*Утверждено ученым советом университета
в качестве учебного пособия для студентов направления подготовки
13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника*

Белгород
2019

УДК 621.313

ББК 31.21

С67

Рецензенты:

Главный конструктор электрических машин

ОАО «Электроагрегат» *В. И. Корсунский*

Доктор технических наук, профессор Белгородского государственного
технологического университета им. В. Г. Шухова *А. В. Сапрыка*

Сотников, В. В.

С67 Электрические машины: в 2 ч. Ч. 1. Трансформаторы. Общие
вопросы теории электрических машин. Асинхронные двигатели:
учебное пособие / В. В. Сотников. — Белгород: Изд-во БГТУ,
2019. — 160 с.

ISBN 978-5-361-00727-1 (ч.1)

ISBN 978-5-361-00726-4

В первой части учебного пособия приводятся основные сведения об устройстве, принципе выполнения обмоток и теории трансформаторов и асинхронных двигателей общего назначения. Рассматриваются физические процессы и количественные соотношения между величинами, основные характеристики и эксплуатационные свойства в установившемся режиме.

Издание предназначено для студентов направления подготовки 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника, а также может быть полезно аспирантам и техническому персоналу, обеспечивающему эксплуатацию соответствующего оборудования.

УДК 621.313

ББК 31.21

ISBN 978-5-361-00727-1 (ч.1)

ISBN 978-5-361-00726-4

© Сотников В. В., 2019

© Белгородский государственный
технологический университет
(БГТУ) им. В. Г. Шухова, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	6
ПРЕДИСЛОВИЕ	7
ВВЕДЕНИЕ	9
ГЛАВА 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ	11
1.1. Классификация трансформаторов.....	12
1.2. Устройство силовых трансформаторов.....	14
1.3. Активная часть.....	18
1.3.1. Магнитопровод.....	18
1.3.2. Обмотки.....	22
1.4. Трехфазные трансформаторы.....	29
1.4.1. Схемы соединения фаз обмоток.....	30
1.4.2. Группы соединения фаз обмоток.....	31
1.5. Принцип действия трансформатора.....	33
1.6. Составляющие магнитного поля и основные уравнения.....	36
1.7. Схемы замещения приведенного трансформатора.....	39
1.8. Опыты холостого хода и короткого замыкания.....	44
1.9. Применение относительных единиц в расчетах.....	47
1.10. Изменение вторичного напряжения при нагрузке.....	48
1.11. Эксплуатационные характеристики трансформатора.....	49
1.12. Регулирование напряжения трансформаторов.....	52
1.12.1. Переключение ответвлений без возбуждения.....	53
1.12.2. Переключение ответвлений под нагрузкой////////.....	54
1.13. Работа трехфазного трансформатора при несимметричной нагрузке.....	56
1.13.1. Несимметричная нагрузка при схеме соединения Y/Y_n	58
1.13.2. Несимметричная нагрузка при схеме соединения Y/Z_n	60
1.13.3. Несимметричная нагрузка при схемах соединения Δ/Y_n и Y_n/Y_n	61
1.13.4. Несимметричная нагрузка при схемах соединения Y/Y , Y/Δ , Δ/Y и Δ/Δ	62
1.14. Параллельная работа трансформаторов.....	62
1.14.1. Схема замещения со стороны нагрузки.....	63
1.14.2. Исследование параллельной работы при различных условиях.....	64
1.15. Трехобмоточные трансформаторы.....	67
1.15.1. Основные уравнения и схема замещения.....	69
1.15.2. Определение параметров схемы замещения из опытов холостого хода и короткого замыкания.....	70
1.15.3. Режим нагрузки.....	72
1.16. Трансформаторы с расщепленной обмоткой.....	73

1.16.1. Область применения. Особенности устройства.....	73
1.16.2. Распределение токов по обмоткам.....	75
1.16.3. Уменьшение взаимного влияния нагрузок.....	77
1.17. Автотрансформаторы.....	78
1.17.1. Трансформация напряжений и токов.....	80
1.17.2. Электромагнитная, электрическая и проходная мощность.....	82
1.17.3. Сравнительная оценка автотрансформатора и двухобмоточного трансформатора.....	83
ГЛАВА 2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	85
2.1. Классификация электрических машин.....	85
2.2. Номинальные режимы работы.....	87
2.3. Конструктивное исполнение.....	88
2.4. Общее устройство.....	89
2.5. Принцип создания многополюсного магнитного поля.....	92
2.6. Конструктивные виды и параметры обмоток.....	93
2.7. Магнитодвижущая сила распределенной обмотки.....	97
2.8. Синтез обмоток с близким к синусоидальному пространственным распределением магнитодвижущей силы	100
2.8.1. Влияние на магнитодвижущую силу распределения катушечной группы по пазам.....	101
2.8.2. Влияние на магнитодвижущую силу двухслойной обмотки укорочения шага.....	104
2.8.3. Обмоточный коэффициент.....	106
2.9. Скос пазов.....	107
2.10. Образование вращающегося магнитного поля с помощью трехфазной обмотки.....	110
ГЛАВА 3. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ.....	113
3.1. Общие сведения.....	113
3.2. Устройство асинхронного двигателя.....	114
3.3. Принцип действия.....	118
3.4. Математическое описание асинхронной машины.....	119
3.4.1. Принятые допущения.....	119
3.4.2. Разложение реального магнитного поля на составляющие.....	120
3.4.3. Электродвижущие силы, индуцируемые в обмотках статора и ротора.....	121
3.4.4. Уравнения электрического равновесия.....	123
3.4.5. Уравнение равновесия магнитодвижущих сил.....	124
3.4.6. Основные уравнения в приведенных величинах.....	125
3.5. Схемы замещения.....	126

3.5.1. Т-образная схема замещения и физический смысл входящих в нее параметров.....	126
3.5.2. Упрощенная Г-образная схема замещения.....	128
3.6. Энергетическая диаграмма.....	129
3.7. Электромагнитный момент ротора.....	
Механическая характеристика.....	130
3.8. Режимы работы асинхронной машины.....	132
3.9. Рабочие характеристики асинхронного двигателя.....	135
3.10. Способы пуска асинхронных двигателей.....	137
3.10.1. Прямой пуск.....	138
3.10.2. Пуск при пониженном напряжении.....	139
3.10.3. Увеличение эквивалентного сопротивления цепи асинхронного двигателя.....	140
3.11. Способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей.....	142
3.11.1. Частотное регулирование.....	143
3.11.2. Переключение числа полюсов обмотки статора.....	145
3.11.3. Асинхронный вентильный каскад.....	146
3.11.4. Изменение крутизны рабочего участка механической характеристики.....	147
3.11.5. Изменение направления вращения.....	148
3.12. Способы торможения асинхронных двигателей.....	148
3.13. Однофазные асинхронные двигатели.....	153
3.13.1. Общие сведения.....	153
3.13.2. Асинхронные двигатели с пусковой обмоткой.....	155
3.13.3. Конденсаторные асинхронные двигатели.....	157

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АВК – асинхронный вентильный каскад
АД – асинхронный двигатель
АМ – асинхронная машина
ВД – векторная диаграмма
ВН – высшее напряжение (в трансформаторах)
ВКЗ – внезапное короткое замыкание
ГОСТ – государственный стандарт
ГПТ – генератор постоянного тока
ГЭС – гидроэлектростанция
ДПТ – двигатель постоянного тока
КЗ – короткое замыкание
КПД – коэффициент полезного действия
МДС – магнитодвижущая сила
МПТ – машина постоянного тока
МЭК – Международная электротехническая комиссия
НН – низшее напряжение (в трансформаторах)
ПБВ – переключение без возбуждения (в трансформаторах)
ПЧ – преобразователь частоты
РО – расщепленная обмотка (в трансформаторах)
РПН – регулирование под нагрузкой (в трансформаторах)
СГ – синхронный генератор
СД – синхронный двигатель
СК – синхронный компенсатор
СМ – синхронная машина
СН – среднее напряжение (в трансформаторах)
СУ – симметрирующее устройство (в трансформаторах)
ТОЭ – теоретические основы электротехники
ТРН – тиристорный регулятор напряжения
УПП – устройство плавного пуска
УПР – устройство пусковое реакторное
ХХ – холостой ход
ЭДС – электродвижущая сила
ЭМТ – электромагнитный тормоз
ЭМУ – электромашинный усилитель

ПРЕДИСЛОВИЕ



В настоящем пособии представлен общий курс электрических машин, ориентированный на студентов-бакалавров электротехнических направлений. Пособие написано на основе лекций, который автор читал студентам в течение многих лет.

В первой части изложены разделы: «Трансформаторы», «Общие вопросы теории электрических машин переменного тока», «Асинхронные двигатели»; во второй – «Синхронные машины» и «Машины постоянного тока».

Такая последовательность изложения соответствует распределению материала по семестрам, применяемому в большинстве вузов.

И. Ньютон писал, что «природа проста и не роскошествует излишними причинами». С этой позиции во всех электромагнитных устройствах она «работает» одинаково. Однако из-за неясности физической сути электромагнитных явлений теория трансформаторов и различных типов электрических машин излагается с учетом особенностей конструкции и преобразования энергии. Изложение ведется в соответствии с проверенными и оправдавшими себя принципами обучения: от простого – к сложному, от частного – к общему.

Еще в начале своей профессиональной деятельности в Харьковском отделении Всесоюзного научно-исследовательского института электро-механики пришлось услышать от одного старшего коллеги изречение: «Если Вы что-то не можете объяснить "на пальцах", значит, сами еще не до конца это поняли». Принимая его в качестве общего руководства, автор стремился излагать теоретический материал по возможности проще, но с научных позиций, местами нетрадиционно. При рассмотрении некоторых вопросов использованы научные работы автора.

В некоторых учебниках применяется метод изложения, по которому для экономии времени вначале рассматривается математическая модель обобщенной электрической машины, а затем на ее основе, как частный случай, конкретный тип машины. Представляется, что подобный подход более целесообразен для специальных курсов.

Как показывает опыт, формально-математическое изложение теории электрических машин для первоначального обучения вчерашних

школьников, многие из которых не имеют даже поверхностного представления о предмете, нецелесообразно, так как плохо усваивается и не дает глубоких знаний. Однако не оправдана и другая крайность – популяризация теории, получившая определенное распространение из-за снижения в постсоветское время уровня фундаментальной подготовки студентов в системе образования нашей страны. Она делает курс поверхностным и лишает научности.

В пособии рассматриваются общие вопросы теории, конструкция основных типов трансформаторов и электрических машин, принцип их действия и связанные с этим электромагнитные процессы, характеристики и установившиеся режимы работы, а также методы электромагнитных испытаний и определение по их результатам параметров электрических машин. Материал, относящийся к конструкциям, снабжен достаточно большим количеством рисунков и фотографий, что облегчит его изучение. Математический аппарат используется в объеме, необходимом для получения количественных соотношений, характеризующих работу электрических машин и трансформаторов, и позволяющем более глубоко понять описываемые процессы.

В связи с сокращением аудиторного времени на преподавание курса из пособия исключены темы: несинусоидальные намагничивающие токи трансформаторов, несимметричные режимы трехфазных асинхронных и синхронных машин, переходные процессы, нагрев, охлаждение и некоторые специальные вопросы.

Также не рассматриваются методики аналитического расчета магнитных цепей и параметров электрических машин. По мнению автора, этот материал вторичен, не способствует усвоению основного материала и целесообразен для специальных курсов по проектированию.

Учебное пособие соответствует содержанию программы по дисциплине, изложенной в Федеральном государственном образовательном стандарте высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» (уровень бакалавриата).

Книга издается впервые и может содержать отдельные ошибки и неточности. Автор будет благодарен за соответствующие указания и предложения по улучшению содержания.

Замечания, отзывы и предложения просьба направлять:

в издательство БГТУ им. В.Г. Шухова: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46;

автору по электронной почте: VV_Sotnikov@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В современной цивилизации количество потребляемой энергии является энергетической мерой ее развития. Среднемировое потребление энергии всех видов на одного человека в настоящее время превышает 20 кВт·ч. Среди них электрическая энергия составляет наибольшую долю, что обусловлено ее преимуществами:

- удобством передачи с помощью электрических сетей от мест производства к местам потребления на большие расстояния с относительно малыми потерями;
- легкостью дробления и управления;
- экономичностью преобразования в другие виды энергии.

Современное состояние теории и практики в области трансформаторов и электрических машин является итогом более чем двухвекового развития электротехники. В 1820 г. А. Ампер открыл взаимодействие электрических токов. В следующем году М. Фарадей впервые осуществил эксперимент, в котором опущенный нижним концом в ртуть проводник вращался вокруг постоянного магнита, что показало возможность преобразования электрической энергии в механическую. Позднее, в 1831 г., он открыл явление электромагнитной индукции. Эти физические явления лежат в основе работы трансформаторов и электрических машин.

Изобретение и совершенствование конструкций электрических машин связано с именами многих выдающихся отечественных (Б. С. Якоби, Э. Х. Ленц, П. Н. Яблочков, М. О. Доливо-Добровольский и др.) и зарубежных (Д. Генри, В. Сименс, З. Грамм, М. Дери, Т. Эдисон, Г. Феррарис, Н. Тесла и др.) ученых и инженеров XIX века и более позднего времени. В XX веке большой вклад в развитие теории и практики внесли зарубежные (Э. Арнольд, А. Блондель, М. Видмар, Л. Дрейфус, Р. Рихтер, Г. Крон и др.) и советские ученые (К. А. Круг, К. И. Шенфер, М. П. Костенко, А. И. Вольдек, Р. А. Лютер, Г. Н. Петров, П. М. Тихомиров и др.).

Электрические машины являются одновременно и основными генераторами энергии, и основными её потребителями. На электрических станциях электрические генераторы преобразуют различные виды энергии в электрическую. В промышленности, сельском хозяйстве и в быту различные механизмы приводятся в движение электрическими двигателями посредством преобразования электроэнергии, поступающей от генераторов через трансформаторы, в механическую энергию. Электрические машины также широко применяются в системах автоматического управления в качестве исполнительных двигателей, электромеханиче-

ских преобразователей и датчиков. Они во многом определяют технический уровень изделий, в которых используются.

Чтобы отчетливее понять значение электрических машин в нашей жизни, представим себе, что гипотетический Творец вдруг отправил их в небытие. Современный мир погрузится во тьму. Исчезнут основные источники электроэнергии и, вслед за этим, почти все остановится: в промышленности, на транспорте, в научных лабораториях, в быту и т.д.

Трансформаторы и электрические машины обеспечивают материальную основу научно-технического прогресса и повышения производительности труда. Знание их теории необходимо специалисту, работающему в области электроэнергетики и электротехники, чтобы грамотно проектировать и эксплуатировать это оборудование.

Изучение трансформаторов и электрических машин имеет также большое мировоззренческое значение, так как в этих созданных человеком устройствах Природа работает на самом фундаментальном уровне, о котором мы практически ничего не знаем. Изучение теории их работы позволяет прикоснуться к этой тайне, а в будущем, возможно, и раскрыть ее.

В машине как-то Ротор вдруг начал зазнаваться
И к Статору частенько занудно придирается:
«Вот, Я работаю, кручусь, верчусь весь день,
Тебе же повернуться и разочек лень.
Моей ты славою дружок живешь,
И без Меня ты право пропадешь!»
На это Ротору ответил скромно Статор:
«Что мелишь ты – болтун оратор!
Нам каждому своё дано.
Работу всю – мы выполняем вместе.
Ты крутишься, а я стою на месте.
Но коль энергию тебе б не отдавал
Давно бы ты крутиться перестал,
В ненужный хлам бы превратился
И во дворе на свалке очутился».

Морали нет.
Так в чем же здесь причина?
Все знают, как работает машина!

А. Е. Яковлев

ГЛАВА 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформатор – статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно-связанные обмотки. Он предназначен для преобразования системы переменного тока с одними параметрами в систему переменного тока с другими параметрами. Чаще всего трансформируются напряжение и ток.

Широкое применение переменного тока началось лишь после изобретения трансформатора, давшего возможность производить электроэнергию при напряжении, удобном для генерирования; передавать ее с напряжением, соответствующим минимальным потерям; потреблять при напряжении, рассчитанном на параметры электроприемников.

Прогресс трансформаторостроения в XX в. в нашей стране и за рубежом привел к снижению удельных массогабаритных показателей и повышению КПД, увеличению мощности и класса напряжения трансформаторов. Основой его стали новые научно-технические разработки и материалы, качественные изменения в средствах производства и технологии. В настоящее время совершенствование трансформаторов в значительной степени определяется созданием новых проводниковых, магнитных и изоляционных материалов, улучшением конструкции и технологии производства.

Силовыми называются трансформаторы, предназначенные для преобразования электрической энергии в электрических сетях и в установках для приема и использования электрической энергии. К ним относятся трехфазные и однофазные трансформаторы мощностью, соответственно, 6,3 кВ·А и 5 кВ·А и более. Они являются основным оборудованием подстанций. На электростанциях электроэнергия генерируется напряжением 6–20 кВ и передается на крупные районные подстанции при напряжении 110–750 кВ. Подстанции промышленных предприятий питаются напряжением 35–220 кВ, а потребители электроэнергии на предприятиях и в быту – напряжением 6 (10) кВ и 380/220 В. В связи с этим на пути от производителя к потребителям электроэнергии претерпевает три-четыре трансформации. Поэтому суммарная мощность трансформаторов в электрической системе в 7–8 раз больше, чем генераторов электроэнергии.

Трансформатор не только изменяет напряжение до уровня, удобного для всех звеньев электрической цепи, но и связывает их в единую энергетическую систему.

Диапазон мощностей и классов напряжений силовых трансформаторов, используемых в электроэнергетике, весьма широк: от единиц до сотен тысяч киловольт-ампер и более, а напряжений от сотен до сотен тысяч вольт и более.

Широкий диапазон трансформируемых мощностей и напряжений обусловлен тем, что для снижения потерь электроэнергию выгодно производить на энергоблоках большой мощности и передавать по линиям с высокими классами напряжения. В то же время потребители могут иметь различные мощности, и подавляющей их части требуется низкое напряжение (менее 1000 В). Поэтому в процессе передачи и распределения электроэнергии переменного тока производится несколько ее трансформаций, и, как следствие, полная мощность трансформаторов в несколько раз превышает мощность генераторов.

1.1. Классификация трансформаторов

Силовые трансформаторы классифицируют:

- по условиям работы: для нормальных и особых условий;
- видам, характеризующим назначение и основное конструктивное исполнение: однофазные, трехфазные, двухобмоточные, трехобмоточные, регулируемые под нагрузкой (РПН), переключаемые без возбуждения (ПБВ), по виду охлаждения и т.д.;
- виду изолирующей и охлаждающей среды: масляные (масло минеральное или синтетическое) и сухие, в том числе трансформаторы с твердой изоляцией;
- характеру циркуляции изолирующей и охлаждающей среды (отражается буквой в обозначении): М – естественная циркуляция воздуха и масла, Д – принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла и т.д.;
- мощности;
- классу напряжения, за который принимается класс напряжения обмотки ВН.

Силовые трансформаторы характеризуются следующими основными параметрами:

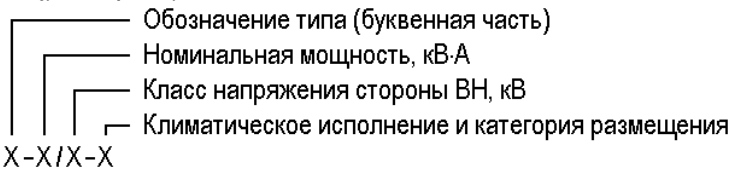
- номинальная мощность S_n , кВА;
- номинальные (линейные) напряжения основных обмоток U_n , кВ;
- схема и группа соединений обмоток;
- вид переключения ответвлений (РПН, ПБВ), диапазон и число ступеней регулирования напряжения;
- потери холостого хода P_0 , Вт, и короткого замыкания P_k , Вт, на основном ответвлении;
- напряжение короткого замыкания U_k , %;
- ток холостого хода I_0 , А, на основном ответвлении и др.

В зависимости от номинальной мощности и класса напряжения введены восемь габаритных размеров трансформаторов (табл. 1.1).

Таблица 1.1

№ габарита	Диапазон мощностей, кВА	Класс напряжения, кВ
I	До 100	До 35
II	Свыше 100 до 1000	До 35
III	Свыше 1000 до 6300	До 35
IV	Свыше 6300	До 35
V	До 32 000	Свыше 35 до 110
VI	Свыше 32 000 до 80 000	До 330
VII	Свыше 80 000 до 200 000	До 330
VIII	Свыше 200 000	До 330
	Независимо от мощности	Свыше 330

Структурная схема условного обозначения трансформатора состоит из четырех буквенно-цифровых частей, которые можно условно обозначить как X-X/X-X.



В обозначении типа буквы следуют в порядке:

А – автотрансформатор;

О или Т – однофазный или трехфазный трансформатор;

Р – расщепленная обмотка НН;

буквы условного обозначения видов охлаждения;

З – трансформатор с естественным масляным охлаждением с защитой при помощи азотной подушки без расширителя;

Л – трансформатор с литой изоляцией;

Т – трехобмоточный трансформатор (для двухобмоточного трансформатора букву не указывают);

Н – трансформатор с РПН;

С – трансформатор собственных нужд электростанций.

Примеры расшифровки условных обозначений трансформаторов.

ТМН-25000/110-У1: трехфазный, масляный с естественной циркуляцией воздуха и масла, двухобмоточный, с регулированием напряжения под нагрузкой, мощность – 25 000 кВА, класс напряжения – 110 кВ, исполнение для районов с умеренным климатом, установка на открытом воздухе.

ТСЗ-100/10-УЗ: трансформатор трехфазный сухой с естественным воздушным охлаждением в защищенном исполнении, двухобмоточный, мощность – 100 кВА, класс напряжения – 10 кВ, исполнение для районов с умеренным климатом, установка в помещениях с естественной вентиляцией.

1.2. Устройство силовых трансформаторов

Силовой трансформатор высокого напряжения большой мощности представляет собой сложное устройство, состоящее из активной части, осуществляющей преобразование электрической энергии, и различных вспомогательных устройств.

Основные конструктивные узлы трансформатора показаны на рис. 1.1.

Бак 1 представляет собой металлическую сварную конструкцию овальной или прямоугольной формы, герметически закрытую крышкой. На нем смонтированы вводы, привод переключателя напряжения, система охлаждения, защитные и контрольно-измерительные приборы. Бак может быть установлен на тележку.

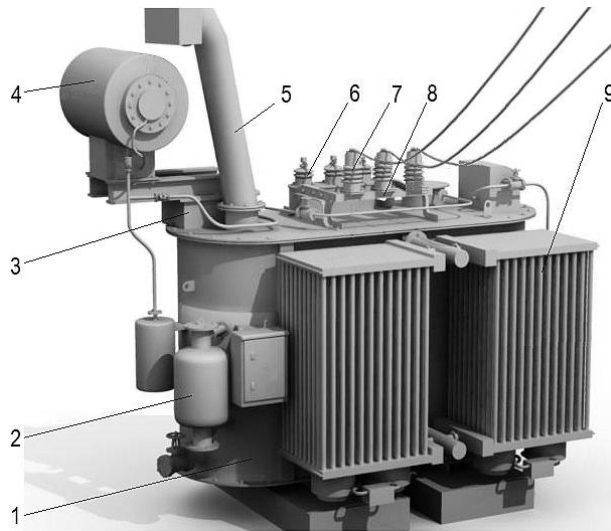


Рис. 1.1. Трансформатор трехфазный двухобмоточный типа ТМ:
1 – бак; 2 – термосифонный фильтр; 3 – газовое реле; 4 – расширитель; 5 – выхлопная труба; 6, 7 – вводы НН и ВН; 8 – регулятор напряжения ПБВ; 9 – радиатор

Вводы 6, 7 служат для соединения выводов обмоток ВН, СН и НН с сетью. Они представляют собой фарфоровые проходные изоляторы, через внутреннюю полость которых проходит токоведущий стержень. Их обычно устанавливают на крышке, реже на боковой стенке бака.

Переключатель отпаяк 8 служит для регулирования напряжения путем изменения числа витков обмотки ВН трансформатора.

Масляные трансформаторы ТМ мощностью 25 кВА и более имеют расширитель или другую защиту, предохраняющую масло от непосредственного контакта с окружающим воздухом. Расширитель 4 представ-

ляет из себя сосуд (обычно цилиндрической формы), сообщающийся с баком через маслопровод. При нагреве и охлаждении трансформатора тепловое увеличение (уменьшение) объема масла в баке компенсируется уменьшением (увеличением) объема масла в расширителе. Для контроля уровня масла на его торце устанавливается указатель. Расширитель сообщается с окружающей средой через силикагелевый воздухоосушитель, чтобы сохранять изоляционные свойства масла, способного поглощать влагу из воздуха. В трансформаторах высоких классов напряжения мощностью 25 МВА и более и минеральное масло дополнительно предохраняется от контакта с воздухом посредством пленочной защиты.

В трансформаторах мощностью 160 кВА и выше на баке устанавливается термосифонный фильтр 2, заполненный силикагелем или другим веществом, поглощающим из масла влагу и продукты окисления в процессе конвективной циркуляции.

Работа трансформатора сопровождается потерями электрической энергии, вызывающими нагрев как активных, так и иных конструктивных частей. Допускаемая при эксплуатации температура нагрева зависит от класса нагревостойкости изоляции трансформатора. Для отвода тепла в окружающую среду масляные трансформаторы большой мощности снабжаются специальной системой охлаждения, в которую входят радиаторы 9, вентиляторы, масляные насосы, контрольные и измерительные приборы и др.

В процессе эксплуатации трансформатора не исключены различные отказы, которые могут вызвать аварию. Для предотвращения такого режима на трансформаторах устанавливают защитные устройства. К ним относят газовое реле 3, выхлопную трубу 5, предохранительный клапан, пробивной предохранитель и другую аппаратуру.

Выхлопная труба предназначена для аварийного выброса газов и масла наружу при повышении давления, вызванном коротким замыканием. Она устанавливается на крышке бака в трансформаторах мощностью 1000 кВА и выше. Выход из трубы герметически закрыт мембраной, рассчитанной таким образом, чтобы при повышении давления она разрушалась раньше, чем деформируется бак.

Предохранительный клапан защищает бак от разрушения при резком повышении внутреннего давления выше допустимого.

Газовое реле служит для сохранения трансформатора от внутренних повреждений (пробой изоляции, замыкание витков, нарушение изоляции между листами магнитопровода («пожар в стали») и др.), сопровождающиеся выделением газов. Оно устанавливается в рассечку маслопровода между баком и расширителем.

Пробивной предохранитель (разрядник) предназначен для предотвращения повышения потенциала при электрическом пробое между обмотками ВН и НН на стороне НН и присоединенной к обмотке НН

незаземленной сети. Им снабжаются трансформаторы с напряжением обмотки НН до 0,69 кВ. Предохранитель включают между обмоткой НН и корпусом (к выводу нейтрали при соединении в звезду с выведенной нейтралью и к одному из линейных вводов – при соединении в треугольник).

Для контроля за работой и сигнализации в трансформаторе устанавливаются контрольно-измерительные устройства. К контрольным устройствам относятся маслоуказатель, термометр, термометрический сигнализатор, электроконтактный мановакуумметр и др.

Наиболее массовыми являются распределительные силовые трехфазные трансформаторы мощностью до 4000 кВА, непосредственно подающие электроэнергию промышленным и бытовым потребителям. Регулирование напряжения осуществляется переключением без возбуждения. Трансформаторы могут быть масляными и сухими. В первых для увеличения поверхности охлаждения применяют навесные радиаторы или выполняют стенки гофрированными.

На рис. 1.2 представлены масляные трансформаторы трех типов. В трансформаторах типа ТМ на крышке бака установлен расширитель 1.

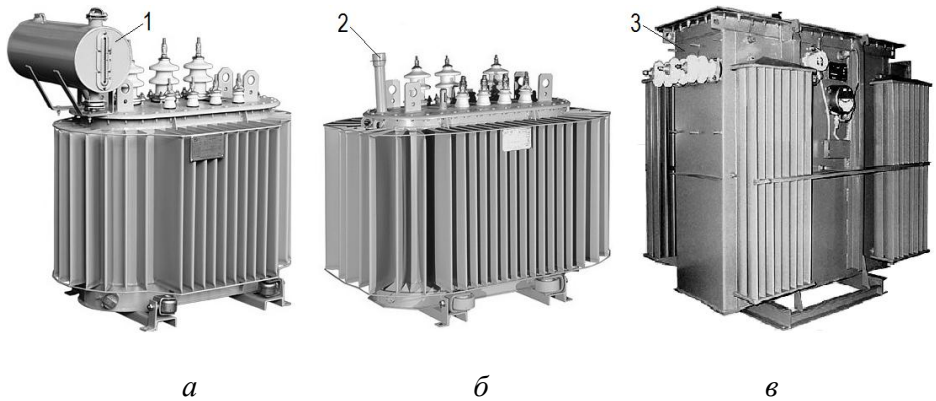


Рис. 1.2. Трансформаторы типа ТМ (а), ТМГ (б) и ТМЗ (в)

В герметичных трансформаторах типа ТМГ (рис. 1.2, б) функции расширителя выполняет бак с более тонкими стенками, компенсирующий температурные изменения объема масла за счет упругой деформации гофров. Трансформаторное масло полностью заполняет его внутренний объем и не имеет сообщения с окружающей средой. Это значительно улучшает условия его работы, исключает увлажнение, окисление и шламообразование. Перед заливкой масло дегазируют, благодаря чему его свойства практически не меняются в течение всего срока эксплуатации трансформатора и не требуется проведение профилактических ра-

бот. Для защиты бака от избыточного давления служит предохранительный клапан 2, встроенный в заливную трубу.

В трансформаторах типа ТМЗ (рис. 1.2, в) расширение масла при его работе компенсируется объемом азотной подушки, расположенной над зеркалом масла в верхней части 3 бака. Сухой азот предотвращает также окисление и увлажнение масла, что продлевает срок эксплуатации. Бак трансформатора ТМЗ имеет высокую механическую прочность и выдерживает избыточное давление до 75 кПа. Чтобы вводы ВН и НН располагались в масле, их располагают ниже его уровня на стенках бака.

В последние десятилетия в системах энергоснабжения объектов с повышенными требованиями к экологичности, пожаро- и взрывобезопасности получили распространение сухие (с воздушным охлаждением) силовые трансформаторы (рис. 1.3), по большей части с обмотками, залитыми огнестойкой эпоксидной смолой, служащей изоляцией и защитой от пыли и влаги. Пожаробезопасность позволяет разместить их ближе к потребителям, что снижает потери при передаче электроэнергии. Они также проще в обслуживании.

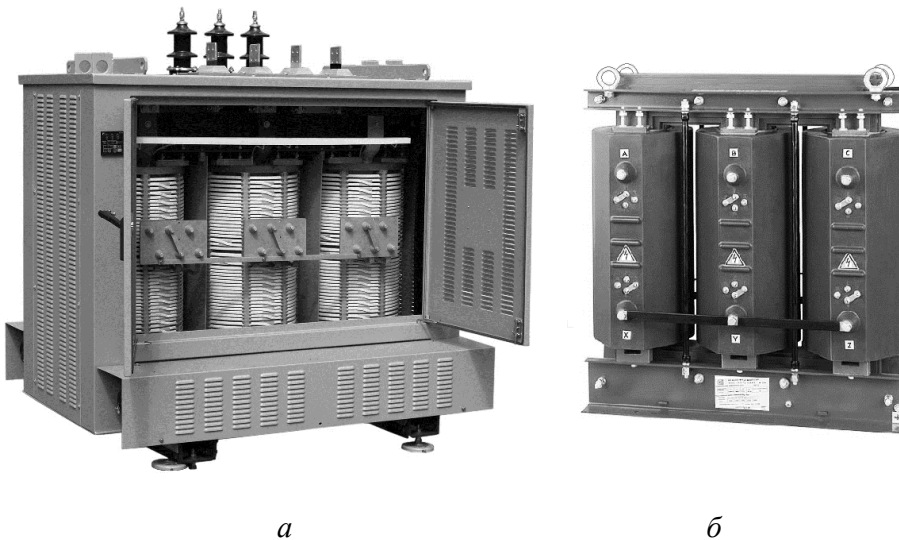


Рис. 1.3. Сухие трансформаторы:
а – в защитном кожухе (ТСЗ); *б* – с литой изоляцией (ТСЛ)

В то же время в сравнении с масляными сухие трансформаторы имеют ряд недостатков: более низкий КПД, меньшая перегрузочная способность, выше удельный расход активных материалов и стоимость, более короткий срок службы.

1.3. Активная часть

Активная часть трансформатора включает две или более обмотки с отводами и деталями изоляции, установленные на общем магнитопроводе, конструктивные части регулирующих устройств и детали, обеспечивающие механическое соединение этих компонентов (рис. 1.4).

Для интенсификации теплопередачи активная часть трансформатора в большинстве случаев размещается внутри бака, заполненного жидким диэлектриком (см. рис. 1.2), который одновременно является и основной изолирующей средой (его электрическая прочность выше, чем у воздуха), и теплоносителем в системе охлаждения (отбирает от обмоток и магнитопровода тепло, передавая его стенкам бака). Из жидких диэлектриков широкое применение получило трансформаторное масло – нетоксичное и относительно дешевое.

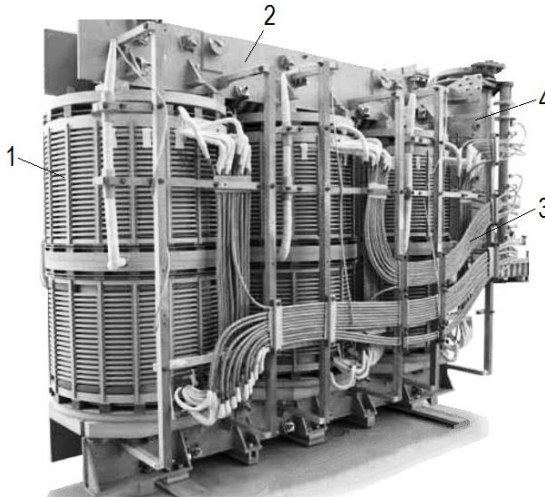


Рис. 1.4. Активная часть трансформатора ТРН:
1 – обмотки; 2 – магнитопровод (верхняя ярмовая часть); 3 – отводы;
4 – устройство регулирования напряжения (РПН)

1.3.1. Магнитопровод

Магнитопровод служит для уменьшения магнитного сопротивления при замыкании потока и служит остовом, на котором устанавливают обмотки и связанные с ними узлы и детали, составляющие активную часть. Он изготавливается из ферромагнитных материалов с высокой магнитной проницаемостью и узкой петлей гистерезиса (для уменьшения потерь на перемагничивание). Как следствие, в десятки раз уменьшается значение намагничивающего тока первичной обмотки для

создания требуемого значения рабочего магнитного потока. При этом увеличивается магнитная связь между обмотками. Качество используемых материалов влияет на допустимую магнитную индукцию и потери энергии.

В настоящее время для изготовления магнитопроводов силовых трехфазных трансформаторов преимущественно используется листовая холоднокатаная текстурованная электротехническая сталь толщиной 0,3–0,35 мм с ориентировкой зерен в направлении проката, имеющая низкие удельные потери и допускающая индукцию до 1,7 Тл. Магнитные свойства такой стали вдоль направления проката значительно выше, чем у горячекатаной стали. В поперечном к прокату направлении ее магнитные свойства значительно хуже, т.е. эта сталь обладает резкой анизотропией.

Для увеличения удельного сопротивления электротехническая сталь легирована кремнием, для дополнительного уменьшения вихревых токов и вызываемых ими потерь энергии отдельные листы в пакете изолируются друг от друга.

В качестве изоляции используется двустороннее нагревостойкое покрытие листов стали толщиной на одной стороне до 5 мкм, наносимое на металлургическом заводе. Оно обеспечивает достаточно прочную и надежную изоляцию пластин при высоком коэффициенте заполнения сечения пакета пластин сталью. При мощностях трансформаторов более 100 МВ·А дополнительно усиливают изоляцию пластин путем нанесения поверх нагревостойкого покрытия одного слоя лаковой пленки толщиной около 0,1 мм. С увеличением толщины слоя изоляции уменьшается теплопроводность через сталь.

Применение современных марок сталей позволило значительно снизить массу магнитопровода и обмоток и массогабаритные показатели трансформаторов в целом. Масса трансформаторов на единицу мощности в 1930 г. составляла 3,33 т/МВА, а в настоящее время – 0,74 т/МВА.

Перспективным материалом для магнитопроводов является лента из аморфного сплава, имеющая высокую магнитную проницаемость и низкие удельные потери.

В магнитопроводе выделяют стержни и ярма. Стержнями называют участки магнитопровода, на которых расположены обмотки. Ярма замыкают стержни в магнитном отношении.

Конструктивное исполнение магнитопроводов весьма разнообразно. Различают трансформаторы с плоскими и пространственными, стержневыми, броневыми бронестержневыми магнитопроводами (рис. 1.5).

В стержневых магнитопроводах каждое ярмо замыкает стержни с одной стороны. На рис. 1.5, *а* стержни 3, 5 замыкаются верхним ярмом 4 и нижним 6.

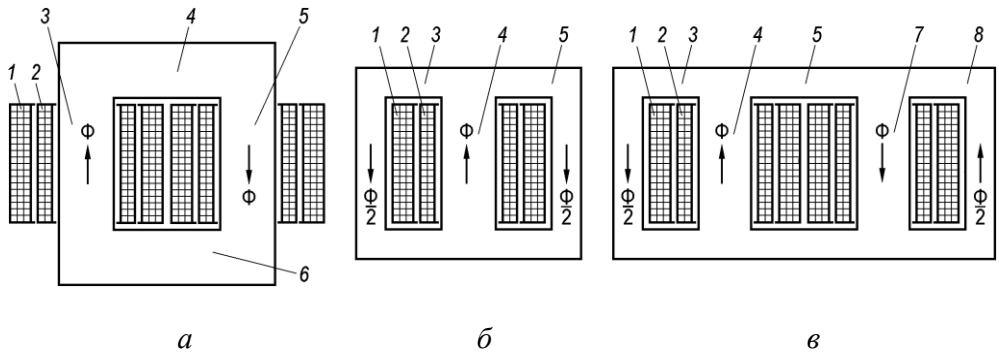


Рис 1.5. Магнитопроводы однофазных трансформаторов:
а – стержневой; *б* – броневой; *в* – бронестержневой;
 1 – обмотка ВН; 2 – обмотка НН; 3, 5, 8 – стержни; 4, 6, 7 – ярма

В броневых магнитопроводах (рис. 1.5, *б*) боковые ярма 3, 5 замыкают противоположные концы стержня 4, охватывая обмотки. Замыкаясь через ярма, в однофазных трансформаторах магнитный поток стержня разветвляется на две равные части. Аналогично – в бронестержневых магнитопроводах (рис. 1.5, *в*).

Бронестержневые магнитопроводы применяют в трехфазных трансформаторах мощностью более 100 МВ·А и напряжениями 220 кВ и выше. По сравнению со стержневыми они имеют меньшую высоту, что важно для выполнения требований по габаритам при транспортировке.

Трехфазные трансформаторы могут выполняться с плоскими магнитопроводами, в которых стержни лежат в одной плоскости, и с пространственными, где стержни располагаются в трех пересекающихся плоскостях, проходящих через стороны правильного треугольника.

В трехстержневом магнитопроводе магнитный поток каждой фазы замыкается через стержни соседних фаз. Наиболее широко используется плоская конструкция магнитопровода (рис. 1.6) как наиболее компактная и обеспечивающая наименьшие массогабаритные показатели трансформатора.

Существуют несколько способов изготовления магнитопроводов:

1. Путем шихтовки, когда магнитопровод как цельная конструкция собирается из отдельных листов стали внахлест, чтобы перекрыть воздушные промежутки в стыках между листами. При этом значительно снижается магнитное сопротивление потоку. Шихтованные различным

способом магнитопроводы в настоящее время являются наиболее массовыми.

Собранные из отдельных пластин стержни 1 и ярма 2, 3 стягиваются, чем улучшаются свойства магнитопровода, достигается расчетный размер и жесткость, снижающая шум при работе. Стяжка стержней осуществляется стеклобандажами 6; ярм – верхними 4 и нижними 5 ярмовыми балками, стальными полубандажами 7. Соединение верхней и нижней ярмовых балок производят с помощью вертикальных стальных шпилек 8.

Разработаны шихтованные магнитопроводы с одновременным использованием пластин из электротехнических сталей одинаковой толщины, но разных типов, например, стержни выполнены из анизотропной, а ярма – из менее дорогой изотропной стали.

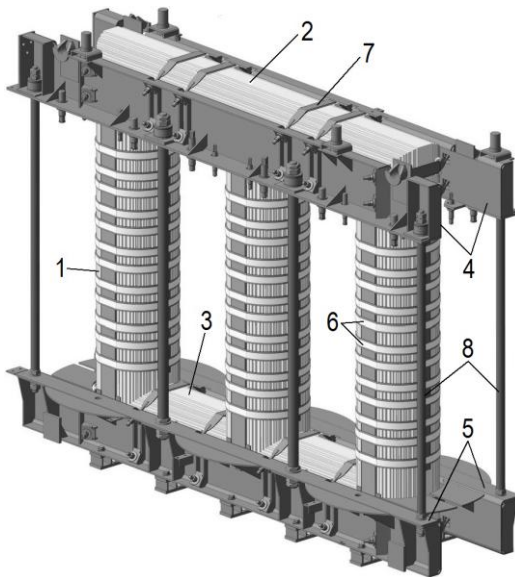


Рис. 1.6. Конструкция трехстержневого шихтованного магнитопровода:
1 – стержни; 2, 3 – верхнее и нижнее ярма; 4, 5 – верхние и нижние ярмовые балки;
6 – бандажи; 7 – полубандажи; 8 – вертикальные стяжные шпильки

2. Навивкой из ленты электротехнической стали или аморфного сплава. При этом образуется цельная конструкция без зазоров, что снижает до минимума намагничивающий ток.

В силовых трансформаторах поперечное сечение стержней приближают к кругу, выполняя его ступенчатым из пакетов пластин различной ширины (рис. 1.7).

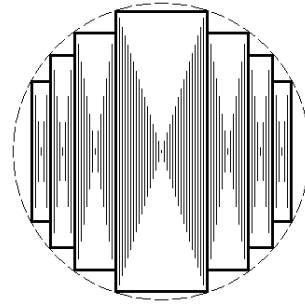


Рис 1.7. Сечение стержня
шихтованного магнитопровода

Это позволяет применять обмотки цилиндрической формы, которые проще в изготовлении и требуют меньше обмоточного провода.

1.3.2. Обмотки

Обмотки трансформатора состоят из провода и изоляционных деталей. Они образуют цепи для электрического тока, благодаря которому происходит преобразование электрической энергии. Трансформаторы могут быть двухобмоточными – с обмоткой высшего (ВН) и низшего (НН) напряжения, трехобмоточными – с обмоткой высшего, среднего (СН) и низшего напряжения и многообмоточными (при малой мощности). Они должны иметь достаточную электрическую и механическую прочность, выдерживать значительные электродинамические силы при протекании токов КЗ.

Обмотки ВН и НН классифицируются по взаимному расположению относительно друг друга. Различают концентрическое и чередующееся расположение (рис. 1.8).

При концентрическом расположении обмотки НН и ВН выполняют в виде цилиндров и располагают на стержне концентрически одна относительно другой (рис. 1.8, а). Ближе к стержню обычно располагают обмотку НН, что позволяет упростить конструкцию изоляции. При чередующемся расположении (рис. 1.8, б) – сильнее магнитная связь между обмотками, лучше доступ охлаждающей среды к обмоткам; при больших токах легче выполнить одинаковые по параметрам параллельные ветви. В то же время значительно больше число соединительных паяк, конструкция изоляции сложнее.

Наиболее часто применяется концентрическое расположение обмоток ВН и НН. Чередующееся расположение используется в специальных трансформаторах, в частности, печных. При больших токах из отдельных групп катушек чередующейся обмотки могут быть легко образованы параллельные цепи.

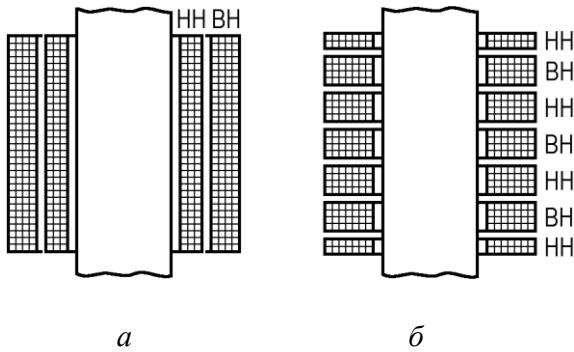


Рис. 1.8. Расположение обмоток ВН и НН в трансформаторе:
а – концентрическое; *б* – чередующееся

Обмотки выполняют из медных или алюминиевых проводников прямоугольного или круглого сечения. Медные проводники имеют меньшее электрическое сопротивление, механически более прочны, технологичны в производстве. Это обусловило их широкое применение для обмоток трансформаторов и электрических машин. Однако запасы меди в природе ограничены, что побуждает к более широкому использованию алюминия, удельное электрическое сопротивление которого в 1,7 раза больше, чем у меди, а плотность в 3,3 раза меньше. В настоящее время алюминиевые обмотки применяют в трансформаторах мощностью до 6300 кВА.

Концентрические обмотки по конструктивному исполнению и способу намотки разделяют на цилиндрические слоевые, винтовые, непрерывные спиральные катушечные, ленточные (фольговые), переплетенные (петлевые) обмотки. Применяются также разновидности указанных обмоток.

Цилиндрической слоевой называется обмотка, образованная витками, намотанными на цилиндрической поверхности вплотную друг к другу (рис. 1.9). При этом виток может состоять из одного или нескольких параллельных проводов (составляющих сечение витка), расположенных рядом по высоте обмотки.

Цилиндрические обмотки могут быть одно-, двух- или многослойными. Слоем 1 (см. рис. 1.9, *а, б*) называется ряд витков, расположенных вплотную друг к другу на одной цилиндрической поверхности. Малое число слоев характерно для обмоток класса 0,4 кВ. Многослойные обмотки используются в обмотках более высоких классов напряжения, так как позволяют выполнить большое число витков. Переход из одного слоя в другой осуществляется в процессе намотки без пайки.

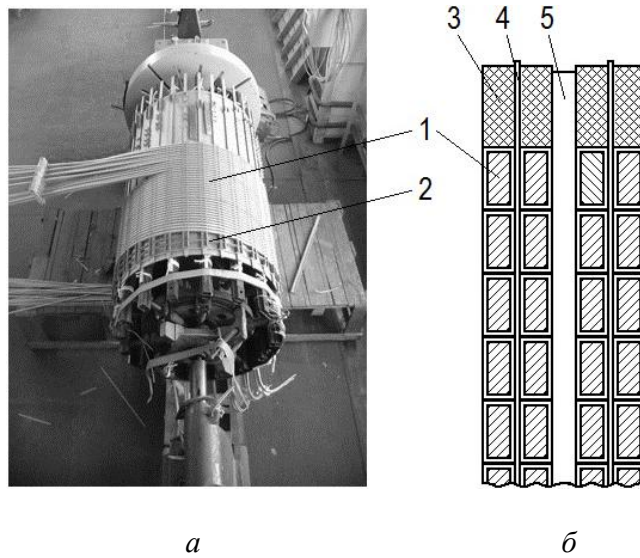


Рис. 1.9. Цилиндрическая обмотка:

а – процесс намотки; *б* – разрез четырехслойной обмотки:

1 – проводники; 2 – не заполненная проводниками при намотке часть поверхности;
3 – опорная изоляция; 4 – междуслойная изоляция; 5 – рейка

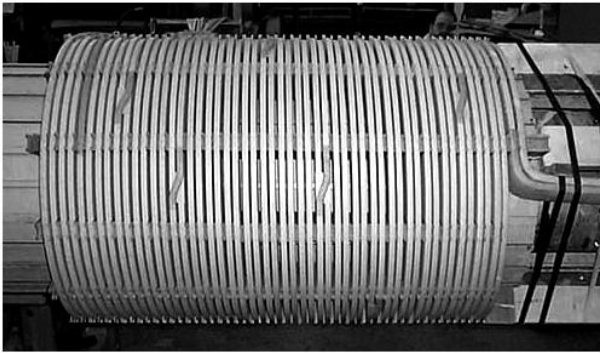
Часть цилиндрической поверхности 2, прилежащая к крайнему (торцевому) витку слоя 1, остается не заполненной проводниками (см. рис. 1.9, *а*). Для опоры при намотке следующих слоев ее заполняют (выравнивают) бумажно-бакелитовыми кольцами 3 (см. рис. 1.9, *б*). Слои обмотки изолируют друг от друга междуслойной изоляцией 4 из кабельной бумаги. Катушки обмотки с целью образования осевого канала для прохождения охлаждающего масла разделяют дистанционными рейками (планками) 5 из твердых пород дерева или электрокартона.

Цилиндрические обмотки просты в производстве и широко используются в трансформаторах до 1000 кВА и более.

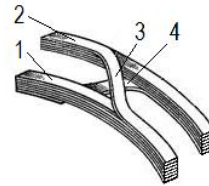
Винтовой называется одно- или двухслойная обмотка, намотанная на цилиндрической поверхности обычно с радиальными каналами между витками для лучшего охлаждения (рис. 1.10, *а*). Такие обмотки используют в силовых трансформаторах мощностью 630 кВА и выше при больших токах и невысоких напряжениях. Они могут иметь один, два и более ходов, взаимно расположенных подобно ходам резьбы двухходового (многоходового) винта.

Ход винтовой обмотки состоит из нескольких (до 6) параллельных проводов прямоугольного сечения, положенных друг на друга в радиальном направлении. Параллельные проводники лежат на окружностях

с разными диаметрами и длиной, вследствие чего имеют различные параметры (активные и индуктивные сопротивления). Это приводит к неравномерному распределению по ним тока и увеличению потерь. Для устранения в различиях параметров в каждом витке хода винтовых обмоток выполняют транспозицию (попеременную перекладку) проводников.



а



б

Рис. 1.10. Двухходовая винтовая обмотка:

а – в процессе производства; б – равномерная транспозиция проводов:
1 – первый ход; 2 – второй ход; 3 – переход из первого хода во второй;
4 – переход из второго хода в первый

В двухходовой обмотке производят равномерно распределенную транспозицию. Всю обмотку по числу витков делят на участки, число которых равно числу параллельных проводов. На каждом участке перекладывают нижний провод первого хода – во второй ход, а верхний провод второго хода – в первый (рис. 1.10, б). Таким образом, каждый из параллельных проводов последовательно бывает во всех положениях, что приводит к выравниванию сопротивления всех проводов.

Четырехходовую винтовую обмотку разбивают на две пары, в каждой из которых выполняют аналогичную транспозицию.

При групповой транспозиции циклически изменяется расположение двух и более групп параллельных проводов витка.

В настоящее время для обмоток мощных трансформаторов при больших токах все шире используют подразделенные и транспонированные провода (рис. 1.11).

Подразделенный провод ПБП состоит из нескольких (от двух до четырех) элементарных изолированных проводников ПБ, имеющих общую изоляцию.

Транспонированный провод ПТ состоит из нечетного числа прямоугольных проводников с эмалевой изоляцией, расположенных в 2 ряда, взаимное расположение которых периодически меняется по принципу круговой перестановки. Поверх транспонированных проводников накладывается общая бумажная изоляция из кабельной бумаги. Как и при транспозиции параллельных проводов обмотки, в транспонированном проводе выравнивается полное сопротивление элементарных проводников.

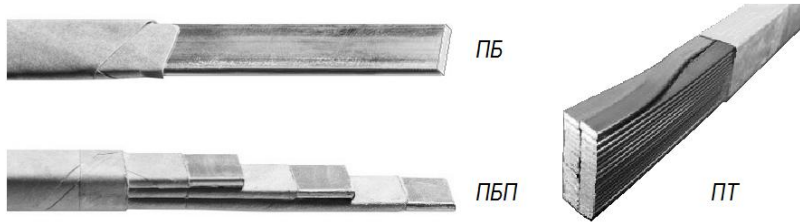


Рис. 1.11. Провода прямоугольного сечения:
 ПБ – обычный; ПБП – подразделенный; ПТ – транспонированный

Подразделение и транспонирование проводов дает ряд преимуществ:

- снижается трудоемкость изготовления обмоток;
- уменьшаются масса и размеры обмоток, что приводит к соответствующему снижению массы и габаритов магнитопровода и трансформатора в целом;
- меньшее сечение элементарных проводников снижает добавочные потери от вихревых токов, наводимых полем рассеяния;
- в транспонированных проводах повышается коэффициент заполнения сечения витка медью благодаря замене бумажной изоляции каждого проводника эмалевой изоляцией меньшей толщины;
- повышается механическая прочность обмоток и, как следствие, их электродинамическая стойкость при коротком замыкании.

Непрерывные катушечные обмотки состоят из ряда плоских катушек (рис. 1.12), которые наматываются по спирали изолированным проводом прямоугольного сечения и соединяются между собой последовательно без пайки (непрерывно). В результате у одной из пары соседних катушек началом является внешний виток, а у другой – внутренний.

Виток непрерывной обмотки обычно состоит из одного, но может состоять также из двух, трех или нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения, расположенных плашмя в радиальном направлении. Во втором случае по тем же причинам, что и для винтовой обмотки, требуется транспозиция параллельных проводов. Между всеми катушками (или через одну) выполняют радиальные охлаждающие каналы.

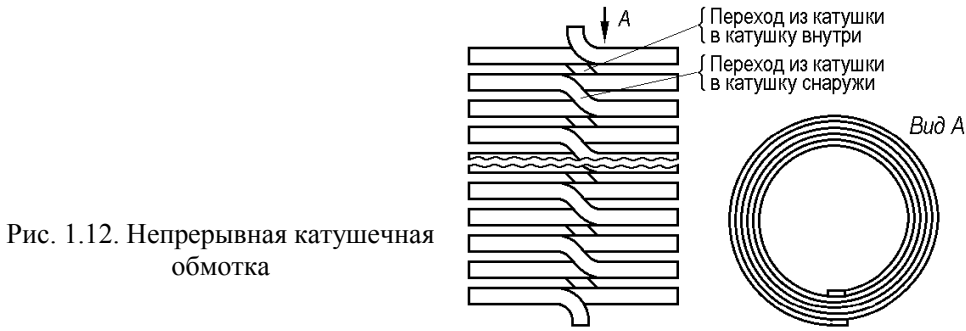


Рис. 1.12. Непрерывная катушечная обмотка

Это достигается намоткой временной катушки с последующим пере-
кладыванием ее витков, как показано на рис. 1.13.

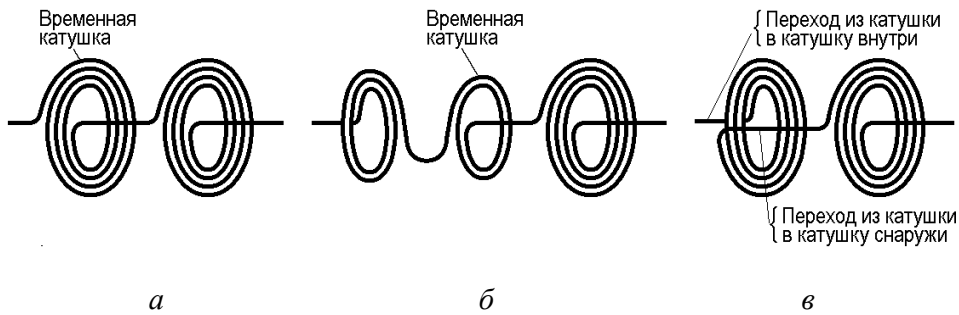


Рис. 1.13. Непрерывная намотка путем перекладки витков временной катушки:
а – до перекладки; б – в процессе перекладки; в – после перекладки

Непрерывная катушечная обмотка и ее разновидности используются в силовых трансформаторах мощностью более 1000 кВА (см. рис. 1.4) для сторон высокого и среднего напряжения, поскольку она устойчива к электродинамическим воздействиям при коротких замыканиях и обладает хорошей теплоотдачей.

Применяют также другие типы обмоток, в частности, переплетенную, дисковую катушечную и др.

В нашей стране и за рубежом для изготовления обмоток трансформаторов мощностью до 630 кВА все шире применяются медная и алюминиевая лента (фольга) толщиной от десятых долей до нескольких миллиметров (рис. 1.14). В качестве изоляции между витками используется изолирующая пленка, специальная бумага или ткань, пропитанные смолой. В процессе сушки витки прочно склеиваются с помощью изоляционного материала.

Такие обмотки просты в намотке, выдерживают более высокие динамические нагрузки при коротких замыканиях. Они также имеют большую теплопроводность в осевом и радиальном направлениях в

сравнении с обмотками, намотанными из изолированного провода, что приводит к более равномерному распределению температуры по поперечному сечению обмотки и, как следствие, уменьшению нагрева ее внутренней части.



Рис. 1.14. Обмотка из ленты

Замена проводов на фольгу и ленту позволяет значительно повысить коэффициент заполнения объема обмотки активным проводником, в результате чего уменьшаются размеры, масса обмоток и электрические потери в них. Это приводит к снижению массы и габаритов трансформатора в целом, повышает КПД.

Основными недостатками подобных обмоток являются существенно более высокая стоимость ленты в сравнении с изолированным проводом и трудность крепления отводов. Обмотки НН напряжением до 1 кВ обычно выполняют из рулонной ленты (фольги) шириной, равной высоте обмотки. Обмотки ВН класса напряжения 6–10 кВ из-за большего числа витков выполняют из ряда катушек, располагаемых в осевом направлении (см. рис. 1.14), которые необходимо дополнительно соединять между собой. Поэтому в некоторых случаях обмотку ВН изготавливают из изолированного провода, а обмотку НН – из фольги.

Перспективными для применения в обмотках являются высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП-трансформаторы) и специальные высоковольтные кабели (кабельные трансформаторы).

В масляных трансформаторах главной изоляцией обмоток является трансформаторное масло в сочетании с твердыми диэлектриками: бумагой, электрокартоном, гетинаксом, деревом.

В сухих трансформаторах широко применяются изоляция обмоток на основе кремнийорганических материалов повышенной нагревостойкости.

1.4. Трехфазные трансформаторы

Трехфазные трансформаторы имеют наиболее широкое применение в системах электроснабжения. Это связано с тем, что на электростанциях электроэнергия производится в виде системы трехфазного тока.

Устройство трехфазных и однофазных трансформаторов в целом аналогично. На рис. 1.4 была представлена наиболее распространенная конструкция активной части трехфазного трансформатора с плоским магнитопроводом и концентрическим расположением обмоток ВН и НН относительно друг друга.

Во многих учебных пособиях и руководствах, следуя сложившейся традиции, выводы фаз обмоток ВН силового трехфазного трансформатора обозначаются прописными буквами: начала – *A, B, C*, концы – *X, Y, Z*. Выводы фазных обмоток НН – строчными буквами: начала – *a, в, с*, концы – *x, y, z*. Вывод нейтральной точки обмотки, соединенной в звезду или зигзаг, – *0*.

В современных ГОСТах требования к маркировке выводов и ответвлений силовых трансформаторов и электрических машин приведены в соответствие со стандартами Международной электротехнической комиссии (МЭК). В структуре буквенно-цифровой маркировки используется система обозначений, основанная на чередовании прописных букв латинского алфавита и арабских цифр (рис. 1.15).

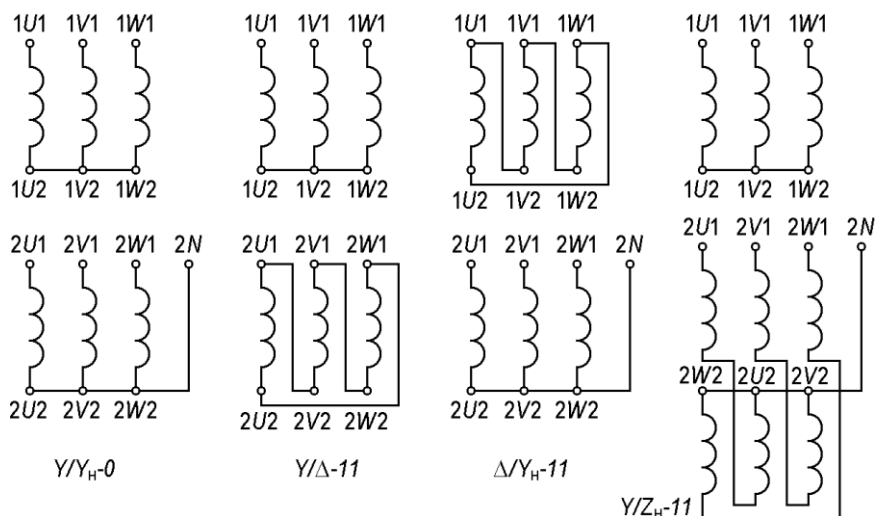


Рис. 1.15. Схемы и группы соединения фаз обмоток двухобмоточного трехфазного трансформатора

Линейные выводы обмотки трехфазного силового трансформатора обозначают буквами U , V , W , которые помещают перед цифрами, обозначающими начало и конец фазы. Вывод нейтрали обмотки, соединенной в звезду или зигзаг, обозначают буквой N .

Начало и конец фазы маркируют, соответственно, цифрами 1 и 2. У автотрансформаторов общий конец двух обмоток фазы маркируют цифрой 2.

Различные обмотки трансформатора обозначают цифрами 1, 2, 3... (в порядке уменьшения номинальных напряжений), которые помещают перед буквами U , V , W , N .

1.4.1. Схемы соединения фаз обмоток

Обмотки силовых трехфазных трансформаторов соединяются по схемам «звезда» (Y), треугольник (Δ) и зигзаг (Z) (см. рис. 1.15).

В схеме «звезда» концы фаз обмотки соединены в одну общую потенциальную точку, называемую нейтралью, которая может иметь различный режим, в частности, изолирована, глухо заземлена или подключена к нейтральному проводу. Наличие вывода нейтральной точки обозначается буквой « n »: Y_n , Z_n . В звезду могут быть соединены различные обмотки силовых трансформаторов: ВН, СН и НН. По схеме звезда с выведенной нулевой точкой соединяются обычно обмотки ВН мощных трансформаторов при напряжениях 110 кВ и выше и обмотки НН 0,4 кВ распределительных трансформаторов, что дает возможность заземления нейтрали.

В схеме «треугольник» начало одной фазы соединено с концом другой, в результате чего фазы обмотки образуют замкнутый контур. Общие точки соединения начал и концов соединены с соответствующими вводами. При симметричном режиме по замкнутому контуру «треугольника» ток не возникает, так как сумма фазных ЭДС вдоль него равна нулю вследствие их равенства между собой и сдвига по фазе на $2\pi / 3$. Обычно обмотки НН класса 6 кВ и выше повышающих трансформаторов, а также большей части понижающих трансформаторов соединяются в треугольник. Эта схема также применяется для обмоток ВН понижающих трансформаторов.

Соединение в «зигзаг» обычно используется на стороне НН. Каждая фаза обмотки состоит из двух одинаковых полуфаз, расположенных в соответствии с порядком чередования фаз на соседних стержнях. В схеме «зигзаг» конец первой полуфазы на одном стержне соединен с концом второй полуфазы на другом стержне. Начала вторых полуфаз обмотки соединены в одну общую потенциальную (нейтральную) точку.

Соединение в «зигзаг» можно рассматривать как разновидность соединения в «звезду».

1.4.2. Группы соединения фаз обмоток

В системах электроснабжения предприятий в процессе эксплуатации в ряде случаев возникает необходимость в параллельной работе трансформаторов. Это может быть как кратковременная работа на период оперативных переключений, так и длительная, обусловленная технико-экономическими причинами. Для определения возможности включения силовых трансформаторов на параллельную работу необходимо знать сдвиг по фазе, который они вносят в преобразуемое напряжение, т.е. разность фаз между линейными напряжениями первичной и вторичной обмоток. Для характеристики этого сдвига вводится понятие о группе соединения обмоток. У параллельно работающих трансформаторов они должны быть одинаковы. В противном случае из-за разности фаз, обусловленной различием групп соединения, линейные ЭДС вторичных обмоток не будут взаимно уравновешены, и по обмоткам трансформатора будет протекать недопустимо большой уравнивающий ток, многократно превышающий номинальное значение. Это может привести к перегреву обмоток и отказу трансформатора.

Группой соединения обмоток трехфазного трансформатора называется условное число от 0 до 11, характеризующее сдвиг по фазе линейных ЭДС обмоток среднего и низшего напряжений по отношению к линейной ЭДС обмотки высшего напряжения. Это число, умноженное на 30° , дает угол отставания в градусах векторов линейных напряжений обмоток НН и СН по отношению к векторам соответствующих напряжений обмотки ВН. В трехфазных трансформаторах этот угол может иметь 12 значений от 0° до 360° через 30° , в однофазных – только два значения: 0° или 180° .

Понятие группы имеет смысл только при одинаковом порядке чередования фаз обмоток ВН и НН.

Номер группы можно определить по векторной диаграмме одноименных линейных напряжений (или ЭДС), изображенной в системе координат в виде циферблата часов. Если вектор линейного напряжения обмотки ВН принять за минутную стрелку и установить на «0» часов, то принятый за часовую стрелку вектор линейного напряжения обмотки НН укажет номер группы. Проиллюстрируем это примером.

На рис. 1.16, а, б представлены потенциальные векторные диаграммы фазных и линейных напряжений, построенные для схемы соединений обмоток $\Delta / Y_n - 11$ (см. рис. 1.15). Представим, что пара одноименных (например, U_{AB} и U_{ab}) векторов линейных напряжений обмоток яв-

ляются жестко связанными минутной и часовой стрелками на циферблате стрелочных часов. Если вектор $\underline{U}_{AB}$ линейного напряжения ВН («минутная стрелка») установить на «12», то вектор $\underline{U}_{ab}$ одноименного линейного напряжения НН («часовая стрелка») укажет группу соединений обмоток трансформатора (рис. 1.16, в).

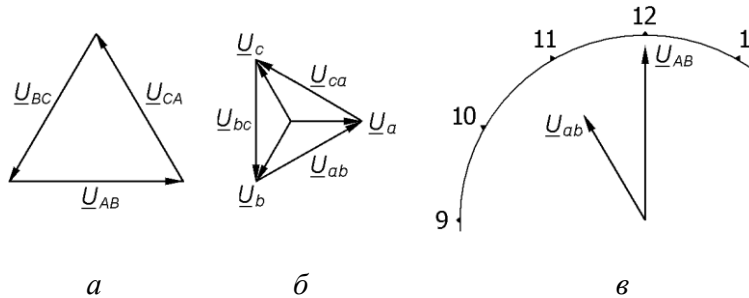


Рис. 1.16. Определение группы соединений обмоток трехфазного трансформатора:

a, б – потенциальные диаграммы векторов ВН и НН при схеме соединений обмоток Δ/Y_H -11; *в* – определение группы 11 «часовым» методом

Установим, как изменится группа соединения Δ/Y_H -11 после циклической перемаркировки выводов обмотки НН по часовой стрелке: $a, в, с \rightarrow с, а, в$ (рис. 1.17, *г, д, е*).

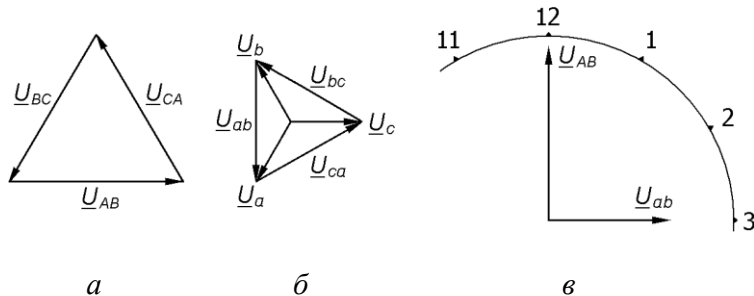


Рис. 1.17. Изменение группы соединений при циклической перемаркировке выводов:

a, б – потенциальные диаграммы векторов ВН и НН при схеме соединений обмоток Δ/Y_H -3; *в* – определение группы 3 «часовым» методом

Общий вид потенциальной диаграммы векторов НН (ср. рис. 1.16, *б* и рис. 1.17, *б*) останется прежним, но изменятся обозначение и фазы векторов, соответствующих новой маркировке. После перемаркировки «новоименованный» вектор $\underline{U}_{ab}$ (см. рис. 1.17, *д*) поменял фазу на 120° по часовой стрелке относительно прежнего одноименного вектора

(см. рис. 1.16, б), что приводит к изменению группы на $\Delta / Y_n - 3$ (см. рис. 1.17, е).

Условное буквенно-цифровое обозначение схемы и группы соединения обмоток трехфазного трансформатора имеет следующую структуру: **схема обмотки ВН $\rightarrow$ схема обмотки НН $\rightarrow$ группа**, например: $\Delta / Y_n - 11$.

В соответствии с ГОСТом силовые трехфазные трансформаторы изготавливаются с группами соединения обмоток «0» или «11». Угол отставания векторов линейных напряжений обмотки НН по отношению к векторам соответствующих напряжений обмоток ВН для группы «0» составляет 0° , а для группы «11» – 330° . В трехфазных трансформаторах эти группы могут соответствовать различным комбинациям схем соединения фаз обмоток высшего и низшего напряжения: $Y / Y_n - 0$, $Y / \Delta - 11$, $Y / Z_n - 11$, $\Delta / Y_n - 11$ и др.

Группа соединения каждого силового трансформатора проверяется перед первым вводом в эксплуатацию или после ремонта.

Различные группы можно получить сочетанием:

- схем соединения фаз обмоток ВН и НН;
- маркировки зажимов этих фаз по стержням трансформатора;
- направления намотки.

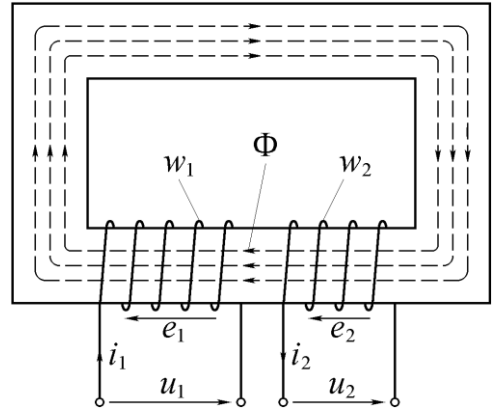
Четные группы образуются при однотипных схемах соединения обмоток ВН и НН (Y / Y , Δ / Δ , Z / Z), а также Δ / Z ; нечетные – при разнотипных (Y / Δ , Δ / Y и Y / Z). У основных групп катушки фаз с одинаковой маркировкой выводных зажимов располагаются на одних и тех же стержнях, у производных – на различных. Производные группы соединения обмоток можно получить из основных путем перемаркировки зажимов (без изменения порядка чередования фаз).

Однофазные трансформаторы могут принадлежать только к группам «0» или «6».

1.5. Принцип действия трансформатора

Работа трансформатора основана на явлении взаимной индукции обмоток (рис. 1.18). Предположим, что первичная обмотка трансформатора подключена к электрической сети. Под действием приложенного напряжения по ней будет протекать переменный ток, вызывающий переменный магнитный поток. Этот поток замыкается преимущественно по магнитопроводу и, пересекая витки обмоток, индуцирует в них электродвижущие силы (ЭДС). Если вторичную обмотку замкнуть на какой-либо приемник энергии, то под действием индуцируемой ЭДС по замкнутой вторичной электрической цепи будет протекать переменный ток. Одновременно вследствие индукционной связи обмоток, изменится первичный ток: в нем появится дополнительная нагрузочная составляющая.

Рис. 1.18. Принцип работы трансформатора



Установим соотношение для напряжений и токов обмоток на примере идеального трансформатора, у которого:

- 1) активные сопротивления обмоток равны нулю;
- 2) магнитопровод имеет бесконечно большую магнитную проводимость, благодаря чему между обмотками трансформатора обеспечивается полная магнитная связь;
- 3) результирующий магнитный поток Φ , создаваемый обмотками, замыкается только по магнитопроводу, потоков рассеяния – нет;
- 4) потери в магнитопроводе отсутствуют.

Предположим также, что витки каждой из обмоток трансформатора соединены последовательно и согласно.

В соответствии с законом электромагнитной индукции индуцируемая в обмотках трансформатора ЭДС прямо пропорциональна скорости изменения пересекающего их результирующего магнитного потока $w\Phi$ (потокосцепления): $e = -w d\Phi/dt$, где w – число витков обмотки. При синусоидальном подведенном напряжении магнитный поток идеального трансформатора также изменяется во времени синусоидально: $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$. После его подстановки в закон электромагнитной индукции получим выражение для ЭДС произвольной обмотки:

$$e = \omega w \Phi_m \cos \omega t.$$

Ее действующее значение равно:

$$E = \omega w \Phi_m / \sqrt{2} = (2\pi / \sqrt{2}) f w \Phi_m \approx 4,44 f w \Phi_m. \quad (1.1)$$

Видно, что индуцируемая ЭДС прямо пропорциональна числу витков w обмотки, амплитуде Φ_m магнитного потока и частоте f его изменения во времени.

Согласно принятым допущениям в идеальном трансформаторе активные сопротивления обмоток равны нулю, и ЭДС первичной и вторичной обмоток индуцируются только потоком, замыкающимся по магнитопроводу. В этом случае в соответствии со вторым законом Кирхгофа напряжения на выводах обмоток будут равны индуцируемым в них ЭДС:

$$u_1 = e_1, \quad u_2 = e_2.$$

Из этих уравнений следует, что в идеальном трансформаторе отношение индуцируемых ЭДС обмоток или напряжений на их зажимах равно отношению чисел витков этих обмоток. Это отношение называется коэффициентом трансформации:

$$k_{\text{тр}} = w_1 / w_2 = E_1 / E_2 = U_1 / U_2. \quad (1.2)$$

Если $w_2 > w_1$, то $U_2 > U_1$; в этом случае трансформатор называют повышающим. И, наоборот, при $w_2 < w_1$, $U_2 < U_1$ трансформатор называют понижающим.

В режиме нагрузки результирующий магнитный поток взаимной индукции создается суммарным действием токов витков первичной и вторичной обмоток, или, как принято говорить, их суммарной магнитодвижущей силой (МДС). Согласно закону полного тока, циркуляция вектора $\mathbf{H}$ напряженности магнитного поля по замкнутому контуру равна полному току, охватываемому этим контуром, т.е. МДС обмоток: $F = \oint \mathbf{H} d\mathbf{l}$ ($d\mathbf{l}$ – векторный элемент длины контура). Для поля взаимной индукции трансформатора выбираемый контур должен проходить внутри магнитопровода. В идеальном магнитопроводе $\mathbf{H} = 0$ и поэтому $F = \oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = w_1 i_1 - w_2 i_2 = 0$. Таким образом, при нагрузке МДС первичной и вторичной обмоток уравниваются друг друга: $w_1 i_1 = w_2 i_2$.

Из равновесия МДС следует, что сила токов в обмотках идеального трансформатора обратно пропорциональна числу их витков.

$$I_2 / I_1 = w_1 / w_2 = k_{\text{тр}}. \quad (1.3)$$

Из соотношений (1.3) и (1.4) для напряжений и токов легко получить уравнение баланса мощностей на зажимах первичной и вторичной обмоток идеального трансформатора:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2. \quad (1.4)$$

Согласно уравнению (1.4) подводимая к трансформатору мощность полностью передается нагрузке, что очевидно, так как в идеальном трансформаторе отсутствуют потери мощности.

Поскольку при трансформации напряжения и тока мощность остается постоянной, то при повышении трансформатором напряжения, сила тока уменьшается, и наоборот. Это свойство широко используется на практике. Например, для передачи электрической энергии на большие расстояния повышают класс напряжения ЛЭП, чтобы уменьшить силу тока и связанные с этим потери и расход проводниковых материалов.

Полученные для идеального трансформатора соотношения (1.2)–(1.4) приближенно справедливы и для реального трансформатора.

В дальнейшем мы будем рассматривать реальный трансформатор, для которого примем допущение, что магнитная проницаемость сердечника в рабочих режимах не изменяется ($\mu = \text{const}$). Тогда при условии, что подведенное к трансформатору первичное напряжение изменяется во времени по синусоидальному закону, все токи, магнитные потоки и ЭДС, а также вторичное напряжение будут синусоидальными.

1.6. Составляющие магнитного поля и основные уравнения

В реальном трансформаторе, в отличие от идеального, преобразование энергии сопровождается ее потерями в обмотках, магнитопроводе и других элементах конструкции. Между его обмотками нет полной магнитной связи вследствие того, что магнитопровод обладает конечной магнитной проводимостью, и обмотки не могут совпадать по расположению в пространстве.

По первичной и вторичной обмоткам трансформатора в режиме нагрузки протекает ток. При этом МДС обмоток возбуждает магнитное поле во всем окружающем пространстве. Для математического моделирования неполной магнитной связи реальный магнитный поток разлагают на составляющие по признаку сцепления с витками обмоток: на основной поток (взаимной индукции) Φ и потоки рассеяния (самоиндукции) Φ_{p1} и Φ_{p2} (рис. 1.19). Принимается, что основной магнитный поток замыкается по сердечнику и сцеплен с витками обеих обмоток. Он обеспечивает передачу электрической энергии от первичной обмотки к вторичной путем взаимной индукции. Потоки рассеяния сцеплены с витками только «своих» обмоток.

Разделение реального магнитного потока трансформатора на составляющие по принципу сцепления с витками первичной и вторичной обмоток, по сути, является специфическим видом математического разложения. Проведенные теоретические исследования показали, что оно не-

однозначно. Ни математически, ни экспериментально невозможно для отдельных контуров рассматриваемой пары обмоток однозначно определить потоки взаимной индукции и рассеяния. Однако, учитывая, что магнитопровод в сотни раз уменьшает сопротивление потоку, можно приближенно принять, что потоки взаимной индукции каждой из обмоток их результирующий (основной) поток замыкаются только по магнитопроводу. Тогда поля рассеяния можно также приближенно определить как разность между реальным полем каждой обмотки и частью ее поля, замыкающегося по магнитопроводу. Очевидно, основанная на этом теория трансформатора является приближенной. Однако вносимая при подобном подходе погрешность относительно невелика, так как результирующий основной магнитный поток, замыкающийся по магнитопроводу, во много раз превышает потоки рассеяния.

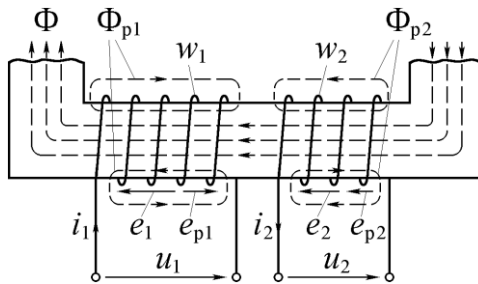


Рис. 1.19. Составляющие магнитного поля и условные положительные направления ЭДС, напряжений и токов в трансформаторе

Для записи уравнений трансформатора необходимо выбрать условные положительные направления входящих в них величин: ЭДС, напряжений, токов. На рис. 1.19 выбраны такие, которые, с одной стороны, соответствуют физическим процессам в трансформаторе, а с другой – позволяют устранить излишние «минусы» в уравнениях. В первичной обмотке направление положительного тока совпадает с направлением приложенного напряжения, а направление действия основной ЭДС противоположно току (это соответствует правилу Ленца). Во вторичной обмотке направление положительного тока и напряжения на зажимах совпадает с направлением действия основной ЭДС.

В соответствии с принятым выше разложением можно считать, что в режиме нагрузки в обмотках реального трансформатора наводятся составляющие ЭДС, вызванные индукционным действием отдельных составляющих магнитных потоков. Основной рабочий магнитный поток индуцирует в обеих обмотках основные ЭДС (e_1 и e_2), потоки рассеяния наводят ЭДС рассеяния (e_{p1} и e_{p2}) в «своих» обмотках, витки которых они пересекают. По условию, напряжения, ЭДС и токи изменяются во

времени по синусоидальному закону и могут быть представлены в комплексной и векторной форме. При этом обычно пользуются их действующими значениями. Потоки рассеяния по величине намного меньше основного магнитного потока, и наводимые ими ЭДС рассеяния соответственно меньше основных ЭДС ($E_{p1} \ll E_1$, $E_{p2} \ll E_2$).

Основное магнитное сопротивление потокам рассеяния создает немагнитная среда с линейными параметрами, через которую они замыкаются. Поэтому значения этих потоков и наводимых ими ЭДС прямо пропорциональны токам соответствующих обмоток. Это дает возможность представить ЭДС рассеяния в комплексной форме в виде падения напряжения на индуктивных сопротивлениях рассеяния (x_1 и x_2) первичных и вторичных обмоток: $\underline{E}_{p1} = -jx_1 \underline{I}_1$, $\underline{E}_{p2} = -jx_2 \underline{I}_2$.

Потери энергии в обмотках учитываются введением соответствующих активных сопротивлений r_1 и r_2 . Под действием протекающих токов на них «падает» какая-то часть напряжения.

Для напряжений, токов и основных ЭДС сохраним такие же условные положительные направления, как и при рассмотрении идеального трансформатора, а ЭДС рассеяния примем совпадающими с соответствующими токами обмоток, как это обычно принято для ЭДС самоиндукции (см. рис. 1.19).

В соответствии со вторым законом Кирхгофа, уравнения электрического равновесия ЭДС и напряжений для контуров первичной и вторичной обмоток могут быть записаны в виде:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 + r_1 \underline{I}_1 + jx_1 \underline{I}_1, \quad (1.5)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - r_2 \underline{I}_2 - jx_2 \underline{I}_2. \quad (1.6)$$

Свойства реального магнитопровода можно отобразить через связь магнитных величин с электрическими величинами обмоток. В соответствии с законом полного тока по замкнутому контуру, проходящему внутри магнитопровода и охватывающему первичную и вторичную обмотки трансформатора, для режима нагрузки можно записать следующее выражение:

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = w_1 i_1 - w_2 i_2.$$

Ту же напряженность $\mathbf{H}$ в магнитопроводе гипотетически можно создать только одной первичной обмоткой в режиме холостого хода, когда $i_2 = 0$:

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = w_1 i_{10}, \quad (1.7)$$

где i_{10} – некоторый эквивалентный ток.

Соответствующая МДС первичной обмотки в режиме холостого хода должна иметь ту же величину и фазу, что и суммарная МДС обеих обмоток в режиме нагрузки:

$$w_1 i_1 - w_2 i_2 = w_1 i_{10}. \quad (1.8)$$

Уравнение (1.8) выражает равновесие магнитодвижущих сил обмоток трансформатора в режимах нагрузки и холостого хода при одном и том же магнитном состоянии сердечника.

Если в уравнение (1.8) вместо гипотетического i_{10} подставить реальный ток холостого хода i_0 , то равновесие магнитодвижущих сил трансформатора в режимах нагрузки и холостого хода при $\underline{U}_1 = \text{const}$ будет приближенным:

$$w_1 i_1 - w_2 i_2 \approx w_1 i_0. \quad (1.9)$$

Это вызвано тем, что при одинаковом первичном напряжении ($\underline{U}_1 = \text{const}$) основные ЭДС в первичной обмотке трансформатора в режимах нагрузки и холостого хода из-за различной величины падений напряжений будут несколько отличаться. Соответственно будут отличаться и амплитуды основных магнитных потоков в этих режимах и, как следствие, токи i_{10} и i_0 . При этом различие между этими токами, связанными с напряженностями поля $\mathbf{H}$ в магнитопроводе выражением (1.7) вследствие нелинейности кривой намагничивания может быть существенно больше, чем между потоками, особенно при насыщенной магнитной системе. Однако ввиду относительной малости реального тока холостого хода уравнение (1.9) дает удовлетворительную для инженерной практики точность.

1.7. Схемы замещения приведенного трансформатора

«Приведенным» называется некоторый условный трансформатор, у которого соответствующие обмоткам физические величины и параметры приведены к одинаковому числу витков, в общем случае произвольному. Чаще параметры вторичной обмотки приводят к числу витков первичной ($w_2' = w_1$), обозначая их штрихом. Преобразования имеют математический характер и не связаны с изменением геометрических и конструктивных факторов. В процессе приведения все составляющие полной мощности реального трансформатора сохраняются неизменными. В этом случае при изменении режима работы все физические вели-

чины в реальном и приведенном трансформаторе будут изменяться по одним и тем же законам.

Теоретическое исследование приведенного трансформатора во многих отношениях удобнее. Он может быть представлен достаточно простой схемой замещения без индуктивной связи между обмотками. Значения его первичных и вторичных величин близки по значениям и это делает более наглядными векторные диаграммы.

Формулы приведения вторичных величин к числу витков, соответствующему первичной обмотке ($w_2' = w_1 = k_{\text{тр}} w_2$) можно получить, исходя из эквивалентного математического преобразования уравнения (1.6). Умножим обе части этого уравнения на $k_{\text{тр}}$. Если выполнить приведение вторичных величин по формулам:

$$E_2' = k_{\text{тр}} E_2 = E_1, \quad U_2' = k_{\text{тр}} U_2, \quad I_2' = I_2 / k_{\text{тр}}, \quad r_2' = k_{\text{тр}}^2 r_2, \quad x_2' = k_{\text{тр}}^2 x_2,$$

то вторичное уравнение в приведенных величинах будет эквивалентно исходному:

$$\underline{U}_2' = \underline{E}_1 - r_2' \underline{I}_2' - jx_2' \underline{I}_2'. \quad (1.10)$$

Легко проверить, что все составляющие мощности приведенной и реальной вторичной обмотки трансформатора одинаковы, например, мощность активных потерь: $r_2' I_2'^2 = k_{\text{тр}}^2 r_2 (I_2 / k_{\text{тр}})^2 = r_2 I_2^2$.

Учитывая, что $w_2 I_2 = w_2' I_2' = w_1 I_1$, уравнение равновесия МДС (1.8) после сокращения обоих его частей на w_1 сводится к уравнению равновесия токов приведенного трансформатора, которое в комплексной форме будет иметь вид:

$$\underline{I}_1 - \underline{I}_2' = \underline{I}_{10}. \quad (1.11)$$

Это уравнение отражает свойство саморегулирования трансформатора, обусловленное магнитной связью обмоток: изменение силы тока во вторичной обмотке I_2 влечет соответствующее изменение тока I_1 в первичной обмотке.

Система уравнений трансформатора с приведенными вторичными величинами математически эквивалентна исходной, но имеет то преимущество, что ей можно поставить в соответствие определенную электрическую цепь – схему замещения. Схемой замещения трансформатора называется электрическая цепь, которая моделирует изменение его электрических величин в различных режимах. Физические процессы схема замещения не может моделировать.

Так как трансформатор является четырехполюсником, то и его схема

замещения должна иметь вид четырехполюсника. Она будет эквивалентна приведенному трансформатору, если описывающие ее уравнения аналогичны уравнениям рассматриваемого трансформатора. Системе уравнений (1.5), (1.10) и (1.11) приведенного трансформатора с реальным магнитопроводом удовлетворяет, так называемая, Т-образная схема замещения (рис. 1.20):

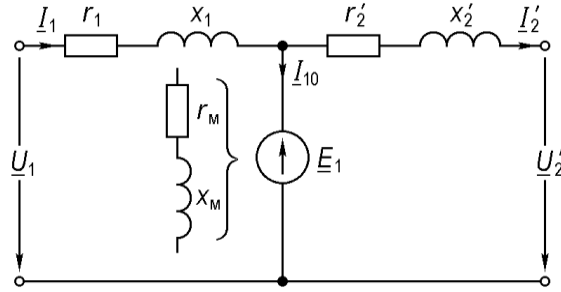


Рис. 1.20. Т-образная схема замещения трансформатора

Здесь $\underline{E}_1$ соответствует ЭДС, наводимой в обмотках приведенного трансформатора. Ветвь с источником ЭДС $\underline{E}_1$ и протекающим током $\underline{I}_{10}$ называют «намагничивающей», так как она моделирует процессы, связанные с замыканием магнитного потока по сердечнику. Произведение $-\underline{E}_1 \underline{I}_{10}$ (знак « $\leftarrow$ » отражает противоположное направление $\underline{E}_1$ и $\underline{I}_{10}$) соответствует полной намагничивающей мощности и имеет активную и реактивную составляющие, так как в общем случае $-\underline{E}_1$ и $\underline{I}_{10}$ сдвинуты по фазе на угол, несколько меньший $\pi/2$. Активная составляющая связана с наличием потерь энергии в сердечнике, а реактивная отражает конечное значение магнитной проводимости Λ_m . При идеальном магнитопроводе (при отсутствии потерь в сердечнике и магнитной проницаемости $\mu \rightarrow \infty$), как было показано выше, ток $\underline{I}_{10} \rightarrow 0$ и намагничивающая мощность равны нулю.

Ветвь с источником ЭДС обычно заменяется эквивалентной пассивной ветвью, параметры которой можно определив по закону Ома:

$$\underline{Z}_M = r_M + jx_M = -\underline{E}_1 / \underline{I}_{10}.$$

Параметры r_M , x_M называют, соответственно, активным и индуктивным сопротивлениями намагничивающего контура. Они являются эквивалентными параметрами первичной обмотки (являющейся обмоткой возбуждения), моделирующими процессы в реальном магнитопроводе: $r_M \underline{I}_{10}^2$ отражает потребление активной мощности, идущей на покрытие потерь, а $x_M \underline{I}_{10}^2$ – потребление реактивной мощности, обусловленное конечным магнитным сопротивлением сердечника основному потоку.

Поскольку индуктивные сопротивления рассеяния x_1 и x_2' не могут быть определены однозначно ни теоретически, ни экспериментально, система уравнений (1.5), (1.10) и (1.11) и соответствующая ей Т-образная схема не могут служить на практике точными математическими моделями, как это утверждается во многих учебниках. Однако они имеют большое методическое значение, являясь основой для построения расчетных моделей, приемлемых для практического применения.

Математическая модель любого реального объекта всегда является приближенной, потому что никогда не может учесть все его особенности. В то же время всегда нужно стремиться к тому, чтобы как можно полнее отразить реальный объект в модели, сделав ее более точной.

Практически приемлемая по точности математическая модель трансформатора получается оттого, что: а) магнитная связь между обмотками очень высокая; б) намагничивающий ток весьма мал; в) суммарное индуктивное поле рассеяния обмоток можно приближенно (но с достаточной для инженерной практики точностью) определить расчетным или экспериментальным путем.

Магнитопроводы современных трансформаторов обладают высокой магнитной проводимостью. Как следствие, в Т-образной схеме замещения $x_m \gg z_2'$, так что в ветвь (r_m, x_m) ответвляется относительно небольшой ток I_{10} . Поэтому для анализа работы при достаточно большой нагрузке эту ветвь из схемы можно исключить. Для реального трансформатора получается, так называемая, упрощенная схема замещения (рис. 1.21, а) с последовательно соединенными элементами r_1, x_1, r_2', x_2' , в которой: $r_k = r_1 + r_2'$ и $x_k = x_1 + x_2'$. Заметим, что эта же схема замещения будет точной для трансформатора с реальными обмотками и идеальным магнитопроводом, у которого намагничивающий ток $I_{10} = 0$. Параметры r_k, x_k называют сопротивлениями короткого замыкания, так как они рассчитываются из данных опыта короткого замыкания (см. ниже п. 1.8). В современных трансформаторах реактивное сопротивление x_k обычно в несколько раз превышает активное r_k . Поэтому в практических расчетах часто принимают $Z_k = x_k$.

Упрощенной схеме замещения соответствует, так называемое, «сквозное» уравнение трансформатора, связывающее первичные и вторичные напряжения:

$$\underline{U}_1 \approx \underline{U}_2' + (r_k + jx_k)\underline{I}_2' = \underline{U}_2' + \underline{Z}_k \underline{I}_2'. \quad (1.12)$$

В этой схеме учитывается только нагрузочная составляющая тока: $\underline{I}_1 \approx \underline{I}_2'$. Поэтому при небольших нагрузках точность расчетов по ней снижается.

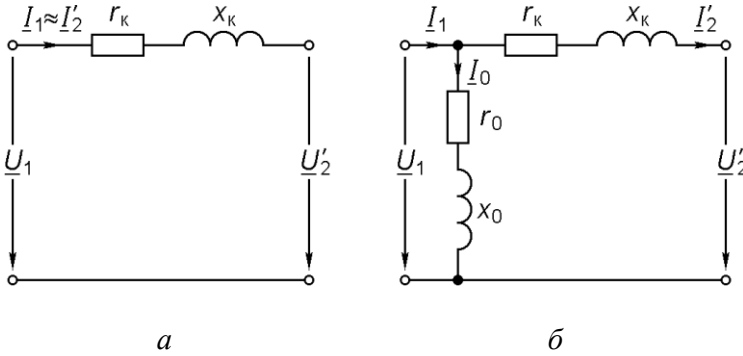


Рис. 1.21. Схемы замещения трансформатора:
а – упрощенная; б – Г-образная

Более точно реальный трансформатор моделируется Г-образной схемой замещения (рис. 1.21, б), которую можно рассматривать как совмещение упрощенной схемы с Т-образной схемой замещения при отсутствии нагрузки.

Таким образом, в Г-образной схеме замещения ветвь (r_0, x_0) дополнительно моделирует режим холостого хода:

$$r_0 = r_1 + r_m, \quad x_0 = x_1 + x_m.$$

Ветвь r_0 – x_0 включена непосредственно на зажимы источника питания, и поэтому ток $\underline{I}_0$ не зависит от режима работы трансформатора и остается неизменным, в то время как ток $\underline{I}_{10}$ в Т-образной схеме изменяется. Только при холостом ходе $\underline{I}_{10} = \underline{I}_0$. Поэтому применительно к реальному трансформатору соотношение между токами в нагрузочных режимах, даваемой Г-образной схемой замещения, будет приближенным:

$$\underline{I}_1 \approx \underline{I}_0 + \underline{I}_2'. \quad (1.13)$$

Выражение (1.13) можно интерпретировать как разложение тока первичной обмотки на сумму составляющих: нагрузочную, равную приведенному вторичному току $\underline{I}_2'$, и составляющую, соответствующую току холостого хода $\underline{I}_0$, не зависящую от нагрузки.

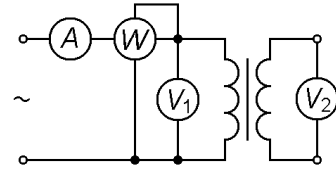
Г-образная схема замещения соответствует системе уравнений (1.12)–(1.13). Входящие в нее параметры r_0 , x_0 и r_k , x_k могут быть определены как опытным (см. ниже опыты холостого хода и короткого замыкания), так и расчетным путем при проектировании трансформатора.

1.8. Опыты холостого хода и короткого замыкания

Эксплуатационные свойства силовых трансформаторов определяются его основными электрическими параметрами: током и потерями холостого хода, напряжением и потерями короткого замыкания. Эти параметры должны соответствовать ГОСТу или специальным техническим условиям и определяются из соответствующих опытов, входящих в программу электромагнитных испытаний трансформаторов; порядок их проведения регламентирован ГОСТом. Исходя из них, можно рассчитать параметры Г-образной схемы замещения и характеристики рабочих режимов.

Холостым ходом (XX) трансформатора называют режим, когда его вторичная обмотка разомкнута (нагрузка отключена), так что $I_2 = 0$. В опыте XX, испытательная схема которого приведена на рис. 1.22, к первичной стороне подводится номинальное напряжение ($U_1 = U_{1н}$) номинальной частоты ($f = f_n$). Соблюдение этих условий обусловлено зависимостью от них измеряемых параметров.

Рис. 1.22. Схема опыта XX трансформатора



В этом опыте измеряют: напряжения U_1 и U_2 на выводах трансформатора, ток I_0 и мощность потерь P_0 (полезная нагрузка при XX отсутствует). По его данным рассчитывают: коэффициент трансформации и эквивалентные параметры r_0 , x_0 первичной обмотки в режиме XX.

$$z_0 = U_{1н} / I_0, \quad r_0 = P_0 / I_0^2, \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}. \quad (1.14)$$

Для трехфазных трансформаторов обычно берут среднее для трех фаз значение тока, а измеренную мощность XX делят на 3.

Коэффициент трансформации, определенный в режиме XX как отношение напряжений ($k_{тр} = U_1 / U_2$), практически не отличается от его значения, найденного по соотношению чисел витков ($k_{тр} = w_1 / w_2$), потому что при XX $U_2 = E_2$, а вследствие небольшого относительного значения тока XX с высокой точностью $U_1 \approx E_1$.

Потери энергии в любом режиме работы обусловлены различными физическими процессами. В режиме XX потери электрической энергии

в магнитопроводе во много раз превышают другие виды потерь. Они вызываются переменным магнитным полем и обусловлены гистерезисом (явлением магнитной вязкости) и протеканием вихревых токов:

$$P_0 = p_{\text{гист}} + p_{\text{вт.}}$$

Для снижения потерь на вихревые токи магнитопроводы трансформаторов собирают из изолированных друг от друга листов электротехнической стали толщиной 0,3–0,35 мм. Потери на перемагничивание уменьшают применением магнитомягких материалов с узкой петлей гистерезиса.

Кроме указанных, при ХХ возникают потери и в некоторых других частях трансформатора: в первичной обмотке, в изоляции и т.д. Поскольку ток ХХ в силовых трансформаторах относительно невелик (0,5–3% номинального), электрические потери в первичной обмотке трансформатора, обусловленные его протеканием, достаточно малы, и их можно не учитывать без особой погрешности. Потери в изоляции (диэлектрические потери) даже в высоковольтных трансформаторах составляют весьма незначительную часть.

При сохранении неизменным напряжения, приложенного к трансформатору, основные составляющие потерь ХХ практически не зависят от нагрузки, так как амплитуда магнитного потока в сердечнике изменяется незначительно. Поэтому, зная потери ХХ и принимая их постоянными, можно воспользоваться ими для анализа работы трансформатора в любом режиме.

Коротким замыканием (КЗ) называется режим, при котором выводы вторичной стороны трансформатора соединяются накоротко проводником, имеющим пренебрежимо малое сопротивление. Если этот режим возникает в процессе эксплуатации (замыкание проводов в ЛЭП и т.п.), то он является аварийным, так как сопровождается протеканием токов, многократно превышающих номинальное значение.

В опыте КЗ (рис. 1.23) к первичной стороне подводится пониженное напряжение $U_{1к}$, при котором по обмоткам трансформатора протекает ток силой (0,2–1,2) номинального значения. Измеряют величину подведенного напряжения U_k , силу тока I_k и мощность потерь P_k (полезная нагрузка отсутствует). Для трехфазного трансформатора ток и напряжение определяют как среднее арифметическое показаний трех фаз.

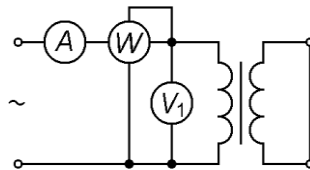


Рис. 1.23. Схема опыта КЗ трансформатора

Подведенное напряжение при номинальном токе обычно не превышает нескольких процентов от номинального значения. Как следствие, магнитный поток трансформатора в опыте КЗ весьма незначителен в сравнении с опытом ХХ, и эквивалентная МДС обмоток $w_1 i_{10}$ (см. формулу (1.8)) пренебрежимо мала. В этом опыте трансформатор с высокой точностью моделируется упрощенной схемой замещения (см. рис. 1.21, а). Из-за небольшой величины магнитной индукции в сердечнике можно пренебречь потерями в нем и принять, что измеренная мощность соответствует электрическим потерям в обмотках.

По измеренным значениям напряжения U_K , тока I_K и мощности P_K рассчитывают параметры z_K , r_K , x_K упрощенной схемы замещения:

$$z_K = U_K / I_K, \quad r_K = P_K / I_K^2, \quad x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}. \quad (1.15)$$

Такой расчет, по сути, соответствует известному из ТОЭ методу определения параметров эквивалентного генератора по данным опыта КЗ. Если сила тока в опыте КЗ отличается от номинальной, то величины U_K , P_K соответственно, пересчитываются. Далее они приводятся к расчетной условной температуре $\theta_{расч}$, значение которой устанавливается в зависимости от класса изоляции трансформатора.

Как известно из курса ТОЭ, параметры z_K , r_K , x_K образуют треугольник сопротивлений (рис. 1.24, а). Последовательно умножая на силу номинального тока и квадрат этого тока, получаем треугольники напряжений (рис. 1.24, б) и мощностей (рис. 1.24, в). Угол φ_K характеризует сдвиг по фазе между векторами напряжения и тока в опыте КЗ.

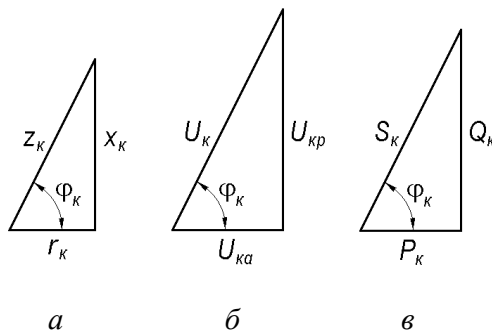


Рис. 1.24. Треугольники сопротивлений (а), напряжений (б) и мощностей КЗ (в)

Определенные из опыта КЗ параметры U_K , P_K , приведенные к расчетному току и расчетной температуре, входят в номинальные данные трансформатора.

1.9. Применение относительных единиц в расчетах

При расчетах различных цепей, по которым протекают токи нагрузки, широко используется система относительных единиц. Во многих случаях ее использование существенно упрощает теоретические выкладки и вычисления, так как величины, выраженные в относительных единицах, не зависят от уровня напряжения. Параметры трансформаторов и электрических машин, выраженные в относительных единицах более наглядны при анализе.

Относительным значением какой-либо величины называется ее отношение к другой одноименной величине, принятой за базисную. Для первичной обмотки трансформатора в качестве базиса принимаются:

- номинальное первичное фазное напряжение $U_{1\text{фн}}$;
- номинальный первичный фазный ток $I_{1\text{фн}}$;
- базисное сопротивление: $z_{б*} = U_{1\text{фн}} / I_{1\text{фн}}$;
- номинальная мощность: $S_{н*} = 3U_{1\text{фн}}I_{1\text{фн}}$ (трехфазные трансформаторы), $S_{н*} = U_{1\text{фн}}I_{1\text{фн}}$ (однофазные трансформаторы).

Расчеты с мощностью, выраженной в относительных единицах, для однофазных и трехфазных трансформаторов по форме не отличаются.

Из приведенных базисных величин независимыми будут две произвольно выбранные величины. Остальные (связанные) могут быть рассчитаны через них.

Величины первичной обмотки в относительных единицах выражаются путем деления этой величины в абсолютных единицах на соответствующую базисную величину той же размерности: $U_{1*} = U_1 / U_{1\text{фн}}$, $z_{1*} = z_1 / z_{б*}$ и т.д. Они обозначаются символом «*» в нижнем индексе. Если в тексте особо оговорено, этот символ для уменьшения громоздкости в обозначениях может быть опущен.

Вторичные величины для аналогичного представления в относительных единицах предварительно приводятся к числу витков первичной обмотки. Индекс приведения (') у относительных вторичных величин опускается.

Поскольку относительные значения базисных величин равны единице, то в неразветвленной линейной пассивной электрической цепи при номинальном режиме в относительных единицах сопротивление любого элемента z_* равно падению напряжения на нем U_{z*} и его мощности S_{z*} . Таким образом, при номинальном токе треугольники сопротивлений, напряжений и мощностей КЗ трансформатора (см. рис. 1.24) в именованных единицах подобны, а в относительных единицах равны. Если в названной цепи приложенное напряжение и протекающий ток имеют относительное значение β , то

$$z_* = \beta U_{z*} = \beta^2 S_{z*}.$$

Режим XX трансформатора моделируется отдельной параллельной ветвью, по которой ток нагрузки не протекает, и приведенные соотношения для него несправедливы.

Приведенные формулы могут быть использованы и для якорных цепей электрических машин.

1.10. Изменение вторичного напряжения при нагрузке

Как следует из сквозного уравнения (1.12) и упрощенной схемы замещения (см. рис. 1.21, а) при нагрузке вторичное напряжение трансформатора изменяется по величине. Изменением вторичного напряжения трансформатора называется арифметическая разность напряжений в режимах холостого хода (U_{20}) и при нагрузке (U_2): $\Delta U = U_{20} - U_2$. Обычно его выражают в относительных единицах (ΔU_*):

$$\Delta U_* = (U_{20} - U_2) / U_{20} = k_{\text{тр}}(U_{20} - U_2) / (k_{\text{тр}} U_{20}) = (U_1 - U_2') / U_1 = \Delta U_2' / U_1.$$

Выведем зависимость изменения напряжения трансформатора от нагрузки, основываясь на упрощенной векторной диаграмме (рис. 1.25), соответствующей сквозному уравнению (1.12).

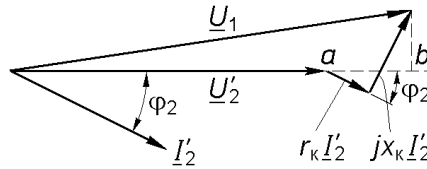


Рис. 1.25. Упрощенная векторная диаграмма трансформатора

Опустим перпендикуляр из конца вектора $\underline{U}_1$ на направление вектора $\underline{U}_2'$. Отрезок ab между концом вектора $\underline{U}_2'$ и точкой пересечения перпендикуляра с его направлением можно приближенно принять равным $\Delta U'$, так как обычно сдвиг по фазе между векторами $\underline{U}_1$ и $\underline{U}_2'$ не превышает нескольких градусов вследствие относительно небольшой величины падений напряжения $r_k \underline{I}_2'$ и $j x_k \underline{I}_2'$ (на рис. 25 для большей наглядности длина этих векторов увеличена в несколько раз). Таким образом,

$$\Delta U_2' \approx U_1 - U_2' \approx ab = r_k I_2' \cos \varphi_2 + x_k I_2' \sin \varphi_2. \quad (1.16)$$

Как следует из выражения (1.16) изменение напряжения прямо пропорционально вторичному току нагрузки, если характер нагрузки не изменяется ($\varphi_2 = \text{const}$). Это выражение обычно преобразуют к более удобной для вычисления формуле через составляющие напряжения короткого замыкания U_k :

$$\Delta U_2' = \beta(U_{ka} \cos \varphi_2 + U_{kp} \sin \varphi_2) = \beta U_k \cos(\varphi_k - \varphi_2). \quad (1.17)$$

где $\beta = I_2 / I_{2н} = S / S_n$ – коэффициент нагрузки трансформатора.

Выражение (1.17) справедливо и для расчета ΔU_2 в относительных единицах, если в тех же единицах выражены составляющие U_{ka} и U_{kp} .

Изменение вторичного напряжения трансформатора при нагрузке физически объясняется падениями напряжения на первичной и вторичной обмотках. В неявной форме это учитывается полученными выражениями (1.16) и (1.17). В большинстве случаев они дают приемлемую для практики точность, несмотря на их приближенный характер, вызванный сделанным при выводе упрощением. Строгий вывод дает более точное выражение, которое имеет вид [%]:

$$\Delta U_2 \% = \beta(U_{ka} \% \cos \varphi_2 + U_{kp} \% \sin \varphi_2) + \beta^2(U_{kp} \% \cos \varphi_2 - U_{ka} \% \sin \varphi_2)^2 / 200$$

Вторичное напряжение при нагрузке может быть легко рассчитано по известному значению ΔU :

$$U_2 = U_{20} - \Delta U_2 = U_{20}(1 - \Delta U_*). \quad (1.18)$$

1.11. Эксплуатационные характеристики трансформатора

Эксплуатационные свойства трансформатора зависят от его характеристик – зависимостей от нагрузки первичного тока, вторичного напряжения, КПД и др.

Зависимость первичного тока от тока нагрузки представлена на рис. 1.26, а. Ток XX силового трансформатора относительно невелик: 0,5–3% номинального значения. С ростом нагрузки (вторичного тока I_2) первичный ток возрастает, как это и следует из выражения (1.13). При коэффициенте нагрузки $\beta > 0,5$ с достаточной для практических целей точностью удовлетворяют соотношению (1.4).

Внешней характеристикой называется зависимость вторичного напряжения трансформатора от вторичного тока I_2 (или коэффициента нагрузки β) при неизменном характере нагрузки ($\varphi_2 = \text{const}$). 0

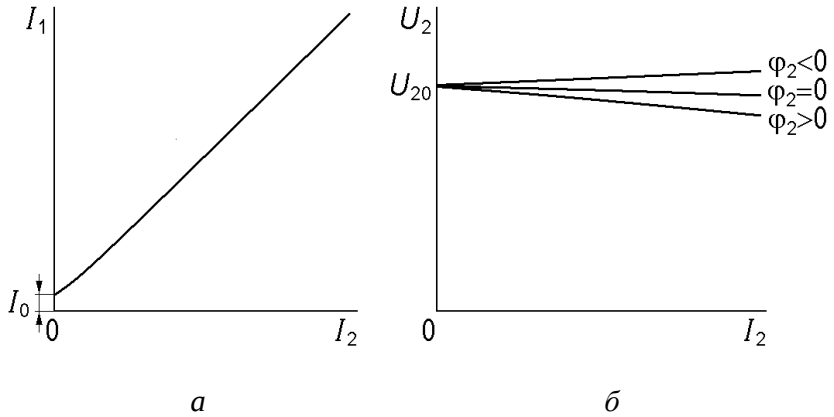


Рис. 1.26. Эксплуатационные характеристики трансформатора

Семейство внешних характеристик при различных характерах нагрузки изображено на рис. 1.26, б. Их вид может быть объяснен аналитическими зависимостями (1.16)–(1.18). Если нагрузка имеет активно-индуктивный характер ($\varphi_2 > 0$), что на практике случается наиболее часто, то $\Delta U_2 > 0$ и вторичное напряжение всегда уменьшается, так как обычно $\varphi_2 < \varphi_k$ и $\cos(\varphi_k - \varphi_2) > 0$ ($0 < \varphi_k < \pi / 2$). При активно-емкостной нагрузке ($\varphi_2 < 0$), вторичное напряжение трансформатора будет возрастать ($\Delta U_2 < 0$), когда $\varphi_k - \varphi_2 > \pi / 2$, так как при этом $\cos(\varphi_k - \varphi_2) < 0$.

Потери мощности и КПД. Преобразование электрической энергии в трансформаторе всегда сопровождается потерями энергии, вызывающими его нагрев. В соответствии с законом сохранения энергии в режиме нагрузки уравнение баланса активной мощности для трансформатора можно записать в виде:

$$P_2 = P_1 - \Delta P, \quad (1.19)$$

где P_2 – активная мощность, передаваемая трансформатором нагрузке; P_1 – активная мощность, потребляемая трансформатором от источника питания; ΔP – суммарная мощность всех видов потерь энергии в трансформаторе, которую с достаточной точностью можно выразить в виде суммы мощностей электрических потерь в первичной и вторичной обмотках $\Delta P = \Delta P_{\varphi 1} + \Delta P_{\varphi 2}$ и потерь в магнитопроводе ΔP_m :

$$\Delta P = \Delta P_{\varphi} + \Delta P_m. \quad (1.20)$$

Структура мощностей отражена в энергетической диаграмме трансформатора (рис. 1.27).

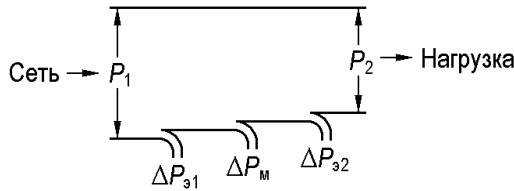


Рис. 1.27. Энергетическая диаграмма трансформатора

Кроме перечисленных выше, в трансформаторе имеются и некоторые другие виды относительно небольших потерь, обусловленных магнитным полем рассеяния и электрическим полем (потери в изоляции). Они как некоторая добавка входят в мощности, измеряемые в опытах XX и КЗ.

Потери в магнитопроводе, незначительно зависящие от тока нагрузки, относят к *постоянным*. Их мощность в режиме нагрузки принимается равной мощности потерь из опыта XX:

$$\Delta P_m = P_0. \quad (1.21)$$

Электрические потери в обмотках определяются нагрузкой, поэтому их относят к *переменным*. Мощность этих потерь соответствует опыту КЗ ($\Delta P_{эл} = P_k$) при том же токе, что и в режиме нагрузки. Так как электрические потери пропорциональны квадрату силы тока обмоток, то в рабочем режиме они пропорциональны квадрату коэффициента нагрузки β и номинальным потерям КЗ $P_{k ном}$, которые приводятся в паспортных данных:

$$\Delta P_{эл} = \beta^2 P_{k ном}. \quad (1.22)$$

Коэффициентом полезного действия (КПД) трансформатора называется отношение мощностей, отдаваемой в нагрузку и потребляемой из сети:

$$\eta = P_2 / P_1 = P_2 / (P_2 + \Delta P). \quad (1.23)$$

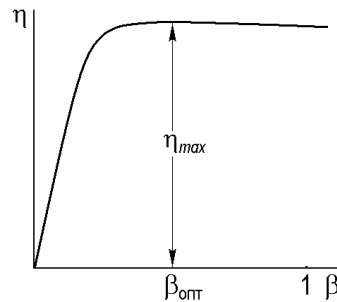
Расчет КПД по формуле (1.23) с подстановкой полученных непосредственно из эксперимента значений P_1 и P_2 , не производится, так как при КПД, превышающим 90%, ошибки измерения значительно влияют на результат. Поэтому КПД силового трансформатора определяют расчетным путем через номинальную мощность трансформатора S_n , номинальные потери КЗ $P_{k ном}$ и потери XX P_0 , относящиеся к паспортным данным. Подставляя в выражение (1.23) мощность нагрузки

$P_2 = \beta S_n \cos \varphi_2$ и значение ΔP , рассчитанное по формулам (1.20)–(1.22), получаем следующее выражение для КПД:

$$\eta = \beta S_n \cos \varphi_2 / (\beta S_n \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{\text{к ном}}). \quad (1.24)$$

В графической форме зависимость $\eta = f(\beta)$ представлена на рис. 1.28. В режиме ХХ полезная мощность, передаваемая в нагрузку $P_2 = 0$ и, соответственно, $\eta = 0$. С ростом нагрузки КПД быстро возрастает, достигая максимального значения при некотором коэффициенте нагрузки $\beta_{\text{опт}}$. Условие достижения функцией $\eta = f(\beta)$ экстремума можно определить из уравнения $d\eta / d\beta = 0$. Из его анализа следует, что максимум КПД соответствует равенству мощностей постоянных (1.21) и переменных (1.22) потерь, откуда $\beta_{\text{опт}} = \sqrt{P_0 / P_{\text{к ном}}}$. Обычно $\beta_{\text{опт}} = 0,4\text{--}0,6$. При дальнейшем увеличении нагрузки КПД медленно снижается.

Рис. 1.28. Зависимость КПД трансформатора от нагрузки



У силовых трансформаторов КПД весьма высок – 96–99,5% (большие значения соответствуют трансформаторам большей мощности).

1.12. Регулирование напряжения трансформаторов

При нагрузке напряжение на зажимах электроприемников меняется как вследствие изменения вторичного напряжения трансформатора, так и вследствие потери напряжения в электрической сети. Для экономичной и безотказной работы электроприёмников необходимо, чтобы напряжение находилось в допустимых пределах. В связи с этим на подстанциях предусматриваются различные способы поддержания соответствующего уровня напряжения. Наиболее экономичным из них является регулирование напряжения трансформаторов, у которых для этой цели имеется встроенная аппаратура.

Из выражения (1.2) следует, что вторичное напряжение трансформатора зависит от соотношения чисел витков в обмотках: $U_2 = U_1 w_2 / w_1$. Это соотношение удобнее регулировать изменением числа витков в обмотке ВН путем выполнения дополнительных ответвлений. Обмотка ВН имеет больше витков и меньшую силу тока в сравнении с обмоткой НН, что позволяет более точно подобрать число витков для ступеней регулирования и использовать более компактные переключатели.

В сухих трансформаторах регулирование напряжения до $\pm 5\%$ ступенями по $2,5\%$ выполняют путем перестановки вручную перемычек на разъемных соединениях выводов ответвлений (см. рис. 1.2) при отключенных от сети обмотках.

В масляных трансформаторах переключение ответвлений производится двумя способами: а) после отключения от сети всех обмоток (ПБВ – переключение без возбуждения); б) под нагрузкой (РПН – регулирование под нагрузкой). Первое положение привода переключателя соответствует наибольшему значению номинального напряжения ответвления.

1.12.1. Переключение ответвлений без возбуждения

При переключении без возбуждения (ПБВ) трансформатор должен быть отключен внешними коммутационными аппаратами от сети как по стороне ВН, так и по стороне НН, что одновременно приводит к отключению потребителей. Поэтому ПБВ преимущественно применяется как сезонное регулирование для поддержания среднего уровня напряжения: более высокого в период, когда нагрузки выше, и более низкого – при меньших нагрузках. Посредством ПБВ обычно регулируют напряжение тремя (-5% , 0 , $+5\%$) или пятью ступенями (дополнительно $+2,5\%$ и $-2,5\%$). Среднее положение в переключателях соответствует номинальному напряжению.

Устройство переключения обесточенного трансформатора не рассчитывается на гашение дуги при размыкании контактов, вызывающее их быстрый износ. Поэтому оно проще и дешевле переключателей под нагрузкой и применяется для переключения ответвлений в обмотках стороны высокого напряжения 6, 10 кВ (реже 35 и 110 кВ) распределительных трансформаторов общего назначения малой и средней мощности. В этих трансформаторах устройство ПБВ состоит из переключателя ответвлений и ручного привода в виде рукоятки, устанавливаемой на крышке или стенке бака (рис. 1.29). Переключатели имеют неподвижные контакты, соединенные с ответвлениями обмотки и подвижные, связанные с приводом.

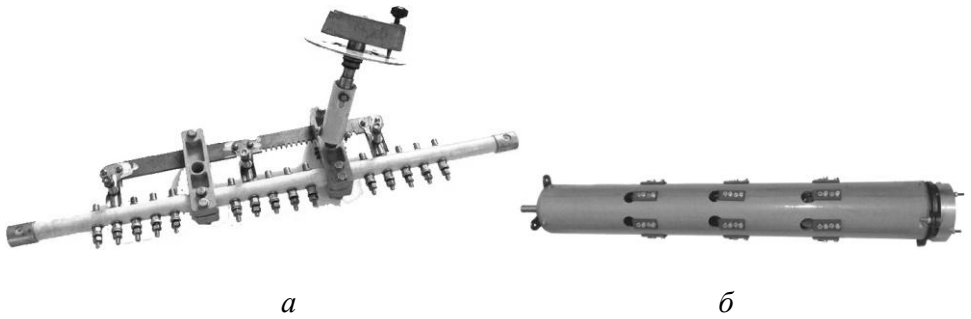


Рис. 1.29. Переключатели ПБВ:
а – ПТРЛ реечного типа; *б* – ПТЛ барабанного типа

Выпускаются различные виды переключающих устройств ПБВ: трёхфазные и однофазные, реечные и барабанные.

Пример расшифровки буквенного обозначения ПТРЛ – Х/ХХХ (А): П – переключатель, Т – трехфазный, Р – реечный, Л – лимбовый привод (ручка переключателя и указатель положений – лимб), Х – количество контактов на одну фазу, ХХХ – максимальный ток нагрузки, А – единица измерения силы тока – ампер.

Трёхфазные переключатели содержат три группы по 5 или 6 контактов на фазу (5 контактов используется только при схеме соединения фаз в «звезду»).

Переключатели различных типов выбираются по классу напряжения, силе тока, а также посадочным и габаритным размерам.

1.12.2. Переключение ответвлений под нагрузкой

Силовые трансформаторы средней и большой мощности должны иметь возможность регулирования под нагрузкой (РПН), чтобы не прерывать подачу электроэнергии при переключении ступеней напряжения.

На электрических подстанциях регулирование напряжения трансформатора под нагрузкой (РПН) является одним из видов оперативных переключений, необходимость которых обусловлена непрерывным изменением нагрузки в течение суток. Оно может производиться автоматически или вручную, дистанционно или по месту.

Способ РПН основан на том же принципе, что и ПБВ – переключение ответвлений, но число регулировочных ступеней обычно бывает значительно больше, а диапазон регулирования – шире. Пределы регулирования составляют от $\pm 9\%$ до $\pm 16\%$ ступенями 1,5–2,5% от номинального напряжения.

Переключение ответвлений в устройствах РПН трансформаторов реализуется без разрыва цепи, что снижает интенсивность дуги и пере-

напряжений. В то же время это приводит к замыканию накоротко, пусть и кратковременно, регулировочных витков между соседними ответвлениями. Возникающий вследствие этого ток короткого замыкания ограничивается введением в цепь дополнительного сопротивления, в качестве которого используются катушки индуктивности (реакторы) и проволочные резисторы. И те, и другие имеют свои преимущества и недостатки: реакторы более эффективны при больших токах и относительно низких напряжениях, резисторы – при меньших токах и более высоких классах напряжения. Резисторные ограничители (рис. 1.30) более компактны и не обладают электромагнитной инерцией, что облегчает гашение дуги. Однако, в отличие от реакторов, обладающих малым активным сопротивлением, резисторные ограничители из-за нагрева не могут сколько-нибудь продолжительное время находиться под током, поэтому конструктивно сочетаются с быстродействующим переключателем, приводимым в действие пружиной.

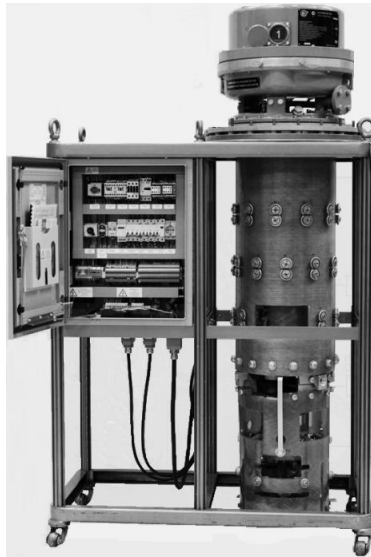


Рис. 1.30. Трехфазное устройство РПН типа РНТА-У-35/200Р-16/20-У1
с токоограничивающим резистором:

У – соединение фаз в «звезду», 35 – номинальное напряжение в кВ, 200 – номинальный ток, А;
Р – предизбиратель ответвлений для схем с реверсом обмотки трансформатора; 16 – число ступеней регулирования; 20 – число положений устройства РПН; У1 – климатическое исполнение и категория размещения

В зависимости от предъявляемых требований к регулированию напряжения и особенностей конструкции трансформаторов в настоящее время применяют различные схемы регулирования и различные типы

устройств РПН, отличающиеся между собой техническими характеристиками и конструктивным исполнением.

Устройства РПН обычно размещаются в масляной среде для более эффективного гашения дуги и охлаждения. Их устанавливают или в основном баке вместе с обмотками, или в отдельном отсеке.

В последние десятилетия в высоковольтных коммутационных электрических аппаратах, в том числе и устройствах РПН, используется вакуумная техника. В вакууме при разрыве электрической цепи дуга не возникает, поверхность контактов не окисляется, их переходное сопротивление стабильно. Поэтому вакуумные устройства РПН надежно сохраняют коммутационную способность весь срок эксплуатации.

1.13. Работа трехфазного трансформатора при несимметричной нагрузке

При симметричном режиме работы трансформатора системы трехфазных ЭДС, напряжений, токов и магнитных потоков являются симметричными. Это означает, что синусоидально изменяющиеся во времени величины соответствующей системы равны между собой по амплитуде и сдвинуты по фазе на $2\pi/3$. Если это условие не выполняется, то режим работы трехфазного трансформатора называют несимметричным.

Несимметричный режим работы может быть следствием различных причин:

1. *Несимметричная нагрузка.* Чаще всего она обусловлена тем, что наряду с симметричными трехфазными от сети получают питание и однофазные приемники, которые включаются между линейным и нулевым проводом или двумя линейными проводами. Однофазная нагрузка составляет заметную долю в общей нагрузке и ее трудно уравновесить, т.е. распределить симметрично по фазам. Значительную несимметрию в нагрузке трансформаторов создают мощные однофазные приемники: печи индукционного нагрева и др.

2. *Несимметрия питающих линейных напряжений.*

3. *Конструктивная несимметрия трехфазного трансформатора.*

4. *Неисправности.* Вследствие обрыва проводов линии, фаз обмотки, одно- или двухфазного короткого замыкания и т.д. могут возникнуть предельные виды несимметрии.

Работа в несимметричном режиме приводит к нарушению симметрии линейных и фазных напряжений трансформатора. Это отрицательно сказывается на работе как самого трансформатора, так и подключенных к нему приемников.

Дальнейшее рассмотрение несимметричного режима работы трех-

фазных трансформаторов проведем при следующих допущениях:

1. Несимметричный режим обусловлен несимметрией токов нагрузки. Для конкретности будем полагать, что нагрузка подключена со стороны низшего напряжения.

2. Трехфазный трансформатор конструктивно симметричен относительно каждой из фаз. В этом случае фазы трансформатора находятся в одинаковых электромагнитных условиях. Такие условия обеспечиваются в конструкциях с пространственным магнитопроводом, в котором стержни расположены в вершинах правильного треугольника, а также в трехфазной группе.

В широко применяемых конструкциях с плоским трехстержневым магнитопроводом электромагнитные условия для средней и крайних фаз различны. Однако в режиме нагрузки эта несимметрия существенного влияния не оказывает.

3. Система первичных линейных напряжений содержит только симметричные составляющие прямой последовательности.

4. Активные сопротивления и индуктивные сопротивления рассеяния для всех симметричных составляющих токов одинаковы.

5. Ток холостого хода пренебрежимо мал.

Согласно методу симметричных составляющих фазные напряжения (1.5) и (1.6) на зажимах первичной $\underline{U}_\Phi$ и вторичной обмоток $\underline{U}_\phi$ можно переписать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_\Phi &= (\underline{E}_{\Phi 1} + \underline{E}_{\Phi 2} + \underline{E}_{\Phi 0}) + (\underline{I}_{\Phi 1} + \underline{I}_{\Phi 2} + \underline{I}_{\Phi 0}) \underline{Z}_\Phi, \\ \underline{U}_\phi &= (\underline{E}_{\phi 1} + \underline{E}_{\phi 2} + \underline{E}_{\phi 0}) - (\underline{I}_{\phi 1} + \underline{I}_{\phi 2} + \underline{I}_{\phi 0}) \underline{Z}_\phi. \end{aligned} \right\} \quad (1.25)$$

где индексы «1», «2» и «0» – относятся к величинам прямой, обратной и нулевой последовательности; индексы, помеченные прописной буквой «Ф» и строчной «ф» во избежание путаницы с первичными и вторичными величинами, соответственно, к первичной и вторичной обмоткам; $\underline{Z}_\Phi$ и $\underline{Z}_\phi$ – полные сопротивления фаз первичной и вторичной обмоток.

Симметрия фазных и линейных напряжений трансформатора при несимметричной нагрузке зависит от соотношения симметричных составляющих обратной и нулевой последовательности и прямой последовательности. Чем меньше в напряжениях $\underline{U}_\Phi$ и $\underline{U}_\phi$ относительный вес составляющих обратной и нулевой последовательности, тем в большей степени их определяет напряжение прямой последовательности и, таким образом, система напряжений трансформатора более симметрична.

Из выражений (1.25) видно, что на симметрию напряжений трансформатора оказывают влияния ЭДС и падения напряжения обратной и нулевой последовательности. Падения напряжения от симметричных составляющих даже при номинальном токе относительно невелики.

Магнитный поток, и, следовательно, ЭДС обратной последовательности также имеют небольшое значение, так как токи обратной последовательности могут протекать и по первичной, и по вторичной обмотке, и МДС обмоток этой симметричной составляющей взаимно уравновешены. Поэтому наибольшее влияние на симметрию напряжений трансформатора при несимметричной нагрузке оказывает ЭДС нулевой последовательности.

1.13.1. Несимметричная нагрузка при схеме соединения Y/Y_n

Для схемы Y/Y_n характерно то, что ток I_0 нулевой последовательности в нагрузке не может трансформироваться в первичную обмотку, схема которой не допускает его протекания. Поэтому МДС нулевой последовательности вторичной обмотки не уравновешивается с первичной стороны и создает магнитный поток нулевой последовательности Φ_0 . Поскольку во всех трех стержнях его составляющие совпадают по фазе, для него нет пути замыкания по сердечнику, и он замыкается через окружающее пространство и элементы конструкции трансформатора, в частности, через стенки бака (рис. 1.31), вызывая в них потери энергии.

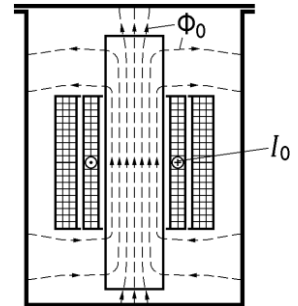


Рис. 1.31. Приближенная картина замыкания магнитного потока нулевой последовательности

Немагнитные участки замыкания, имеющие большое магнитное сопротивление, ограничивают величину потока нулевой последовательности. Тем не менее, он наводит существенную ЭДС нулевой последовательности E_0 в фазах обеих обмоток. При значительной несимметрии токов нагрузки фазные напряжения трехстержневого трансформатора могут существенно искажаться. Для первичной обмотки это не имеет существенного значения, так как ее фазные напряжения не используются. Несимметричные фазные напряжения вторичной обмотки, не соответствующие требованиям стандартов, могут неблагоприятно сказываться на работе однофазных приемников.

Если пренебречь относительно небольшими падениями напряжения в обмотках трансформатора, то в соответствии со вторым выражением из пары (1.25):

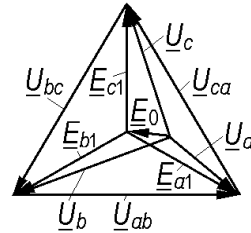
$$\underline{U}_a \approx E_{a1} + E_{a0},$$

$$\underline{U}_b \approx E_{b1} + E_{b0},$$

$$\underline{U}_c \approx E_{c1} + E_{c0}.$$

Соответствующая этим выражениям векторная диаграмма приведена на рис. 1.32.

Рис. 1.32. Векторная диаграмма вторичных ЭДС и напряжений при несимметричной нагрузке



Из векторной диаграммы видно, что ЭДС нулевой последовательности, складываясь по фазам с ЭДС прямой последовательности, вызывает несимметрию вторичных фазных напряжений трансформатора. Линейные напряжения остаются симметричными.

Для трехстержневых трансформаторов при схеме соединения Y/Y_n согласно ГОСТу ток в нейтральном проводе ограничивается, чтобы несимметрия напряжений не превышала допустимых значений: $I_0 \leq 25\% I_n$.

В бронестержневых трансформаторах и в трехфазной группе однофазных трансформаторов поток нулевой последовательности замыкается по магнитопроводу аналогично прямой последовательности и индуцируемые им в фазах ЭДС могут достигать больших значений. Поэтому для таких конструкций схема соединения обмоток Y/Y_n не применяется.

Для компенсации потока нулевой последовательности трансформаторы со схемой соединения обмоток Y/Y_n , предназначенные для работы при несимметричной нагрузке, могут изготавливаться с дополнительной обмоткой, уложенной поверх обмоток высокого напряжения (рис. 1.33). Обозначение типа таких трансформаторов содержит буквы «СУ» (симметрирующее устройство).

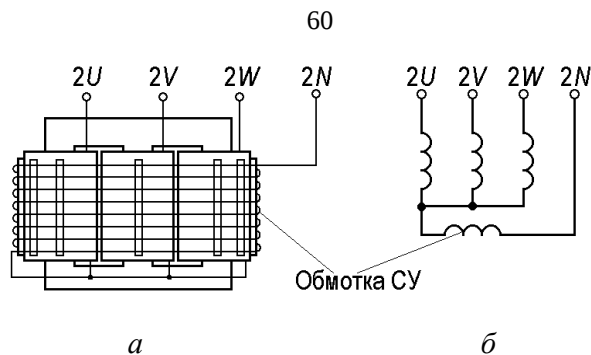


Рис. 1.33. Трансформатор с обмоткой СУ (а) и схема ее включения (б)

Обмотка СУ рассчитывается на длительное протекание номинального тока трансформатора и включается последовательно в нулевой вывод вторичной обмотки, таким образом, чтобы создаваемый ею поток был направлен встречно потоку нулевой последовательности обмотки НН и полностью компенсировал его. Этим исключается перекося фазных напряжений, обусловленный ЭДС нулевой последовательности.

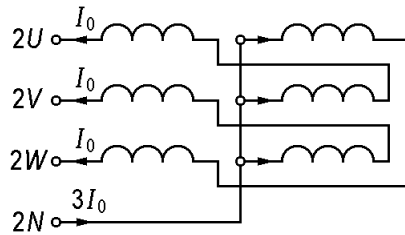
СУ значительно улучшает синусоидальность формы кривой изменения во времени фазных напряжений при наличии в сети нелинейных нагрузок (преобразовательных устройств, сварочных аппаратов и т.п.), токи которых содержат временные гармоники, кратные трем. Эти гармонические составляющие в фазах обмотки НН совпадают по фазе, и протекают по ее обмотке, которая компенсирует создаваемые ими потоки аналогично потокам нулевой последовательности.

1.13.2. Несимметричная нагрузка при схеме соединения Y/Z_n

Для обеспечения группы соединений, Y/Z_n-11 «зигзаг» выполняется равноплечим: полуфазы обмотки НН, расположенные на разных стержнях магнитопровода, имеют одинаковое количество витков. Как и в схеме Y_n нейтральная точка схемы Z_n соединяется с нулевым проводом, что создает цепь для протекания токов нулевой последовательности (рис. 1.34).

В несимметричных режимах работы при таком соединении сохраняется симметрия напряжений при несимметричной нагрузке. Это происходит за счет того, что из-за противоположного направления токов полуфаз результирующая МДС нулевой последовательности обмотки НН равна нулю и не возбуждает соответствующего магнитного потока. Как следствие, не индуцируется ЭДС нулевой последовательности, вызывающая основную несимметрию.

Рис. 1.34. Обтекание токами нулевой последовательности обмотки НН, соединенной по схеме Z_n



Некоторое влияние на симметрию фазных напряжений оказывают относительно небольшие падения напряжения от протекания токов нулевой последовательности. На линейные напряжения составляющие нулевой последовательности фазных ЭДС и напряжений не оказывают влияния, так как по контуру любых двух фаз взаимно вычитаются.

При одном и том же числе витков в фазе соединение в «зигзаг» имеет в $2/\sqrt{3}$ раз меньшее значение фазной ЭДС, чем при соединении в звезду. Соответственно, для достижения той же ЭДС требуется большее число витков и, следовательно, увеличенный расход обмоточного провода. Вследствие этого стоимость трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Z_n-11 несколько выше его аналога по мощности со схемой Y/Y_n-0 .

1.13.3. Несимметричная нагрузка при схемах соединения Δ/Y_n и Y_n/Y_n

В схемах Δ/Y_n и Y_n/Y_n токи нулевой последовательности имеют возможность протекать по обеим обмоткам трансформатора. Поэтому при несимметричной нагрузке ток нулевой последовательности возбуждает соответствующий поток, индуктирующий в первичной обмотке токи, оказывающие на него, как следует из закона Ленца, компенсирующее действие. Индуктируемая в фазах обмоток ЭДС нулевой последовательности будет иметь относительно небольшую величину. На симметричность фазных напряжений будут в основном оказывать влияние только относительно небольшие падения напряжения от соответствующих токов. Система вторичных напряжений при несимметричной нагрузке остается практически симметричной.

Аналогичным образом при этих схемах соединения компенсируется поток третьей временной гармоники, обусловленный насыщением магнитной цепи. Замыкаясь вне магнитопровода, как поток нулевой последовательности тройной частоты, он также может вызывать потери энергии в различных конструктивных частях трансформатора.

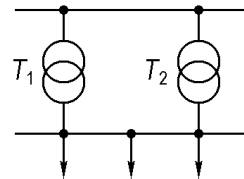
1.13.4. Несимметричная нагрузка при схемах соединения Y/Y , Y/Δ , Δ/Y и Δ/Δ

Указанные схемы соединения первичной и вторичной обмоток трехфазного трансформатора не допускают возникновения токов нулевой последовательности. Поэтому уравнения (1.25) при несимметричной нагрузке могут содержать только симметричные составляющие прямой и обратной последовательности. Для составляющей обратной последовательности МДС первичной и вторичной обмоток взаимно уравновешены и соответствующие магнитные потоки и индуцируемые ими ЭДС обратной последовательности практически отсутствуют. Следовательно, относительно небольшая несимметрия напряжений может быть вызвана только падениями напряжений от протекания токов обратной последовательности. Система вторичных напряжений остается практически симметричной, даже при значительной несимметрии токов нагрузки.

1.14. Параллельная работа трансформаторов

Двухобмоточные трансформаторы (два, три или более) считаются работающими параллельно (рис. 1.35), если у них соединены параллельно как первичные, так и вторичные обмотки. Порядок чередования фаз у трансформаторов должен быть одинаков.

Рис. 1.35. Параллельное включение двух трансформаторов



Параллельная работа трансформаторов имеет определенные технико-экономические преимущества по сравнению с эксплуатацией одного трансформатора суммарной мощности:

- повышает надежность электроснабжения, так как вывод из эксплуатации или аварийное отключение одного трансформатора позволяет осуществлять питание хотя бы части потребителей от других трансформаторов;
- позволяет уменьшить потери электрической энергии за счет отключения на подстанции части трансформаторов в периоды снижения нагрузки;
- требуется меньшая резервная мощность и т.д.

В то же время она имеет существенный недостаток: эквивалентное сопротивление параллельно включенных трансформаторов меньше, из-

за чего возрастают токи КЗ, что требует установки выключателей, способных их разрывать. В связи с этим параллельная работа трансформаторов в основном используется на период оперативных переключений, связанных с выводом одного из трансформаторов на техническое обслуживание и т.п.

Следует отличать параллельную работу от совместной (рис. 1.36), когда трансформаторы включены на общие шины только с одной стороны, например, работают на общую нагрузку, получая питание от разных источников, или наоборот, работают на различные линии, получая питание с общих шин.

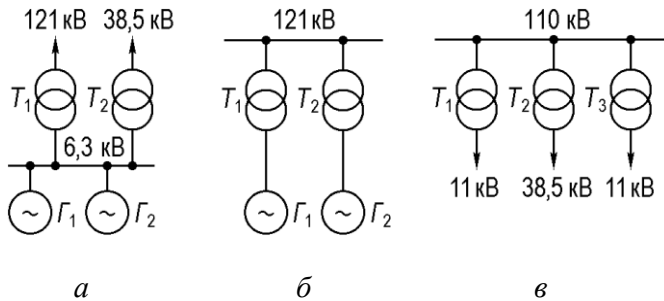
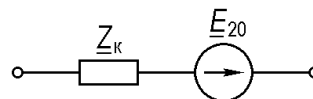


Рис. 1.36. Различные виды совместной работы трансформаторов:
 а – совместная работа повышающих трансформаторов со стороны обмотки НН;
 б – совместная работа повышающих трансформаторов со стороны обмотки ВН;
 в – совместная работа понижающих трансформаторов со стороны обмотки НН

1.14.1. Схема замещения со стороны нагрузки

Для исследования параллельной работы получим упрощенную схему замещения трансформатора несколько иного вида по сравнению со схемой на рис. 1.21, а. По отношению к нагрузке трансформатор является источником энергии. Поэтому относительно вторичных зажимов в соответствии с теоремой об эквивалентном генераторе он может быть представлен в виде эквивалентного источника – активного двухполюсника (рис. 1.37). Напряжение этого источника равно напряжению на выделенных зажимах в режиме ХХ: $\underline{U}_2 = \underline{E}_{20}$. Внутреннее сопротивление эквивалентного источника равно сопротивлению трансформатора относительно вторичных зажимов, т.е. равно сопротивлению короткого замыкания $\underline{Z}_к$ относительно вторичных зажимов, если пренебречь сопротивлением внешней цепи, питающей трансформатор.

Рис. 1.37. Схема замещения трансформатора в виде активного двухполюсника



Таким образом, получается упрощенная схема замещения трансформатора относительно вторичных зажимов, дополненная источником ЭДС холостого хода вторичной обмотки.

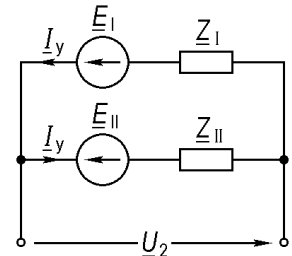
Схема замещения нескольких параллельно работающих трансформаторов синтезируется путем параллельного соединения активных ветвей, изображенных на рис. 1.37. Для расчета распределения тока нагрузки между ними можно использовать известные из курса ТОЭ методы, в частности, метод междузлового напряжения.

1.14.2. Исследование параллельной работы при различных условиях

В общем случае оптимальные условия параллельной работы трансформаторов могут не соблюдаться. Рассмотрим некоторые характерные частные случаи на примере двух параллельно работающих трансформаторов.

Условие отсутствия уравнительных токов. С целью упрощения предположим, что нагрузка отключена. Соответствующая расчетная схема приведена на рис. 1.38. Для устранения громоздкости и возможной путаницы в обозначениях величин $\underline{E}_{20}$, $\underline{I}_2$ и $\underline{z}_k$ (см. рис. 1.37), их нижние индексы заменены на римские цифры «I» и «II», обозначая принадлежность к соответствующим трансформаторам. В рассматриваемом режиме ветви расчетной схемы образуют неразветвленный контур.

Рис. 1.38. Схема замещения для расчета уравнительных токов при параллельной работе трансформаторов в режиме XX



При параллельной работе напряжения на вторичных зажимах трансформаторов всегда равны, даже если их вторичные ЭДС различны. Это равенство обеспечивается за счет падений напряжения на внутренних сопротивлениях трансформаторов от протекания под действием разностной ЭДС, так называемого, уравнительного тока:

$$\underline{I}_{yp} = (\underline{E}_I - \underline{E}_{II}) / (\underline{Z}_I + \underline{Z}_{II}).$$

Даже при относительно небольшой разностной ЭДС $\Delta \underline{E}$ уравнительный ток может достигать больших значений из-за того, что он ограни-

чивается только внутренним сопротивлением трансформаторов. Уравнительный ток протекает также и в том случае, когда на общие шины включена нагрузка. При этом результирующий ток одного трансформатора может значительно отличаться от другого, даже если трансформаторы имеют одинаковую номинальную мощность, т.е. они будут неравномерно нагружены.

Уравнительный ток будет отсутствовать, если вторичные ЭДС будут равны: $\underline{E}_I = \underline{E}_{II}$. Для этого необходимо, чтобы они совпадали как по величине, так и по фазе. Первое условие будет соблюдено при равенстве коэффициентов трансформации, что соответствует также условию равенства номинальных первичных и вторичных линейных напряжений у параллельно работающих трансформаторов.

При неравенстве коэффициентов трансформации разностная ЭДС $\Delta \underline{E}$ возникает из-за различной величины вторичных ЭДС (рис. 1.39, а). Вызываемый ею уравнительный ток при работе под нагрузкой увеличивает результирующий ток трансформатора с меньшим коэффициентом трансформации, и уменьшает ток трансформатора с большим коэффициентом трансформации.

Для соблюдения второго условия трансформаторы должны принадлежать к одной и той же группе соединения обмоток. При различных группах разностная ЭДС $\Delta \underline{E}$ возникает за счет несовпадения по фазе ЭДС вторичных обмоток. Даже при несовпадении фаз на $\pi/6$ (рис. 1.39, б), разностная ЭДС будет значительна. При этом уравнительный ток может в несколько раз превышать номинальное значение. Поэтому параллельная работа трансформаторов с несовпадающими группами недопустима.

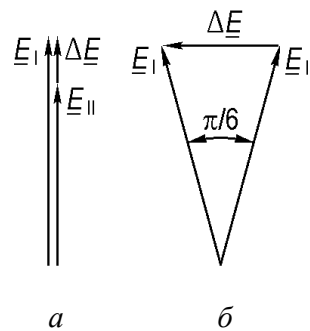
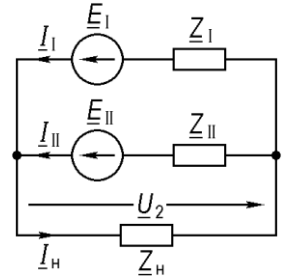


Рис. 1.39. Возникновение разностной ЭДС при различных коэффициентах трансформации (а) и несовпадении групп (б)

Параллельная работа трансформаторов при неодинаковых напряжениях КЗ. Схема замещения для этого случая представлена на рис. 1.40. Предположим, что коэффициенты трансформации линейных напряжений и группы соединения обмоток одинаковы: $\underline{E}_I = \underline{E}_{II}$. Найдем

распределение токов при неравенстве номинальных напряжений короткого замыкания: $\underline{U}_{кI} \neq \underline{U}_{кII}$.

Рис. 1.40. Схема замещения для расчета токов при параллельной работе трансформаторов в режиме нагрузки



Напряжение на параллельно соединенных ветвях схемы замещения всегда одинаково. При $\underline{E}_I = \underline{E}_{II}$ для этого необходимо, чтобы $\underline{I}_I \underline{Z}_I = \underline{I}_{II} \underline{Z}_{II}$ или $\underline{I}_I : \underline{I}_{II} = 1/\underline{Z}_I : 1/\underline{Z}_{II}$. В этом выражении аргументы соотносимых комплексных величин обычно незначительно отличаются друг от друга, поэтому оно приближенно справедливо для соотношения модулей:

$$I_I : I_{II} = 1/z_I : 1/z_{II}.$$

Таким образом, отношение токов, протекающих по обмоткам, обратно пропорционально отношению сопротивлений КЗ.

Преобразуем это выражение к соотношению мощностей, которое более удобно для применения. Из равенства номинальных напряжений трансформаторов ($U_{нI} = U_{нII}$) следует равенство относительных величин: $I_* = S_*$, $z_{к*} = U_{к*}$. Отсюда получаем:

$$S_{I*} : S_{II*} = 1/U_{кI*} : 1/U_{кII*}. \quad (1.26)$$

Из полученного выражения следует, что при параллельной работе относительные значения мощностей нагрузки трансформаторов обратно пропорциональны напряжениям короткого замыкания. При этом трансформатор, напряжение КЗ которого меньше, нагружен относительно больше. При параллельной работе с $U_{кI} \neq U_{кII}$ целесообразно, чтобы меньшее $U_{к}$ было у трансформатора большей мощности, так как у этого трансформатора перегрузка будет относительно меньше, чем в обратном случае.

Чтобы при параллельной работе трансформаторов нагрузка была пропорциональна их номинальным мощностям ($S_I : S_{II} = S_{нI} : S_{нII}$), номинальные напряжения короткого замыкания, как это следует из выражения (1.26) должны быть одинаковы: $U_{кI} = U_{кII}$.

Параллельная работа трансформаторов при оптимальных условиях. В этом случае относительная нагрузка параллельно работающих трансформаторов должна быть одинаковой:

$$S_I / S_{\text{нI}} = S_{\text{II}} / S_{\text{нII}} = S_i / S_{\text{нi}}.$$

Для его обеспечения, как следует из проведенного выше исследования, необходимо выполнение следующих условий:

1. Номинальные первичные и вторичные линейные напряжения у трансформаторов должны быть соответственно равны. Это обуславливает и равенство коэффициентов трансформации линейных напряжений:

$$k_I = k_{\text{II}} = k_i.$$

2. Трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания:

$$U_{\text{кI}} = U_{\text{кII}} = U_{\text{ки}}.$$

3. Тожественность групп соединения обмоток.

Третье условие является строго обязательным, от первых двух возможны определенные отступления. Однако во всех случаях согласно ГОСТу допускается параллельная работа двухобмоточных трансформаторов, трехобмоточных трансформаторов между собой на всех трех обмотках, а также двухобмоточных с трехобмоточными, если предварительно расчетом установлено, что значение тока ни в одной из обмоток параллельно соединенных трансформаторов не будет выше ее нагрузочной способности на тех ответвлениях и в тех режимах, в которых предусматривается параллельная работа.

Кроме того, ГОСТ не рекомендует параллельную работу трансформаторов с отношением номинальных мощностей более, чем 3 : 1. Это связано с тем, что при превышении этого соотношения перегрузки, допустимые для трансформаторов большей мощности, могут оказаться недопустимыми для трансформаторов меньшей мощности.

1.15. Трехобмоточные трансформаторы

Трехобмоточными называют силовые трансформаторы, имеющие три электрически несвязанные обмотки, чаще всего одну первичную и две вторичные (рис. 1.41, а).

Обмотки этих трансформаторов располагаются на стержне концентрически и имеют, как правило, разные номинальные напряжения: высшее, среднее и низшее. Основной вариант взаимного расположения обмоток ВН, СН и НН для случая, когда среднее напряжение является первичным, показан на рис. 1.41, б.

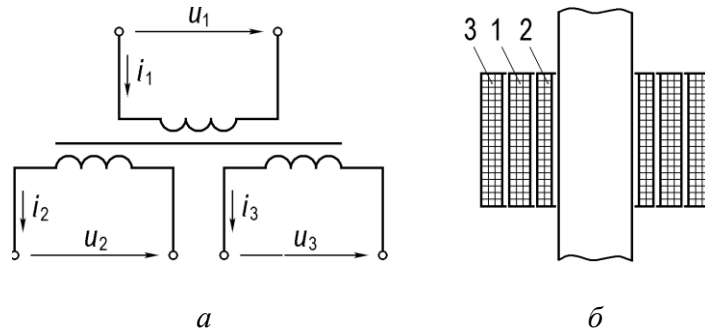


Рис. 1.41. Схема (а) и относительное расположение обмоток (б) трехобмоточного трансформатора:
1 – СН, 2 – НН, 3 – ВН

Такие трансформаторы обычно применяются для связи между собой трех высоковольтных линий электропередач разных номинальных напряжений. Иногда они используются в системах промышленного электроснабжения для питания электроприемников с различными уровнями напряжений.

Согласно ГОСТу номинальные мощности обмоток трехобмоточного трансформатора должны быть одинаковы. Это обеспечивает большую маневренность в процессе эксплуатации, так как дает возможность направлять по любой из вторичных линий до 100% поступающей мощности. Ранее выпускались трансформаторы с сочетанием мощностей обмоток ВН/СН/НН, %: 100/100/100, 100/100/67, 100/67/100, 100/67/67. В этом случае за номинальную мощность принимают наибольшую мощность одной из обмоток.

Обмотки трехфазных трехобмоточных трансформаторов соединяются по схеме $Y/Y_n/\Delta-0-11$ или $Y_n/\Delta/\Delta-11-11$.

В сравнении с группой из двух двухобмоточных трансформаторов той же мощности трехобмоточный трансформатор дешевле, в нем меньше суммарные потери электрической энергии, и для сооружения подстанции требуется меньшая площадь.

1.15.1. Основные уравнения и схема замещения

Теория трехобмоточного трансформатора строится подобно двухобмоточному. При этом отметим, что приближенное разложение реально-го магнитного поля на основное и поле рассеяния, использованное в двухобмоточном трансформаторе, строго говоря, неприменимо для трехобмоточного трансформатора. Оно имеет смысл только для каждой пары обмоток в отдельности, так как для отдельных пар обмоток ВН–СН, ВН–НН и СН–НН (см. рис. 1.41, б) разложения отличаются и по основному полю, и по полю рассеяния, ввиду неодинакового взаимного расположения обмоток в парах.

С целью упрощения математического описания примем следующие допущения:

- основное поле замыкается по магнитопроводу;
- каждая обмотка имеет по отношению к двум другим одно и то же индуктивное сопротивление рассеяния.

Если принять условные положительные направления ЭДС, напряжений и токов по аналогии с двухобмоточным трансформатором (см. рис. 1.19), то при принятых допущениях уравнения электрического равновесия приведенного трехобмоточного трансформатора с одной первичной и двумя вторичными обмотками будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{E}_1 + r_1 \underline{I}_1 + jx_1 \underline{I}_1, \\ \underline{U}'_2 &= \underline{E}_1 - r'_2 \underline{I}'_2 - jx'_2 \underline{I}'_2, \\ \underline{U}'_3 &= \underline{E}_1 - r'_3 \underline{I}'_3 - jx'_3 \underline{I}'_3. \end{aligned} \right\} \quad (1.27)$$

Параметры r_1, r'_2, r'_3 являются активными сопротивлениями обмоток, а параметры x_1, x'_2, x'_3 можно считать некоторыми эквивалентными величинами, используемыми для приближенного отображения количественных связей между токами и напряжениями реального трехобмоточного трансформатора. Применительно к каждой обмотке они учитывают как явление самоиндукции от поля рассеяния соответствующей обмотки, так и индукционное действие других обмоток.

Уравнение равновесия магнитодвижущих сил трехобмоточного трансформатора в режимах нагрузки и холостого хода при условии, что магнитное состояние сердечника в обоих режимах одинаково, может быть записано в виде:

$$\underline{I}_1 w_1 - \underline{I}_2 w_2 - \underline{I}_3 w_3 = \underline{I}_0 w_1,$$

где $\underline{I}_0$ – ток холостого хода.

После приведения этого уравнения к числу витков первичной обмотки и сокращения на это одинаковое для всех обмоток число витков получим соотношение для токов:

$$\underline{I}_1 - \underline{I}_2' - \underline{I}_3' = \underline{I}_0. \quad (1.28)$$

В трансформаторах, имеющих большую мощность, к которым относятся и используемые в электроэнергетике трехобмоточные трансформаторы, ток холостого хода относительно невелик, и с целью упрощения анализа можно приближенно принять, что $\underline{I}_0 \approx 0$. С учетом этого допущения полученным уравнениям (1.27) и (1.28) соответствует упрощенная схема замещения (рис. 1.42), в которой опущена ветвь $\underline{Z}_0$ намагничивающего контура.

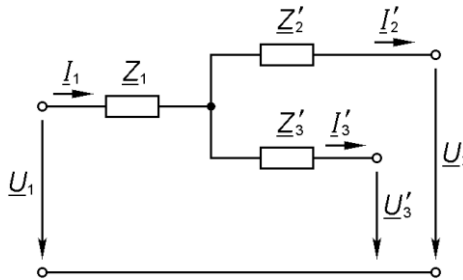


Рис. 1.42. Упрощенная схема замещения трехобмоточного трансформатора

1.15.2. Определение параметров схемы замещения из опытов холостого хода и короткого замыкания

Параметры схемы замещения трехобмоточного трансформатора приближенно находят экспериментальным путем из опытов холостого хода и короткого замыкания, входящих в программу электромагнитных испытаний.

Для определения параметров упрощенной схемы замещения проводят три опыта КЗ, схемы которых представлены на рис. 1.43, а–в. В каждом из опытов задействуются две обмотки из трех: к одной из них подводится пониженное напряжение, другая закорочена. При этом каждое из сопротивлений короткого замыкания $\underline{Z}_{к12}$, $\underline{Z}_{к13}$ и $\underline{Z}_{к23}$ равно сумме сопротивлений обмоток, задействованных в опыте:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{к12} &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_2, \\ \underline{Z}_{к13} &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_3, \\ \underline{Z}_{к23} &= \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3. \end{aligned} \right\} \quad (1.29)$$

При этом каждое сопротивление КЗ оказывается приведенным к числу витков той обмотки, к которой подводится напряжение. Сопротивление $\underline{Z}_{к23}$, полученное из третьего опыта, должно быть приведено к параметрам первичной обмотки: $\underline{Z}'_{к23} = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3$.

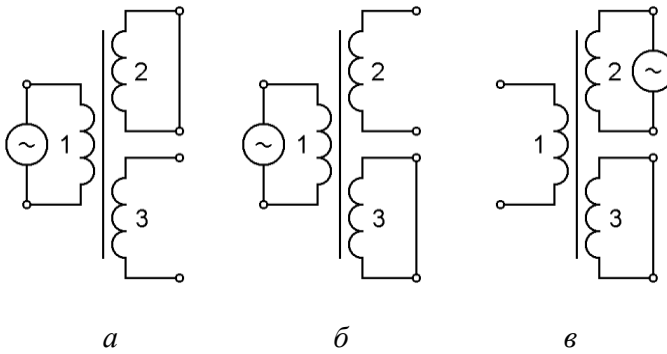


Рис. 1.43. Схемы опытов для определения сопротивлений КЗ трехобмоточного трансформатора

Из системы уравнений (1.29) с учетом приведения $\underline{Z}_{к23}$ можно получить следующие выражения для сопротивлений отдельных обмоток:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_1 &= 0,5(\underline{Z}_{к12} + \underline{Z}_{к13} - \underline{Z}'_{к23}), \\ \underline{Z}'_2 &= 0,5(\underline{Z}_{к12} + \underline{Z}'_{к23} - \underline{Z}_{к13}), \\ \underline{Z}'_3 &= 0,5(\underline{Z}_{к13} + \underline{Z}'_{к23} - \underline{Z}_{к12}). \end{aligned} \right\} \quad (1.30)$$

Значения эквивалентных полных сопротивлений отдельных обмоток зависят от их взаимного расположения. Реактивное сопротивление обмотки, расположенной между двумя другими, обычно значительно меньше (может даже иметь отрицательное значение). Когда эта обмотка является первичной, нагрузки вторичных обмоток, как следует из схемы замещения на рис. 1.42, оказывают минимальное влияние друг на друга.

1.15.3. Режим нагрузки

В трансформаторе все обмотки магнитно связаны между собой. Поэтому при нагрузке вторичные обмотки трехобмоточного трансформатора взаимно влияют друг на друга.

Из уравнения равновесия токов следует, что ток первичной обмотки зависит от токов нагрузки обеих вторичных обмоток. В соответствии с упрощенной схемой замещения (без учета тока холостого хода) первичный ток равен геометрической сумме приведенных вторичных токов: $I_1 = I_2' + I_3'$. При изменении нагрузки в одной из обмоток ее приведенный ток вызывает падение напряжения на сопротивлении Z_1 первичной обмотки. Это приводит к некоторому изменению амплитуды основного магнитного потока и ЭДС обмоток, что оказывает влияние на напряжение другой обмотки.

Для двух контуров упрощенной схемы замещения, проходящих через входные и выходные зажимы можно записать следующие уравнения (см. рис. 1.42):

$$\underline{U}_2' = \underline{U}_1 - I_1 Z_1 - I_2' Z_2' = \underline{U}_1 - (I_2' + I_3') Z_1 - I_2' Z_2' = \underline{U}_1 - I_2' (Z_1 + Z_2') - I_3' Z_1;$$

$$\underline{U}_3' = \underline{U}_1 - I_1 Z_1 - I_3' Z_3' = \underline{U}_1 - (I_2' + I_3') Z_1 - I_3' Z_3' = \underline{U}_1 - I_3' (Z_1 + Z_3') - I_2' Z_1.$$

Взаимное влияние обмоток при изменении нагрузки проявляется тем слабее, чем меньше сопротивление первичной обмотки Z_1 . С этой точки зрения целесообразно размещать первичную обмотку между вторичными, так как в этом случае x_1 намного меньше x_2' и x_3' .

По уравнениям можно построить векторные диаграммы и тем же методом, что и для двухобмоточного трансформатора, получить выражения для расчета относительного изменения напряжений на вторичных обмотках:

$$\Delta U_2 = \beta_2 (U_{\text{ка}12} \cos \varphi_2 + U_{\text{кр}12} \sin \varphi_2) + \beta_3 (U_{\text{ка}13} \cos \varphi_3 + U_{\text{кр}13} \sin \varphi_3),$$

$$\Delta U_3 = \beta_3 (U_{\text{ка}13} \cos \varphi_3 + U_{\text{кр}13} \sin \varphi_3) + \beta_2 (U_{\text{ка}12} \cos \varphi_2 + U_{\text{кр}12} \sin \varphi_2).$$

Как видно из этих выражений, относительное изменение напряжения на вторичных обмотках зависит от коэффициента нагрузки соответствующей обмотки, и от характера этой нагрузки.

1.16. Трансформаторы с расщепленной обмоткой

1.16.1. Область применения. Особенности устройства

В трансформаторе с расщепленной обмоткой (РО) одна из обмоток содержит две (или более) электрически изолированные части, имеющие отдельные выводы (рис. 1.44). Суммарная мощность частей РО равна номинальной мощности трансформатора. По сути, каждая часть представляет собой отдельную обмотку, которую можно использовать независимо от других. Когда РО является вторичной, ее части могут питать от одного источника независимых друг от друга потребителей, если первичная, – получать питание от независимых источников. Одна из частей может быть также отключена.

В сравнении с группой двухобмоточных трансформаторов с той же суммарной мощностью он дешевле, так как для активной части такого трансформатора требуется меньше стали и обмоточной меди. Это также приводит к снижению суммарных потерь энергии. При сооружении подстанции для него требуется меньшая площадь. Поэтому во многих случаях использование трансформатора с РО экономически выгодно.

Трансформаторы с РО находят широкое применение в схемах питания собственных нужд электростанций, на понижающих подстанциях систем электроснабжения промышленных предприятий с мощной резкопеременной и нелинейной нагрузкой, например, мощных вентильных преобразователей электропривода прокатных станов и др. Они позволяют снизить токи КЗ без установки ограничивающих реакторов, а также уменьшить взаимное влияние нагрузок, присоединенных к расщепленным частям обмотки.

На крупных электростанциях с целью упрощения схемы распределительного устройства несколько генераторов большой мощности могут соединяться с линией электропередач 330–500 кВ через повышающие трансформаторы с расщепленной первичной обмоткой.

Трансформатор с РО чаще имеет две расщепленные электрически не связанные обмотки одинакового класса напряжения, рассчитанные на 50% номинальной мощности трансформатора каждая. Но они могут иметь и разные напряжения, например, обмотки НН на 6 и 10 кВ.

Если отдельные части РО имеют одинаковое номинальное напряжение, они при необходимости могут быть соединены параллельно, и трансформатор с РО будет работать как двухобмоточный. Однако его использование при такой схеме не всегда оправдано, так как он дороже и имеет большие потери в сравнении с аналогичным по мощности двухобмоточным трансформатором.

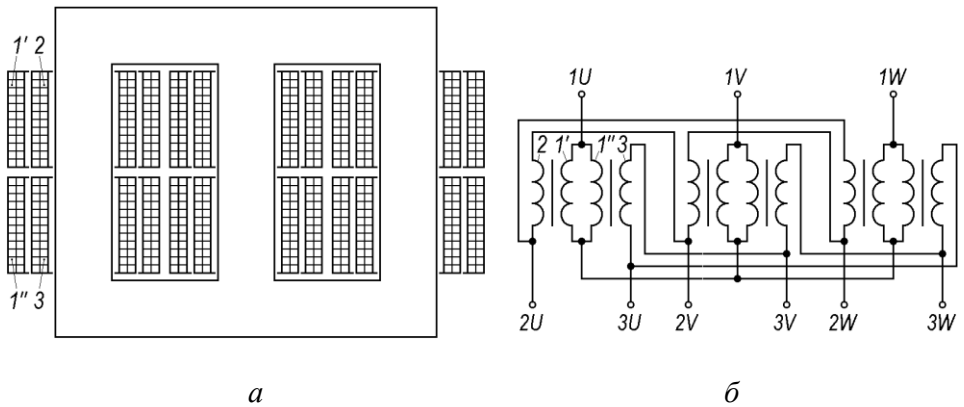


Рис. 1.44. Конструктивная схема трехфазного трансформатора с РО (а) и схема (Y_H/Δ -11-11) соединения его обмоток (б)

Трансформатор с РО отличается от обычного двухобмоточного тем, что каждая фаза имеет, как бы, двойной комплект обмоток половинной мощности. В трехфазном трансформаторе эти комплекты размещают друг за другом вдоль оси стержня (рис. 1.44, а; см. также рис. 1.4), в однофазном – на разных стержнях. От взаимного расположения обмоток зависят параметры схемы замещения и эксплуатационные свойства трансформатора. Согласно ГОСТу такие трансформаторы выполняются со схемой и группой соединения обмоток: трехфазные – Y_H/Δ -11-11 или Δ/Δ -0-0, однофазные – 1/1-0-0.

Однофазные трансформаторы с расщепленными обмотками выполняются на напряжения 500–700 кВ и обычно имеют бронестержневую конструкцию магнитопровода.

Ниже рассматриваются силовые трехфазные трансформаторы с расщепленной на две одинаковые части обмоткой НН.

В понижающем трансформаторе с расщепленной обмоткой НН ветви 1' и 1'' нерасщепленной обмотки ВН соединены параллельно и имеют общие выводы (как одна обмотка). Они выполняются одинаковыми по конструкции с равным числом витков.

Каждая из частей 2 и 3 расщепленной обмотки НН имеет отдельные выводы (рис. 1.44, б), поэтому по их числу трансформатор с РО аналогичен трехобмоточному. Однако он может быть отнесен и к четырехобмоточному, если считать параллельно соединенные ветви 1' и 1'' обмотки ВН отдельными обмотками.

Согласно теории магнитно связанных контуров магнитный поток рассеяния и связанное с ним понятие об индуктивном сопротивлении рассеяния рассматривается в системе из двух магнитно-связанных обмоток (см. п. 1.6). Его величина зависит от их конструктивных особенно-

стей и взаимного расположения. Обмотки 2 и 3 по отношению к обмотке 1 расположены концентрически и взаимно симметрично. Это обеспечивает равенство по отдельности (при отключении одной из них) индуктивных сопротивлений короткого замыкания относительно обмотки ВН в целом (одноцепные сопротивления): $x_{к 1-2} = x_{к 1-3}$.

Расщепленные обмотки 2 и 3 разнесены вдоль стержня, а ветвь 1' и обмотка 2 (аналогично 1'' и 3) расположены концентрически, поэтому в первом случае рассеяние намного больше, чем во втором. Вследствие этого сопротивление короткого замыкания $x_{к 2-3}$ между расщепленными обмотками (сопротивление расщепления) намного больше сопротивления короткого замыкания $x_{к 1-2||3}$ между обмоткой ВН и параллельно соединенными расщепленными обмотками 2 и 3 (сквозное сопротивление): $x_{к 2-3} \gg x_{к 1-2||3}$. Отношение этих сопротивлений называется коэффициентом расщепления k_p :

$$k_p = x_{2-3} / x_{1-2||3} = U_{к 2-3} / U_{к 1-2||3}. \quad (1.31)$$

Величина коэффициента расщепления зависит от конструктивных особенностей трансформатора. В практических расчетах используется его усредненное значение: для трехфазных трансформаторов при расположении обмоток одна над другой (см. рис. 1.44, а) $k_p = 3,5$; для однофазных – $k_p = 4$.

Большее значение k_p для однофазных трансформаторов можно объяснить большим значением сопротивления расщепления, так как магнитное сопротивление потоку рассеяния относительно меньше из-за возможности его замыкания через боковые ярма бронестержневого сердечника.

1.16.2. Распределение токов по обмоткам

Трансформатор с РО соответствует четырехобмоточному трансформатору, в котором (см. рис. 1.44):

- обмотки ВН и НН расположены концентрически;
- две одноименные фазы у каждой из этих обмоток пространственно разнесены;
- две одноименные фазы обмоток ВН соединены параллельно, образуя одну обмотку.

Такая конструктивная особенность приводит к тому, что если нагружена одна из обмоток НН, то преимущественно нагружается концентрически расположенная по отношению к ней параллельная ветвь обмотки ВН. Нагрузка другой ветви увеличивается значительно меньше.

Рассмотрим распределение токов в параллельных ветвях 1' и 1'' обмотки ВН для простого частного случая, когда обмотка 2 нагружена, а обмотка 3 разомкнута, вследствие чего она не оказывает влияния и при исследовании не учитывается. В этом режиме трансформатор с РО может быть принят как обычный двухобмоточный. Упрощенная схема замещения этого трансформатора представлена на рис. 1.45. Она отличается от схемы замещения на рис. 1.21, *а* тем, что в ней дополнительно отражено параллельное соединение ветвей 1' и 1'' обмотки ВН. Также не учитываются активные сопротивления обмоток; это часто встречается в инженерных расчетах и позволяет не использовать представление сопротивлений в комплексной форме.

Входящие в схему замещения вторичные параметры ее элементов будем считать приведенными к числу витков первичной обмотки. Сопротивления рассеяния отдельных ветвей обмотки ВН $x_{1'}$ и $x_{1''}$ соответствуют парам обмоток 1'–2 и 1''–2, сопротивление x_2' – паре 2–1 (1 – обмотка ВН в целом).

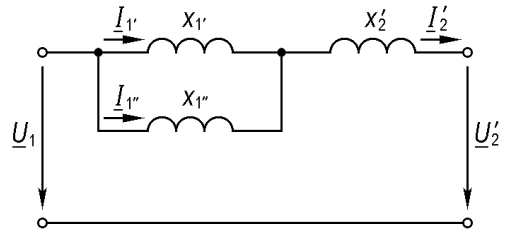


Рис. 1.45. Схема замещения трансформатора с РО при отсутствии нагрузки в обмотке 3

Как известно, в пассивных ветвях, соединенных параллельно, токи обратно пропорциональны их сопротивлениям:

$$I_{1'} / I_{1''} = x_{1''} / x_{1'}.$$

Магнитное рассеяние пространственно разнесенных обмоток 1''–2 значительно превышает рассеяние обмоток 1'–2, расположенных концентрически, поэтому $x_{1''} > x_{1'}$. Чем больше это различие, тем меньше величина тока $I_{1''}$ в сравнении с $I_{1'}$.

Для предельного режима $I_3 = 0$ эквивалентное сопротивление трансформатора с РО в соответствии со схемой замещения (см. рис. 1.45) выражается формулой:

$$x_{1-2} = \frac{x_{1'} x_{1''}}{x_{1'} + x_{1''}} + x_2'. \quad (1.32)$$

Когда нагружены обе вторичные обмотки, возникает дополнительное взаимное индукционное влияние между всеми обмотками, так как они магнитно связаны между собой. В этом случае схема замещения на рис. 1.45 непригодна для расчета распределения токов.

При равномерной нагрузке ветвей 1' и 1'', в частности, в режиме КЗ, индуктивные сопротивления $x_{1'}$ и $x_{1''}$ параллельных ветвей обмотки ВН равны между собой: $x_{1'} = x_{1''}$ каждое из них выражается через эквивалентное сопротивление рассеяния всей обмотки ВН очевидным соотношением: $x_{1'} = 2x_1$. В опыте КЗ с параллельным соединением обмоток НН, являющемся частным случаем равномерной нагрузки, с учетом того, что $x_{2'} = x_{3'}$, сквозное сопротивление трансформатора с РО равно:

$$x_{1-2\parallel 3} = x_1 + x_2'/2. \quad (1.33)$$

Из сравнения формул (1.32) и (1.33) следует, что в режиме предельного небаланса нагрузок эквивалентное сопротивление возрастает в сравнении со «сквозным» сопротивлением: $x_{1-2} > x_{1-2\parallel 3}$.

Трансформатор с РО будет иметь близкое к предельному небалансу эквивалентное сопротивление при КЗ в цепи одной из частей расщепленной обмотки. Это объясняется описанной выше особенностью: ток КЗ протекает преимущественно по короткозамкнутой части расщепленной обмотки и концентрически расположенной с ней параллельной ветви нерасщепленной обмотки. Возрастание этого эквивалентного сопротивления приводит к ограничению тока КЗ.

1.16.3. Уменьшение взаимного влияния нагрузок

Для оценки взаимного влияния нагрузок, подключенных к обмоткам 2 и 3, воспользуемся традиционной упрощенной схемой замещения трансформатора с РО, аналогичной схеме замещения трехобмоточного трансформатора (см. рис. 1.42). Если пренебречь активным сопротивлением обмоток она будет иметь вид, представленный на рис. 1.46:

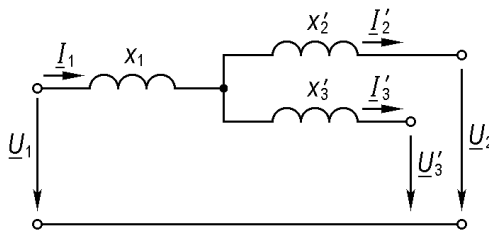


Рис. 1.46. Приближенная схема замещения трансформатора с РО

Параметры этой схемы замещения могут быть рассчитаны по приближенным формулам, которые можно вывести из уравнений (1.30) с учетом выражения (1.31) для коэффициента расщепления k_p :

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_{1-2||3} - x_{2-3} / 4 = x_{1-2||3} (1 - k_p / 4), \\ x'_2 &= x'_3 = x_{2-3} / 2 = x_{1-2||3} k_p / 2. \end{aligned} \right\} \quad (1.34)$$

В двухобмоточном трансформаторе, как следует из Т-образной схемы замещения (см. рис. 1.20), подключенные ко вторичной обмотке нагрузки влияют друг на друга, так как создают заметное падение напряжения на элементах r_1 , x_1 , имеющих близкие к r'_2 , x'_2 сопротивления, и влияют на вторичное напряжение.

В трансформаторе с РО при изменении нагрузки одной из частей расщепленной обмотки соответствующая составляющая тока, протекая по нерасщепленной обмотке (см. рис. 1.46), создает значительно меньшее падение напряжения на сопротивлении x_1 , так как из выражений (1.34) следует, что $x_1 \ll x'_2$, $x_1 \ll x'_3$. Вследствие этого при нагрузке взаимное влияние друг на друга вторичных обмоток снижается.

Физически оно может быть объяснено тем, что магнитный поток рассеяния нерасщепленной обмотки в концентрически расположенных парах 1'–2 и 1''–3 значительно меньше, чем в пространственно разнесенных парах 1'–3 и 1''–2. Поэтому трансформаторы с расщепленной обмоткой НН широко применяются на крупных промышленных предприятиях для раздельного питания относительно спокойных и резкопеременных, а также нелинейных нагрузок.

1.17. Автотрансформаторы

Автотрансформатором называется трансформатор, у которого обмотка высшего напряжения включает в себя витки общей обмотки. В силовых трансформаторах обычно обмотка СН является частью обмотки ВН (рис. 1.47). Благодаря этому мощность из первичной цепи во вторичную передается не только посредством электромагнитной индукции, но и за счет электрической связи. Это позволяет значительно уменьшить потери мощности и расход активных материалов, а также снизить по сравнению с обычным трансформатором. Преимущество автотрансформатора в большей степени проявляется тогда, когда связываются сети с близкими номинальными напряжениями.

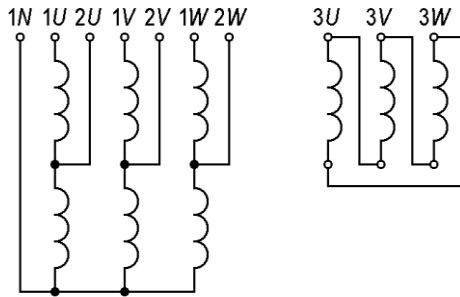


Рис. 1.47. Схема соединения обмоток трехфазного трехобмоточного автотрансформатора $Y_n \text{ авто}/\Delta-0-11$

В системах электроснабжения силовые автотрансформаторы обычно применяют для связи двух электрических сетей высокого напряжения (110 кВ и выше). Автотрансформаторы также используются для снижения напряжения при пуске асинхронных и синхронных двигателей большой мощности, при регулировании режимов работы электрометаллургических печей, в преобразовательной технике (инверторы, ведомые сетью и др.) и т.д.

Автотрансформаторы могут использоваться как для повышения, так и для понижения напряжения. Если обмотка ВН является первичной, автотрансформатор будет понижающим, в противоположном случае — повышающим.

Автотрансформаторы могут быть одно- и трехфазными, двух- и трехобмоточными. Трехфазные трехобмоточные АТ (см. рис. 1.47) имеют две электрически связанные обмотки ВН и СН, соединенные в звезду с обязательным глухим заземлением нейтрали, и соединенную в треугольник отдельную третью обмотку НН, имеющую другими обмотками только электромагнитную связь. К ней могут подключаться генераторы, трансформаторы собственных нужд электростанций, синхронные компенсаторы и статические конденсаторы подстанций. В автотрансформаторах класса напряжения 220, 330 и 500 кВ обмотка СН всегда располагается между обмотками ВН и НН.

Соединенная в треугольник обмотка НН создает контур для протекания токов нулевой последовательности, магнитные потоки которых в соответствии с законом Ленца компенсируют вызвавшие их потоки нулевой последовательности основной временной гармоники и гармоник, кратных трем. Как следствие, уменьшается сопротивление нулевой последовательности в сети с заземленной нейтралью и снижается несимметрия фазных напряжений при несимметричной нагрузке. Это также важно для повышения чувствительности релейной защиты.

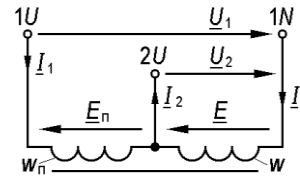
Наличие третьей обмотки НН увеличивает размеры, массу и стоимость АТ. Если она ни к чему не подключена и служит только для ком-

пенсации потоков основной и кратных трех гармонических составляющих, то ее мощность рассчитывается, исходя из требований термической и электродинамической стойкости при КЗ, и составляет около 1/3 электромагнитной мощности АТ. Когда к ней подключается генератор или синхронный компенсатор, мощность обмотки НН увеличивается до значения электромагнитной мощности.

1.17.1. Трансформация напряжений и токов

Рассмотрим процессы на примере идеального понижающего однофазного автотрансформатора, у которого отсутствуют рассеяние и потери энергии, а магнитопровод имеет бесконечно большую магнитную проводимость. Особенности трансформации напряжений и токов в автотрансформаторе по сравнению с двухобмоточным трансформатором обусловлены электрической связью обмоток: последовательной и общей (рис. 1.48).

Рис. 1.48. Схема однофазного автотрансформатора



Обозначим число витков общей обмотки через w , а последовательной, являющейся частью обмотки ВН – через w_n . Примем, что направление намотки одинаково. В этом случае направление ЭДС, индуцируемых в обмотках, также будет одинаковым.

При подключении выводов $1U-1N$ к источнику переменного напряжения в трансформаторе создается переменный магнитный поток, пронизывающий витки обмоток. Так как контур источник – витки обмоток ($w_n + w$) идеален, этот магнитный поток поддерживается постоянным по амплитуде так же, как и в двухобмоточном трансформаторе. Поскольку витки последовательной и общей обмоток автотрансформатора пронизываются одним и тем же магнитным потоком, отношение индуцируемых в них ЭДС равно отношению чисел их витков:

$$E_n / E = w_n / w.$$

С учетом сделанного допущения об идеальности (отсутствие рассеяния и потерь энергии), падения напряжения на обмотках автотрансформатора отсутствуют, и в соответствии со вторым законом Кирхгофа напряжения на первичной и вторичной стороне уравниваются только основными ЭДС:

$$U_1 = E_{\pi} + E; \quad U_2 = E.$$

Отношение первичного и вторичного напряжения называется коэффициентом трансформации:

$$k_{\text{тр}} = U_1 / U_2 = (E_{\pi} + E) / E = 1 + w_{\pi} / w.$$

При включении нагрузки возникает дополнительный контур для протекания вторичного тока I_2 , на величину которого оказывают влияние как внешнее напряжение U_1 , так и индуцируемые ЭДС E_{π} и E . Возникновение тока в нагрузке влечет изменение токов в обмотках w_{π} и w , оказывающих друг на друга индукционное действие.

Примем «естественные» условные положительные направления протекания токов в обмотках автотрансформатора (см. рис. 1.48): направление первичного тока I_1 совпадает с направлением приложенного напряжения U_1 ; направление вторичного тока I_2 в нагрузке совпадает с направлением действия ЭДС E общей обмотки; направление тока I в этой обмотке противоположно току I_1 последовательной обмотки, что соответствует правилу Ленца. Поскольку по допущению рассматривается идеальный автотрансформатор, у которого намагничивающий ток равен нулю, то при выбранной системе условных положительных направлений можно не использовать комплексную форму записи токов.

Как и в обычном двухобмоточном трансформаторе, магнитный поток в автотрансформаторе создается суммарной МДС всех его обмоток. Из того, что он по амплитуде поддерживается неизменным, следует, что нагрузочные составляющие этих МДС взаимно уравновешены:

$$I_1 w_{\pi} - I w \approx 0.$$

В точке электрического соединения обмоток токи должны удовлетворять первому закону Кирхгофа:

$$\text{в понижающем автотрансформаторе} - I_2 = I_1 + I,$$

$$\text{в повышающем автотрансформаторе} - I_1 = I + I_2.$$

Сила тока в общей обмотке автотрансформатора всегда равна разности токов первичной и вторичной стороны:

$$I = I_2 - I_1.$$

Можно легко убедиться, что соотношение вторичного и первичного тока равно коэффициенту трансформации напряжений:

$$I_2 / I_1 = (I_1 + I) / I_1 = 1 + I / I_1 = 1 + w_{\pi} / w = k_{\text{тр}}.$$

Чем ближе коэффициент трансформации напряжений к единице, тем меньше общий ток, так как в этом случае токи I_2 и I приближаются друг к другу по величине и, следовательно, их разность уменьшается.

Это дает возможность изготавливать общую обмотку из провода меньшего сечения.

1.17.2. Электромагнитная, электрическая и проходная мощность

В теории автотрансформаторов различают три составляющих мощности: проходную, электромагнитную (типовая, расчетная) и электрическую. В дальнейшем, если это специально не оговорено, мы пренебрежем потерями мощности в автотрансформаторе и током холостого хода.

Проходная мощность автотрансформатора соответствует мощности каждой из сторон. Она передается с первичной на вторичную сторону как электрическим путем, так и посредством электромагнитной индукции.

$$S_{\text{пр}} = U_1 I_1 \approx U_2 I_2.$$

Электромагнитная мощность передается автотрансформатором из одной сети в другую посредством электромагнитной индукции. Она соответствует мощности общей или последовательной обмотки:

$$S_{\text{эм}} = E_{\text{п}} I_{\text{п}} = EI.$$

Электрическая мощность передается автотрансформатором из одной сети в другую непосредственно электрическим путем благодаря гальванической связи между соответствующими обмотками. Ее можно найти как разность проходной и электромагнитной мощности:

$$S_{\text{эл}} = S_{\text{пр}} - S_{\text{эм}} = U_2 I_{\text{п}}.$$

Таким образом, она равна произведению вторичного напряжения U_2 на выводах $2U-1N$ общей обмотки на ту часть тока нагрузки, которая является следствием гальванической связи, т.е. на силу тока последовательной обмотки.

Формулы для расчета $S_{\text{эм}}$, $S_{\text{эл}}$, $S_{\text{пр}}$ даны применительно к однофазному автотрансформатору. Для трехфазного в формулах необходимо использовать фазные величины и результат утроить.

1.17.3. Сравнительная оценка автотрансформатора и двухобмоточного трансформатора

Масса обмоток и магнитопровода трансформатора зависит от электромагнитной мощности. Для обычного двухобмоточного трансформатора электромагнитная и проходная мощности равны ($S_{\text{эм}} = S_{\text{пр}}$), так как электрическим путем мощность на вторичную сторону не передается ($S_{\text{эл}} = 0$).

Определим соотношение этих мощностей для понижающего автотрансформатора (рис. 1.48).

$$S_{\text{эм}} / S_{\text{пр}} = U_2 I / (U_2 I_2) = (I_2 - I_1) / I_2 = 1 - 1 / k_{\text{тр}}.$$

Для повышающего трансформатора выкладки аналогичны.

Очевидно, что для автотрансформатора $S_{\text{эм}} < S_{\text{пр}}$. Их отношение называют коэффициентом выгодности (или коэффициентом электромагнитной мощности): $k_{\text{в}} = S_{\text{эм}} / S_{\text{пр}} < 1$. Чем меньше этот коэффициент, тем экономически выгоднее использование автотрансформатора, так как значение $S_{\text{эм}}$ определяет расход активных материалов, и, следовательно, его массу и габариты. Это обусловлено следующим.

По общей обмотке автотрансформатора всегда протекает разность токов вторичной и первичной стороны. Чем ближе $k_{\text{тр}}$ к единице, тем меньше значение общего тока. Кроме того, частью обмотки ВН является обмотка НН. Все это приводит к тому, что в автотрансформаторе обмоточные провода занимают меньший объем и, следовательно, при одинаковой с обычным трансформатором плотности тока электрические потери в обмотках меньше.

Из-за меньшего значения электромагнитной мощности при одинаковой с обычным трансформатором проходной мощности и меньшего объема, занимаемого обмотками, у автотрансформатора меньше объем магнитопровода и, следовательно, потери энергии в нем.

Вследствие снижения потерь электроэнергии КПД автотрансформатора выше, чем у обычного двухобмоточного трансформатора.

Электрическое соединение первичной и вторичной сторон автотрансформатора имеет и недостаток, связанный с возможностью появления высокого напряжения с низкой стороны. Вследствие этого автотрансформаторы по условиям безопасности не используются для связи сетей высокого и низкого напряжения. Это обязывает также выполнять изоляцию обмоток в расчете на высокое напряжение.

В автотрансформаторе общая обмотка является частью обмотки высшего напряжения, поэтому число витков в этих участвующих в процессе взаимной индукции обмотках при сопоставимых условиях меньше, чем в обмотках двухобмоточного трансформатора. Как следствие, индуктивности рассеяния и сопротивление короткого замыкания, основную часть которого составляют индуктивные сопротивления рассеяния обмоток, также меньше, а ток короткого замыкания больше. В соответствии с формулой (1.16) изменение вторичного напряжения при нагрузке у автотрансформатора будет меньше, чем у двухобмоточного трансформатора. При замыкании накоротко отдельных обмоток автотрансформатора магнитный поток возрастает обратно пропорционально числу оставшихся витков, а намагничивающий ток из-за насыщения магнитопровода достигает значений, соизмеримых с током короткого замыкания. По этой и указанной выше причине в автотрансформаторах токи короткого замыкания необходимо ограничивать до безопасных значений специальными устройствами.

Схемы замещения автотрансформатора и обычного двухобмоточного трансформатора одинаковы. Параметры схемы замещения АТ могут быть найдены из опыта КЗ. Расчет изменения вторичного напряжения и расчет КПД АТ проводится по аналогичным же формулам.

ГЛАВА 2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

2.1. Классификация электрических машин

Электрические машины выпускаются в широком диапазоне мощностей: от единиц ватт до сотен мегаватт и более. Их разделяют на микромашины (единицы – десятки ватт), машины малой мощности (десятки – сотни Вт), машины средней мощности (единицы – десятки киловатт) и машины большой мощности (сотни киловатт и более). Границы между группами в определенной степени условны.

Генераторы предназначены для преобразования механической энергии в электрическую, *двигатели* – для обратного преобразования. Они обратимы, т.е. генераторы могут работать в режиме двигателя и наоборот. Принцип обратимости широко используется в энергетике, промышленности на транспорте: гидроаккумулирующие электростанции, рекуперативное торможение электродвигателей и др.

Электромашинные преобразователи служат для преобразования электрической энергии одного вида в другой (частоты, напряжения, числа фаз и т.д.). Они могут выполняться в виде двигатель-генераторных агрегатов или одноякорных преобразователей.

Преобразователь первого вида состоит из двигателя и генератора, роторы которых имеют общий вал, а статоры (с отдельными электромагнитными системами) установлены в одном корпусе.

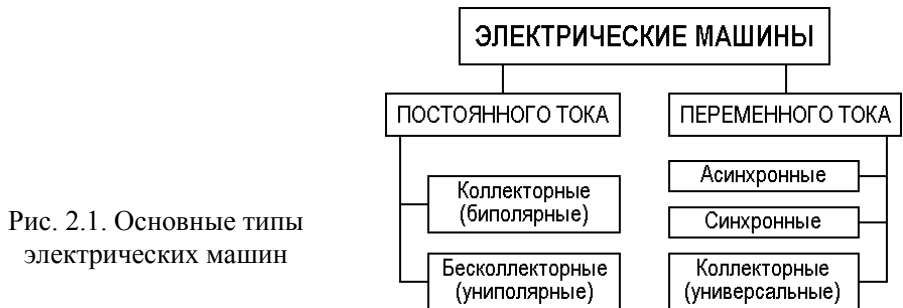
Одноякорные преобразователи обычно используются для преобразования электрической энергии переменного тока в энергию постоянного тока; возможно также и обратное преобразование. Конструктивно одноякорный преобразователь представляет собой электрическую машину постоянного тока, дополнительно снабженную контактными кольцами по числу фаз. По существу, в нем совмещены синхронная машина (со стороны контактных колец) и машина постоянного тока (со стороны коллектора). В настоящее время они вытеснены полупроводниковыми преобразователями и используются лишь в специальных случаях.

Электромашинные преобразователи имеют некоторые преимущества перед полупроводниковыми: более высокие показатели качества электроэнергии; возможность в течение некоторого времени за счет кинетической энергии вращающихся масс обеспечивать электроснабжение при кратковременном перерыве питания на стороне двигателя, в частности, при переходе на резервный источник питания; возможность использования в агрегате серийные машины общего применения.

Недостатки: большие затраты при эксплуатации; более низкий результирующий КПД, равный произведению КПД отдельных машин.

Электромашинный усилитель (ЭМУ) – электрическая машина, работающая в генераторном режиме и служащая для усиления электрических сигналов за счёт энергии первичного электрического двигателя. Обычно такие усилители применяют в системах автоматического управления. Существуют их различные виды. Наиболее широкое применение получили ЭМУ поперечного поля.

По роду тока различают электрические машины постоянного и переменного тока (рис. 2.1).



Работа машин постоянного тока может быть основана на использовании периодически изменяющегося по окружности зазора ($2p$ -полюсного) и однонаправленного магнитного поля. Машины с полем первого типа называют биполярными, а второго – униполярными. Практическое применение нашли биполярные машины постоянного тока (коллекторные). По принципу действия им аналогичны универсальные коллекторные двигатели.

Машины переменного тока классифицируют по числу фаз (однофазные, трехфазные, многофазные), по принципу действия (асинхронные и синхронные).

В настоящем курсе рассматриваются асинхронные, синхронные и коллекторные машины постоянного тока классического типа.

Преобразование энергии осуществляется посредством магнитного поля и связано с явлениями электромагнитной индукции и силового взаимодействия токов (преобразователи, использующие явление электростатической индукции и силовое взаимодействие неподвижных электрических зарядов, практически не применяются).

2.2. Номинальные режимы работы

Режим работы электрической машины – это совокупность условий работы за определенный интервал времени. ГОСТом установлено восемь номинальных режимов работы (условное обозначение – S1–S8), основными из которых являются описанные ниже.

Продолжительный режим S1 характеризуется условием, при котором работа двигателя при неизменной номинальной нагрузке продолжается так долго, что температура нагрева всех его частей успевает достигнуть установившихся значений.

Кратковременный режим S2 характеризуется условием, при котором периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения двигателя. При этом в периоды работы температуры нагрева всех частей двигателя не достигают установившихся значений, а в периоды отключения успевают охладиться до температуры окружающей среды.

Стандартом предусмотрены номинальные кратковременные режимы с длительностью периода неизменной нагрузки 10, 30, 60 и 90 мин (если в стандартах или технических условиях не установлена иная). Примерами кратковременного режима является работа электроприводов шлюзов, заслонок разного вида, вентилях и других запорных устройств, регулирующих подачу воды, нефти, газа и др.

Повторно-кратковременный режим S3 характеризуется условием, при котором кратковременные периоды работы двигателя t_p чередуются с периодами отключения двигателя (паузами) t_n , причем за период работы t_p превышение температуры не успевает достигнуть установившихся значений, а за время паузы части двигателя не успевают охладиться до температуры окружающей среды.

Общее время работы двигателя в повторно-кратковременном режиме разделяется на периодически повторяющиеся циклы продолжительностью $t_u = t_p + t_n$, равной 10 мин (если в стандартах или технических условиях не установлена иная). Повторно-кратковременный режим характеризуется относительной продолжительностью включения:

$$\text{ПВ}\% = (t_p / t_u) \cdot 100.$$

Регламентированы номинальные повторно-кратковременные режимы с ПВ 15, 25, 40 и 60 %. Примерами повторно-кратковременного режима является работа электроприводов лифтов, подъемных кранов, экскаваторов и других устройств, для которых характерна цикличность (чередование периодов работы с паузами).

2.3. Конструктивное исполнение

Конструктивное исполнение электрической машины определяется способом монтажа и степенью защиты, обеспечиваемой оболочкой.

Способ монтажа указывает на крепление, пространственное положение машины на месте установки и исполнение рабочего конца вала. Машины рассчитывают на горизонтальное или вертикальное расположение вала; они могут крепиться с помощью выполненных на корпусе лап, фланцев или лап и фланцев одновременно. В некоторых случаях применяют, так называемые, встраиваемые электродвигатели, имеющие общий корпус с рабочей машиной (например, компрессором). Наиболее употребительные способы монтажа представлены на рис. 2.2.

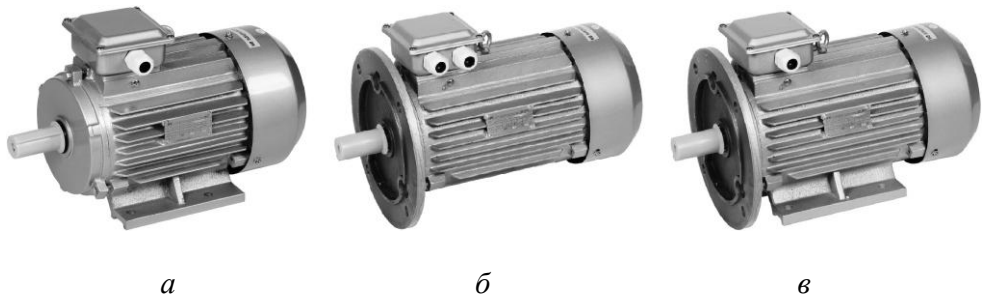


Рис. 2.2. Асинхронные двигатели закрытого исполнения (IP-44) с различным исполнением по способу монтажа:

a – IM 1081 (на лапах); *б* – IM 3081 ((на лапах с фланцем на подшипниковом щите);
в – IM 2081 (комбинированное)

Буквенно-цифровое обозначение способа монтажа состоит из латинских букв IM и следующих за ним четырех цифр. Пример расшифровки цифровой части обозначения IM 1081 (рис. 3.1, *a*): 1 – на лапах с двумя подшипниковыми щитами; 0 – обычные лапы (не приподнятые); 8 – произвольное расположение конца вала; 1 – с одним цилиндрическим концом вала.

Степень защиты подразумевает обеспечиваемую оболочкой электрической машины защиту от доступа к опасным частям и от попадания внутрь внешних твёрдых посторонних предметов и воды.

Буквенно-цифровое обозначение степени защиты состоит из латинских букв IP (International Protection) и следующих за ними двумя цифрами, обозначающих степени защиты: первая – от попадания внутрь твердых посторонних тел, а также от соприкосновения с движущимися или находящимися под напряжением частями, вторая – от проникновения внутрь воды. Максимальная степень защиты – IP68: пыленепрони-

цаемая оболочка, выдерживающая длительное погружение в воду под давлением.

Подробное описание цифровых кодов исполнений по способу монтажа и степени защиты приведены в ГОСТе.

2.4. Общее устройство

Чаще всего механическая энергия подводится (генераторы) или отбирается (двигатели) за счет вращательного движения. Применяются также линейные двигатели, в которых вторичная часть («бегун») перемещается по прямой линии. Вращающиеся электрические машины в большинстве своем состоят из неподвижного статора с подшипниковыми щитами и ротора (рис. 2.3). Подшипниковые щиты крепятся к станине статора и служат опорой для ротора. Чтобы обеспечить возможность вращения, ротор выполняют в форме кругового цилиндра и устанавливают с зазором относительно расточки статора.

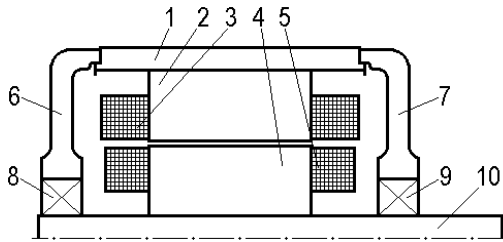


Рис. 2.3. Конструктивная схема электрической машины:

1 – станина; 2 – сердечник статора; 3 – обмотка статора; 4 – сердечник ротора;
5 – обмотка ротора; 6, 7 – подшипниковые щиты; 8, 9 – подшипники; 10 – вал

Вал ротора опирается на подшипники, которые в машинах малой и средней мощности обычно располагаются в подшипниковых щитах. Один конец вала удлинен для сопряжения с рабочей машиной. Имеются исполнения с двумя рабочими концами вала.

Конструкции конкретных типов машин рассматриваются ниже в соответствующих разделах пособия.

Основными частями статора и ротора являются обмотки (одна из обмоток, статорная или роторная, может отсутствовать) и сердечники.

Сердечники статора и ротора выполняют из магнитомягких ферромагнитных материалов с целью снижения магнитного сопротивления потоку. В совокупности с воздушным зазором они образуют магнитопровод.

Обмоткой называют систему витков или проводников, соединенных между собой по определенной схеме, предназначенную для протекания

тока. Обмотки предназначены для создания магнитного поля, посредством которого осуществляется электромеханическое преобразование энергии. Их конструкции весьма разнообразны. Чаще всего они выполняются из проводов: медных, алюминиевых, в некоторых случаях – из сплавов.

Различают *обмотки возбуждения* и *якорные*. Обмотка возбуждения создает первичное магнитное поле, посредством которого осуществляется преобразование энергии. Для создания постоянного магнитного поля вместо обмотки возбуждения также может быть использована система постоянных магнитов. Якорной называется та обмотка электрической машины, по которой протекает ток нагрузки и в которой наводится ЭДС. Она может одновременно являться и обмоткой возбуждения. Якорную обмотку имеет любая электрическая машина.

Наведение ЭДС в якорной обмотке может осуществляться за счет ее перемещения в магнитном поле возбуждения, или вследствие изменения поля возбуждения во времени. Возможно сочетание обоих способов.

Части электрической машины, на которых расположены обмотки возбуждения и якорная, соответственно называются индуктором и якорем. В этом качестве могут выступать и статор, и ротор.

Обмотки устанавливают на полюсах или укладывают в продольных пазах сердечников, что дает ряд преимуществ.

1. Уменьшается воздушный зазор между статором и ротором, и, соответственно, магнитное сопротивление потоку.

2. Через сердечники полюсов и зубцы проходит подавляющая часть магнитного потока, в то время как через пазы, в которых уложены проводники обмотки, весьма малая часть. Это приводит к перераспределению электромагнитных сил: действие на проводники значительно снижается (на порядок и более) и переносится на полюсы и зубцы. При этом результирующий момент от действия электромагнитных сил остается таким же, как если бы проводники обмотки были непрерывно распределены по окружности тонким слоем. Поэтому в дальнейшем при рассмотрении теории мы будем исходить именно из такого распределения.

3. Упрощается крепление обмотки на полюсах и в пазах.

4. Улучшается отвод тепла от обмотки.

Обмотки возбуждения явнополюсных индукторов выполняются в виде многовитковых катушек и называют сосредоточенными, так как создаваемое ими в рабочем воздушном зазоре магнитное поле мало отличается от поля витка с тем же суммарным током (МДС). Обмотки, состоящие из многих катушек (секций), уложенных в пазах по всей окружности сердечника статора или ротора, называют распределенными.

В зависимости от способа укладки различают однослойные, двухслойные и одно-двухслойные обмотки. В однослойной обмотке в каждом пазу располагается только одна пазовая сторона катушки (рис. 2.4, *а*), в двухслойной – две пазовые стороны различных катушек (рис. 2.4, *б, в*): одну сторону катушки укладывают в нижнюю часть паза, вторую – в верхнюю часть другого паза, отстоящего на расстоянии, равном шагу обмотки. В одно-двухслойной обмотке в каждой фазе часть катушек укладывается в один слой и занимает весь паз, а другая часть с половинным числом витков укладывается в два слоя.

Однослойные обмотки широко применяют в асинхронных двигателях до 15 кВт.

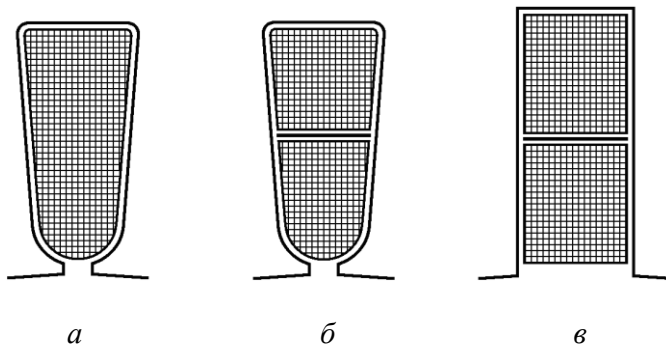


Рис. 2.4. Пазы с катушками однослойной (*а*), двухслойной (*б, в*) обмоток

В низковольтных (до 660 В) электрических машинах до 100 кВт обмотки выполняют из мягких катушек. Они проще в изготовлении, имеют меньший вылет лобовых частей и могут быть уложены в пазы трапециевидальной формы, обеспечивающие одинаковую ширину зубца на большей части его высоты и меньшее раскрытие паза. Это уменьшает магнитное сопротивление зубцовой зоны и снижает пульсации магнитного потока. Их наматывают на специальных станках или укладывают вручную (предварительно изготовленными) в полузакрытые пазы, как бы всыпая в паз отдельными проводниками (см. рис. 2.4, *а, б*), из-за чего их часто называют «всыпными».

В машинах большой мощности (более 100 кВт) и высоковольтных (свыше 1000 В) катушки наматывают из прямоугольного провода, что позволяет улучшить заполнение паза и выполнить более надежную изоляцию (см. ниже рис. 2.7). Катушки получают жесткими и укладываются в открытые пазы прямоугольного сечения (см. рис. 2.4, *в*).

Для статоров гидро- и турбогенераторов и крупных электрических машин, а также для фазных роторов асинхронных двигателей мощностью свыше 100 кВт применяют стержневые обмотки, в которых

витки образуются соединением стержней в лобовых частях после укладки в пазы.

2.5. Принцип создания многополюсного магнитного поля

В машинах происходит непрерывное преобразование энергии, для чего необходимо непрерывное возбуждение ЭДС в якорной обмотке и соответствующее изменение ее потокоцепления. Поскольку невозможно до бесконечности монотонно увеличивать или уменьшать потокоцепление, осуществляют его периодическое изменение во времени. Во вращающихся электрических машинах это достигается периодическим распределением поля возбуждения по ходу вращения обмотки. Магнитное поле, периодически изменяющее полярность по окружности зазора между статором и ротором, называется многополюсным, а количество его периодов на окружности зазора – числом пар полюсов p (соответственно, число полюсов – $2p$).

Для создания многополюсного магнитного поля обмотка должна образовывать соответствующую ему пространственно-периодическую систему токов. Это обеспечивается ее конструкцией, пространственным расположением и схемой соединения отдельных частей (катушечных групп) в сочетании с конструктивным исполнением магнитопровода. На рис. 2.5 изображен поперечный разрез неявнополюсной машины с сосредоточенной обмоткой, состоящей из двух катушек с пазовыми сторонами 1'–1'' и 2'–2'' и создающей магнитное поле с числом полюсов $2p = 4$.

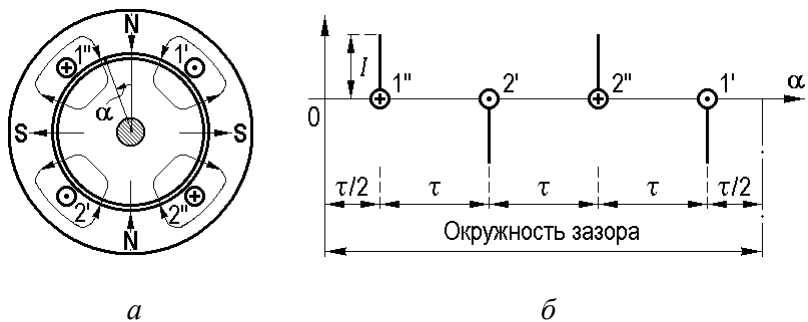


Рис. 2.5. Четырехполюсное магнитное поле в неявнополюсной машине, возбуждаемое периодической системой токов:
а – поперечный разрез машины; б – диаграмма токов

Часть дуги окружности статора (или ротора), соответствующая одному полупериоду поля основной гармоники, называется полюсным

делением τ . Оно может выражаться в единицах длины или числом зубцовых (пазовых) делений:

$$\tau = \pi D / (2p) \quad \text{или} \quad \tau = z / (2p), \quad (2.1)$$

где D – средний диаметр воздушного зазора, z – число пазов (зубцов) сердечника.

2.6. Конструктивные виды и параметры обмоток

Схема распределенной обмотки состоит из иерархически соподчиненных элементов (рис. 2.6).

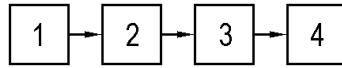


Рис. 2.6. Иерархическая структура строения обмотки

Элементарным конструктивным элементом якорной обмотки является катушка (секция) 1, которая входит в состав катушечной группы 2. Определенное взаимное расположение и электрическое соединение катушечных групп образует фазу 3 обмотки. В целом обмотка 4 состоит из пространственно-симметрично расположенных относительно друг друга электрически соединенных фаз 3.

Катушка может состоять из одного или многих витков и имеет общую изоляцию от сердечника и других частей обмотки. Форма катушки у различных типов обмоток неодинакова и определяется технологией укладки и конструкцией (рис. 2.7).

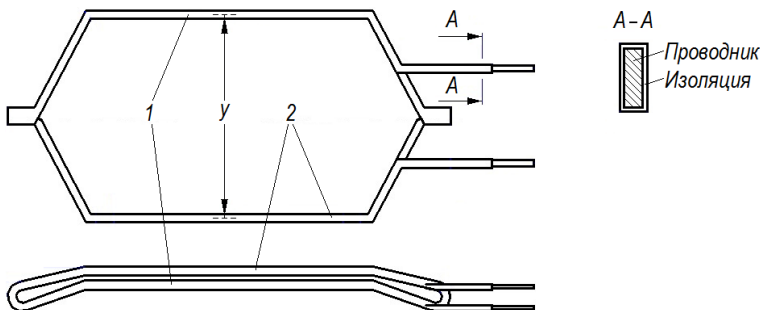


Рис. 2.7. Катушка двухслойной обмотки:
1 – верхняя сторона; 2 – нижняя сторона

Лежащие в пазах сердечника прямолинейные части катушки называют пазовыми (активными) сторонами, а выступающие за пределы сердечника – лобовыми частями. Форма катушки у различных типов обмоток неодинакова и определяется технологией укладки и конструкцией.

Расстояние y между пазовыми (активными) сторонами катушки называют шагом обмотки (см. рис. 2.7), который приблизительно равен полюсному делению, так как обмотка должна образовывать периодическую систему токов (по возможности, с максимальной МДС). Если шаг обмотки равен полюсному делению ($y = \tau$), он называется *диаметральным* или *полным*. Употребление термина «диаметральный» связано с тем, что в обмотках, имеющих число полюсов $2p = 2$, стороны катушек лежат в диаметрально расположенных пазах сердечника. Шаг меньше полюсного деления ($y < \tau$) называется *укороченным*.

Шаг обмотки удобно выражать числом пазовых делений, которое всегда является целым числом, так как равно количеству пазов, располагающихся между сторонами секций. Часто шаг выражают в относительных единицах (относительный шаг): $\beta = y / \tau$.

Группа лежащих в соседних пазах катушек, соединенных последовательно и принадлежащих одной фазной обмотке, образуют катушечную группу. В двухслойных и однослойных обмотках среднее число катушек в катушечных группах фазы обозначается через q и называется числом пазов на полюс и фазу:

$$q = z / 2pt. \quad (2.2)$$

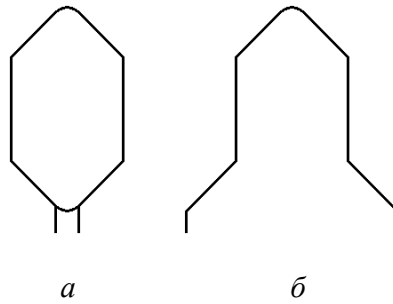
Оно может быть как целым, так и дробным числом. При целом q катушечные группы фазной обмотки имеют одинаковое число катушек, а при дробном q – различное.

Выраженная в угловых единицах часть дуги, занимаемая рядом лежащими сторонами катушечной группы (q -пазами), называется фазной зоной. Обмотки с целым q часто имеют фазную зону $\pi/3$ (60°), а обмотки с дробным q – фазную зону, равную в среднем $\pi/3$.

Катушечные группы в фазе двухслойной обмотки отстоят друг от друга по окружности сердечника на одно полюсное деление τ , в однослойной обмотке – на двойное полюсное деление 2τ . В двухслойной обмотке число катушечных групп равно числу полюсов, в однослойной – вдвое меньше. Электрическое соединение катушечных групп в фазе необходимо выполнять таким образом, чтобы они образовывали пространственно-периодическую систему токов в соответствии с числом полюсов обмотки (см. п. 2.5).

По способу последовательного соединения катушек (секций) и направлению отгиба их концов обмотки разделяются на петлевые и волновые (рис. 2.8). В петлевой обмотке конец одной катушки соединяется с началом рядом лежащей секции. В волновой обмотке конец одной секции соединяется с началом следующей, отстоящей от первой на двойное полюсное деление.

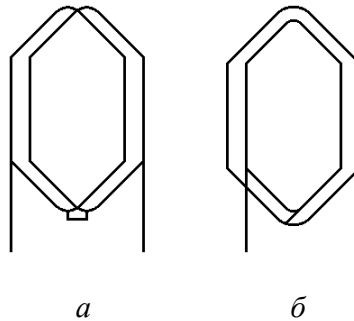
Рис. 2.8. Катушки петлевой (а) и волновой (б) обмоток



В машинах переменного тока чаще используются петлевые обмотки. Волновые обмотки используют с целью экономии материала на соединительные проводники, когда их катушки имеют один виток (статорные обмотки в машинах большой мощности, обмотки фазных роторов асинхронных двигателей).

Петлевые обмотки машин переменного тока могут выполняться равносекционными и concentрическими (рис. 2.9).

Рис. 2.9. Катушечные группы обмоток ($q = 2$):
а – равносекционной;
б – concentрической



В равносекционных обмотках катушки катушечных групп имеют одинаковый шаг и при укладке их лобовые части пересекаются (рис. 2.9, а). В concentрических обмотках катушечные группы образованы катушками с совпадающими магнитными осями: катушки с меньшим шагом располагаются внутри катушек с большим шагом (рис. 2.9, б). Их укладка более компактна и требует меньше обмоточного провода.

Однослойные и двухслойные обмотки при $q \geq 2$ можно выполнить «вразвалку». Для этого каждая катушечная группа разбивается на две подгруппы, которые «разваливаются» в противоположные стороны (рис. 2.10).

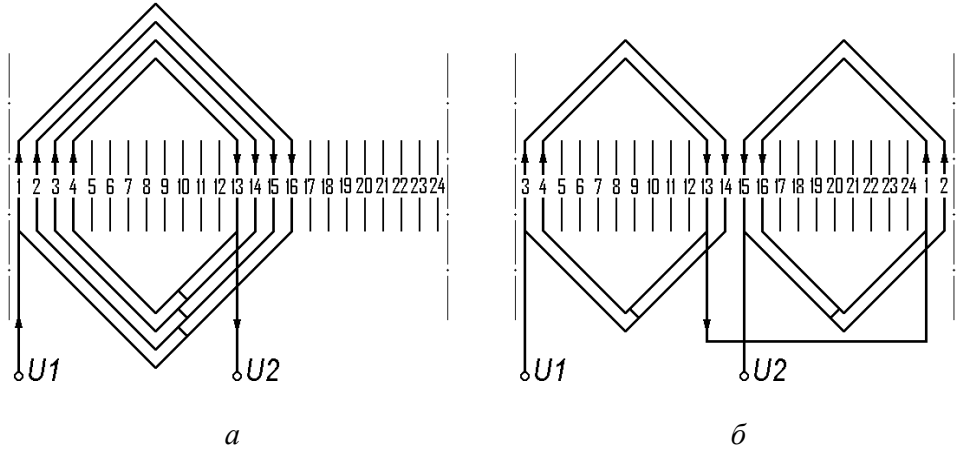


Рис. 2.10. Фаза concentрической однослойной обмотки ($q = 4$, $2p = 2$):
а – обычной; б – «вразвалку»

В такой обмотке происходит укорочение шага катушек и, как следствие, экономия проводникового материала. Оба исполнения обмотки эквивалентны в отношении создаваемого в зазоре магнитного поля, так как их катушки занимают одни и те же пазы и имеют одинаковое пространственное распределение МДС. «Вразвалку» выполняют преимущественно двухполюсные обмотки, имеющие относительно большое число пазов на полюс и фазу: $q \geq 4$.

Каждая фаза обмотки может состоять из одной или нескольких параллельных ветвей (рис. 2.11): обычно $a = 1, 2$ или 3 . Выполнение параллельных ветвей позволяет изготавливать обмотку из более тонкого провода, что технологически проще, а также сократить сортамент закупаемого обмоточного провода.

При $a = 1$ все катушечные группы в фазе соединены последовательно (рис. 2.11, а). Когда в фазе две (рис. 2.11, б) или три катушечные группы, их можно соединить также параллельно; при большем числе они могут быть соединены смешанно при условии, что последовательно соединенные части фазы содержат равное число катушечных групп.

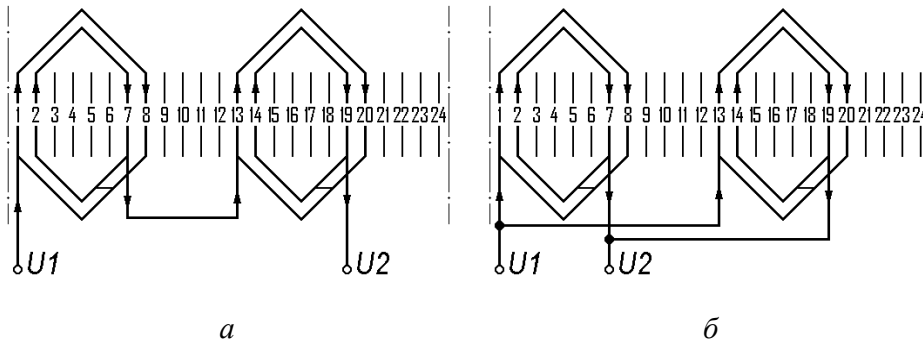


Рис. 2.11. Образование параллельных ветвей в фазе обмотки ($q = 2$, $2p = 4$):
 $a = 1$ (а); $a = 2$ (б)

Фазы трехфазной обмотки соединяются в звезду или треугольник.

2.7. Магнитодвижущая сила распределенной обмотки

Согласно существующей терминологии, магнитодвижущей силой (т.е. величиной, характеризующей намагничивающее действие тока) называется скалярная величина, определяемая как линейный интеграл напряженности магнитного поля вдоль рассматриваемого замкнутого контура и равная полному току, охватываемому этим контуром:

$$F = \oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum_{k=1}^q \pm I_k, \quad (2.3)$$

где $\mathbf{H}$ – напряженность магнитного поля вдоль контура интегрирования, $d\mathbf{l}$ – векторный элемент длины, I – сила тока, охватываемого контуром (знак «+» берется тогда, когда направление тока совпадает с направлением поступательного движения буравчика, рукоятка которого вращается в положительном направлении обхода контура).

Приведенное терминологическое определение МДС удобно для использования применительно к электромагнитным устройствам, в частности трансформаторам, в которых положение и конструктивное исполнение обмоток, имеющих обычно вид цилиндрических катушек, не оказывает существенного влияния на распределение создаваемого ими рабочего магнитного поля. Напротив, в электрических машинах магнитное поле распределенных обмоток в значительной степени зависит от их конструктивного исполнения, и для них более удобным является несколько отличающееся понимание, также соответствующее закону полного тока.

В предыдущем параграфе было указано, что обмотки электрических машин располагают обычно в пазах сердечников или на полюсах. Хотя обмотка занимает заметный объем пространства, аппроксимация (замена) ее катушек бесконечно тонкими (линейными) контурами, размещенными на примыкающей к зазору поверхности сердечника, не приводит к существенной погрешности при расчетах магнитного поля в зазоре, вращающего момента и в некоторых других случаях. Применительно к распределенным обмоткам МДС, определяемую выражением (2.3), удобнее понимать как интегральную поверхностную функцию, характеризующую распределение полного тока по поверхности, на которой расположена обмотка, т.е. как поверхностную функцию тока.

В направлении протекания тока МДС постоянна, так как пробный элементарный плоский контур, ориентированный в этом направлении не пересекается линиями тока. В большинстве случаев обмотки размещены на круговой цилиндрической поверхности, и линии тока направлены в осевом направлении. Поэтому распределение МДС достаточно определить только вдоль окружности, являющейся следом от пересечения поперечной плоскости и цилиндрической поверхности, на которой распределен ток обмотки.

Если принять, что в выражении (2.3) контуры проходят через начало координат, центр окружности и текущую рассматриваемую точку с угловой координатой α (см. рис. 2.5, *а*), то величина МДС определяется выражением (2.3) с точностью до постоянной интегрирования. Эту постоянную можно принять равной нулю, так как физически ей может соответствовать некоторый дополнительный сосредоточенный постоянный ток аксиального направления, которого в рассматриваемом случае не существует.

На рис. 2.12, *а* изображена схема фазной сосредоточенной обмотки электрической машины, изображенной на рис. 2.4, и распределение ее МДС (рис. 2.12, *б*). Обмотка состоит из двух катушечных групп, содержащих по одной катушке ($q = 1$) с шагом, равным диаметральному ($y = \tau$). Поскольку ток обмотки имеет периодическое дискретное распределение (см. рис. 2.5, *б*), то МДС будет иметь периодическое ступенчатое распределение в виде волн прямоугольной формы. Величина разрыва (скачка) МДС в рассматриваемой точке соответствует силе тока в этой точке.

При графическом изображении МДС ось абсцисс следует провести как среднюю линию замкнутой ступенчатой кривой, что соответствует равенству нулю постоянной интегрирования.

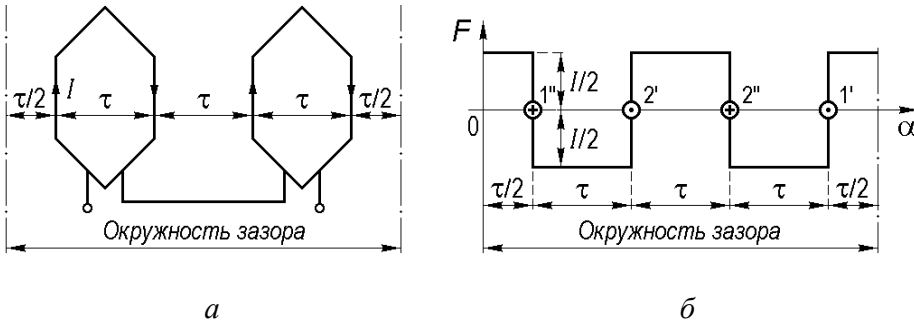


Рис. 2.12. Схема (а) сосредоточенной обмотки ($2p = 4$) и распределение (б) ее МДС

Периодическая функция МДС, изображенная на рис. 2.12, б, является четной, удовлетворяет условиям Дирихле и может быть разложена в тригонометрический ряд Фурье по косинусам. Поскольку на полупериоде она симметрична относительно его середины, то разложение будет содержать только нечетные гармоники:

$$F = F_{m1} \cos p\alpha + F_{m3} \cos 3p\alpha + F_{m5} \cos 5p\alpha + \dots + F_{mv} \cos vp\alpha, \quad (2.4)$$

$$F_{mv} = \frac{2\sqrt{2}w}{\pi vp} I, \quad (2.5)$$

где F_{mv} – амплитуда пространственной гармоники МДС порядка v , I – действующее значение тока в фазе обмотки, w – число витков в фазе, p – число пар полюсов, $\sqrt{2}$ – коэффициент пропорциональности между амплитудным I_m и действующим значением I синусоидального тока.

Первая пространственная гармоника ($v = 1$) имеет наибольшую амплитуду и является основной:

$$F_1(\alpha) = F_{m1} \cos p\alpha. \quad (2.6)$$

Угол α в выражении для основной пространственной гармоники магнитного поля $F_1(\alpha)$ соответствует геометрическому углу в обычном понимании этого термина. Аргумент $p\alpha$ основной гармоники изменяется в p раз быстрее геометрического угла α . Таким образом, пространственному углу 2π всей окружности зазора соответствует интервал изменения аргумента основной гармоники $2\pi p$ радиан. Если между некоторыми элементами обмотки геометрический угол равен α ,

то изменение аргумента основной пространственной гармоники поля между ними будет составлять $p\alpha$. В теории электрических машин угол $\alpha_3 = p\alpha$ называют «электрическим» углом, так как в машинах переменного тока он соответствует сдвигу по фазе между ЭДС, наводимыми в этих элементах. Его употребление во многих случаях более удобно. Так, например, в трехфазной обмотке магнитные оси фаз сдвинуты относительно друг друга на пространственный угол $\alpha = 2\pi / (3p)$, обратно пропорциональный числу пар полюсов p . Тот же угол в «электрических» радианах будет равным $2\pi / 3$ при любом числе полюсов.

Так как кривая распределения МДС сосредоточенной обмотки обладает осевой симметрией, ее разложение (2,5) содержит сумму только нечетных высших пространственных гармоник, амплитуда которых обратно пропорциональна их порядку v . Гармоника первого порядка, имеющая p пар полюсов, называется основной. Опыт показывает, что наиболее оптимальные характеристики электрических машин переменного тока достигаются тогда, когда индукция магнитного поля в зазоре имеет распределение вдоль угловой координаты, близкое к основной гармонике. Поэтому при проектировании якорных обмоток стремятся к тому, чтобы МДС имела соответствующее распределение.

2.8. Синтез обмоток с близким к синусоидальному пространственным распределением магнитодвижущей силы

В электрических машинах на воздушный зазор между статором и ротором, который пересекает рабочее магнитное поле, приходится основное магнитное сопротивление. Если с целью упрощения и наглядности пренебречь сопротивлением на ферромагнитных участках, то магнитную индукцию в зазоре по координате α окружности можно приближенно рассчитать по закону Ома для магнитной среды в дифференциальной форме:

$$B(\alpha) = F(\alpha)\lambda_m(\alpha), \quad (2.7)$$

где $F(\alpha)$ – МДС обмотки, $\lambda_m(\alpha)$ – удельная магнитная проводимость зазора.

Магнитную индукцию в зазоре при $\alpha = \text{const}$ можно считать неизменной: в радиальном направлении из-за относительно небольшой величины зазора, в осевом – вследствие его постоянства.

Таким образом, на характер изменения по окружности зазора индукции магнитного поля, создаваемой обмоткой (якорной или обмоткой возбуждения), можно влиять:

1) распределением МДС, зависящем от конструктивного исполнения обмотки;

2) конфигурацией зазора.

В явнополюсных машинах переменного тока обмотка возбуждения выполняется в виде расположенных на полюсах катушек. При таком исполнении в пределах полюсного деления МДС принимают постоянной: $F(\alpha) = \text{const}$. Для задания требуемого распределения индукции по окружности машины зазор между сердечниками индуктора и якоря выполняют резко неравномерным: под полюсами он намного меньше, чем в междуполюсном пространстве.

В теории неявнополюсных машин переменного тока с целью упрощения обычно внутренние поверхности сердечников статора и ротора принимают гладкими (зубчатость учитывается отдельно), а зазор неизменным. Поэтому магнитная проводимость зазора $\lambda_m(\alpha) = \text{const}$, и в соответствии с выражением (2.7) закон изменения индукции в неявнополюсных машинах определяется распределением МДС обмотки. Синусоидального распределения МДС добиваются снижением амплитуды высших пространственных гармоник с помощью следующих конструктивных технических приемов:

1) выполнение распределенных обмоток с $q \neq 1$, когда катушечная группа состоит из нескольких катушек;

2) укорочение шага катушек в двухслойных обмотках, приводящее к сдвигу МДС верхнего и нижнего слоя относительно друг друга;

3) выполнение обмотки трехфазной.

В трехфазных обмотках высшие пространственные гармоники, кратные трем, совпадают по распределению в пространстве, так как на дуге $2\pi/3$, соответствующей геометрическому угловому сдвигу магнитных осей фаз, укладывается целое число периодов таких гармоник. При обтекании обмотки симметричным трехфазным током происходит взаимная компенсация МДС фаз этих пространственных гармоник. Однако в несимметричных режимах трехфазных машин, а также в двухфазных и однофазных машинах влияние пространственных гармоник, кратных трем, весьма существенно.

2.8.1. Влияние на магнитодвижущую силу распределения катушечной группы по пазам

Как указывалось выше, катушечная группа фазы обмотки состоит из q катушек, лежащих в соседних пазах. Рассмотрим фазу однослойной

распределенной равносекционной обмотки (рис. 2.13, а) с диаметральной шагом $y = \tau$, числом полюсов $2p = 2$ и $q = 3$.

В этой обмотке отдельные катушки сдвинуты относительно друг друга в пространстве на пазовое деление, которому соответствует сдвиг магнитных осей катушек на пазовый электрический угол $\alpha_z = p360^\circ / z$ (z – число пазов). Вследствие этого графики распределения МДС отдельных катушек (рис. 2.13, б, в, г) имеют такой же относительный сдвиг. Как видно из рис. 2.13, д результирующая МДС имеет ступенчатую форму, более близкую к синусоиде, чем прямоугольная форма графиков МДС отдельных катушек.

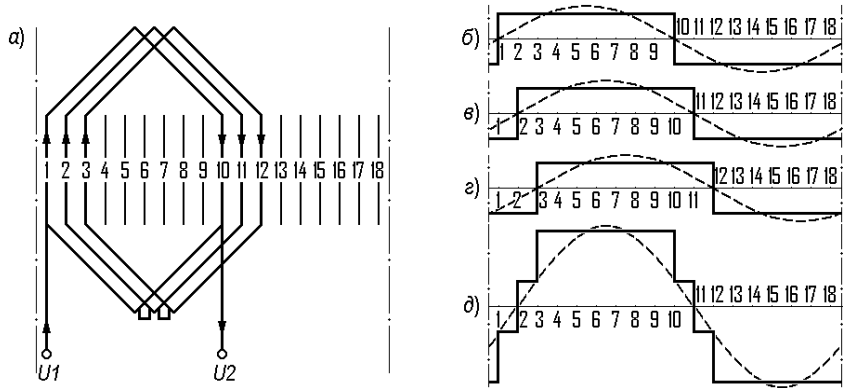


Рис. 2.13. Схема равносекционной фазной обмотки (а), распределение МДС отдельных катушек (б, в, г) и результирующая МДС (д)

Отношение МДС распределенной обмотки, состоящей из одинаковых катушечных групп, к величине МДС сосредоточенной обмотки, у которой катушечная группа состоит из одной катушки с тем же суммарным количеством витков, называется коэффициентом распределения.

$$k_p = F_{\text{рас}} / F_{\text{соср}}. \quad (2.8)$$

Получим формулу для расчета этого коэффициента для основной пространственной гармоники (2.6) при целом q . В однослойной обмотке с $2p = 2$ число пазов на полюс и фазу q – всегда целое число, так как фаза состоит из одной катушечной группы; при $2p > 2$ оно может быть и дробным.

Из курса математики известно, что синусоидальная функция (2.6), описывающая пространственное распределение МДС, при операциях сложения может быть представлена вектором $\mathbf{F}$ с амплитудой F_{m1} . При целом q в угле 2π всегда содержится целое число пазовых

электрических углов α_z , поэтому начала и концы векторов МДС катушек $\mathbf{F}_1$, $\mathbf{F}_2$ и $\mathbf{F}_3$ всегда лежат на окружности, имеющей некоторый радиус R (рис. 2.14, а).

Длина результирующего вектора $\mathbf{F}_{\text{рас}} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}_3$ на основании рисунка может быть рассчитана из геометрических соотношений в треугольнике с центральным углом $q\alpha_z$, образованном этим вектором и двумя радиусами R :

$$F_{\text{рас}} = 2R\sin(q\alpha_z / 2).$$

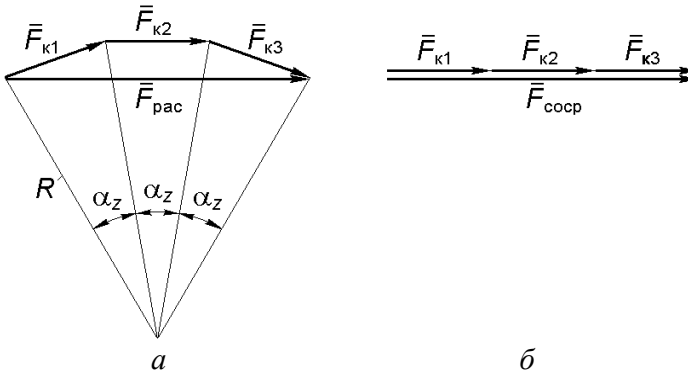


Рис. 2.14. Суммарная МДС катушек распределенной (а) и сосредоточенной (б) обмоток

В случае сосредоточенной обмотки ($q = 1$) с тем же числом витков, что и у распределенной обмотки вектор $\mathbf{F}_{\text{соср}} = q\mathbf{F}$ превышает длину вектора одной катушки в q раз (рис. 2.14, б). Длину вектора МДС F одной катушки можно рассчитать из треугольника с центральным углом α_z , образованном вектором $\mathbf{F}_k$ МДС этой катушки и двумя радиусами R :

$$F = 2R\sin(\alpha_z / 2).$$

МДС всей сосредоточенной обмотки в q раз больше:

$$F_{\text{соср}} = q2R\sin(\alpha_z / 2).$$

Тогда на основании формулы (2.8) получим выражение для расчета коэффициента распределения:

$$k_p = \frac{\sin(q\alpha_z / 2)}{q\sin(\alpha_z / 2)}. \quad (2.9)$$

Пазовый электрический угол для высших пространственных гармоник МДС порядка ν увеличивается в ν раз, и коэффициент распределения для этих гармоник рассчитывается по формуле:

$$k_{p\nu} = \frac{\sin(\nu q \alpha_z / 2)}{q \sin(\nu \alpha_z / 2)}. \quad (2.10)$$

Геометрическая сумма МДС распределенных по пазам катушек меньше их арифметической суммы, которая имела бы место, если бы эти катушки лежали в одном пазу, вследствие чего всегда коэффициент $k_{p\nu} < 1$. Поэтому распределение катушек катушечной группы приводит к ослаблению всех пространственных гармоник МДС, однако, в различной степени. Например, в трехфазных обмотках с фазной зоной $q\alpha_z = \pi / 3$ у основной пространственной гармоники $k_{p1} = 0,955\text{--}0,966$, а у высших пространственных гармоник может быть в несколько раз меньше. Это означает, что их относительный вес значительно снижается, и результирующая кривая пространственного распределения МДС обмотки по окружности зазора становится более близкой к синусоиде.

В concentрической обмотке (см. рис. 2.10, а) катушки катушечной группы расположены одна внутри другой, вследствие чего их магнитные оси совпадают, и имеют различный шаг, среднее значение которого соответствует диаметральному: $y_{cp} = \tau$. При $q \geq 2$ эту обмотку можно выполнить «вразвалку» (рис. 2.10, б). При подобном изменении конструктивного исполнения катушки обмоток занимают одни и те же пазы, поэтому имеют одинаковое распределение МДС, и, как следствие, одинаковый коэффициент распределения.

2.8.2. Влияние на магнитодвижущую силу двухслойной обмотки укорочения шага

В двухслойной обмотке имеется дополнительная возможность уменьшения МДС высших пространственных гармоник за счет укорочения шага обмотки. Шаг двухслойной обмотки называют укороченным, если его величина y меньше полюсного деления τ . Отношение шага обмотки к полюсному делению называют относительным шагом:

$$\beta = y / \tau. \quad (2.11)$$

На рис. 2.15 приведены схемы обмоток с диаметральной (а) и укороченным (б) шагом, диаграммы их токов (в, г) (нижний слой изображен ближе к оси абсцисс) и МДС (д, е).

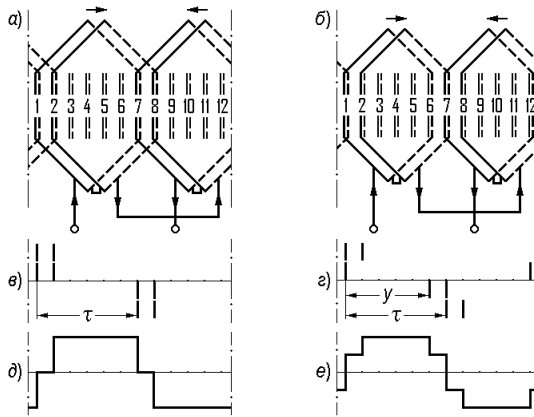


Рис. 2.15. Влияние укорочения шага на МДС двухслойной обмотки:

- а, б – схема фазной обмотки с диаметральной и укороченным шагом;
в, г – диаграмма токов обмотки с диаметральной и укороченным шагом;
д, е – распределение МДС обмотки с диаметральной и укороченным шагом

Когда двухслойная обмотка имеет диаметральный шаг $y = \tau$, пространственное распределение токов в ее верхнем и нижнем слоях одинаково. При укорочении шага ($y < \tau$) нижний токовый слой смещается относительно верхнего на величину $\Delta y = \tau - y$. Это приводит к лучшему приближению к синусоиде формы ступенчатой кривой результирующей МДС, которая равна арифметической сумме МДС отдельных слоев.

Математически это означает, что при суммировании МДС отдельных слоев их высшие пространственные гармоники разложения в ряд (2.4) в значительной степени взаимно компенсируются. Одновременно также несколько уменьшается результирующая МДС основной пространственной гармоники: $F_{y1} < F_{\tau 1}$.

Для двухслойной обмотки относительное уменьшение ее МДС F_{yv} (по каждой пространственной гармонике порядка v) при переходе от диаметрального шага τ к укороченному y называется коэффициентом укорочения:

$$k_{yv} = F_{yv} / F_{\tau v}. \quad (2.12)$$

Пространственному сдвигу на Δy токовых слоев двухслойной обмотки соответствует электрический угол: $\Delta \alpha_y = (\Delta y / \tau) \pi = (1 - \beta) \pi$

(относительный шаг β рассчитывается по формуле (2.11)). На этот угол отличаются аргументы отдельных пространственных гармоник МДС верхнего и нижнего слоев при разложении в ряд (2.4), вследствие чего гармоники одинакового порядка суммируются геометрически, а не арифметически, как при диаметральном шаге. Поэтому коэффициент укорочения $k_y < 1$.

Выражения для расчета k_y можно получить как частный случай из формулы коэффициента распределения, так как математически суммирование МДС токовых слоев двухслойной обмотки аналогично суммированию МДС катушек распределенной обмотки, когда $q = 2$.

$$k_{yv} = \frac{\sin v 2\Delta\alpha_y / 2}{2 \sin v \Delta\alpha_y / 2} = \frac{2 \sin v \Delta\alpha_y / 2 \cos v \Delta\alpha_y / 2}{2 \sin v \Delta\alpha_y / 2}$$

После тригонометрических преобразований получим:

$$k_{yv} = \cos v(1 - \beta)\pi / 2 = \sin v\beta\pi / 2. \quad (2.13)$$

Обычно выбирают такое относительное укорочение, чтобы максимально ослабить наиболее значимые 5 и 7-ю высшие пространственные гармоники: $\beta \approx 0,8$.

У однослойных обмоток $k_y = 1$, так как МДС фазы не зависит от их конструктивного исполнения. Например, при прочих одинаковых параметрах у равносекционной или концентрической однослойной обмотки в обычном исполнении и при выполнении «вразвалку», когда она будет иметь укороченный шаг, МДС будет одинаковой. Это следует из того, что для каждого из конструктивных исполнений при обходе по одному и тому же контуру будет одинаков полный ток, охватываемый этим контуром, так как распределение токов по пазам сохраняется неизменным.

2.8.3. Обмоточный коэффициент

Обмоточный коэффициент является эквивалентным параметром, учитывающим результирующее влияние распределения обмотки и укорочения шага (для двухслойной обмотки) на МДС основной и высших пространственных гармоник магнитного поля в сравнении с сосредоточенной обмоткой, имеющей диаметральный шаг. Поскольку каждый из названных конструктивных приемов действует независимо друг от друга на амплитуды пространственных гармоник магнитного

поля, то значение обмоточного коэффициента равно произведению коэффициентов укорочения и распределения:

$$k_{об} = k_y k_p.$$

При расчете МДС обмоточный коэффициент вводится как дополнительный множитель.

2.9. Скос пазов

Распределение по пазам и укорочение шага не оказывают существенного влияния на МДС пространственных гармоник зубцового порядка $v_z = kz / p \pm 1$ ($k = 1, 2, 3, \dots$). Эти гармоники получили такое название из-за того, что при $k = 1$ их порядок близок к числу зубцов на пару полюсов: $v_z \approx z / p$. В трехфазных обмотках из гармоник порядка v_z , как указывалось выше, исключаются, кратные трем. Это обусловлено дискретностью распределения (по пазам) обмотки по окружности зазора. Вследствие этого коэффициенты распределения и укорочения для гармоник зубцового порядка могут оказаться близкими или равными единице. Индукционное взаимодействие обмоток статора и ротора на этих гармониках приводит к возникновению асинхронных паразитных моментов, оказывающих негативное влияние на работу асинхронных машин.

При определенном соотношении числа пазов на статоре и роторе в асинхронных и синхронных машинах возможно возникновение паразитных моментов. Для их ослабления в машинах преимущественно малой и средней мощности на роторе или на статоре выполняют скос пазов, а вместе с ними и скос проводников обмотки, уложенных в этих пазах. Наиболее удобно выполнять скос в литых обмотках короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей (рис. 2.16).

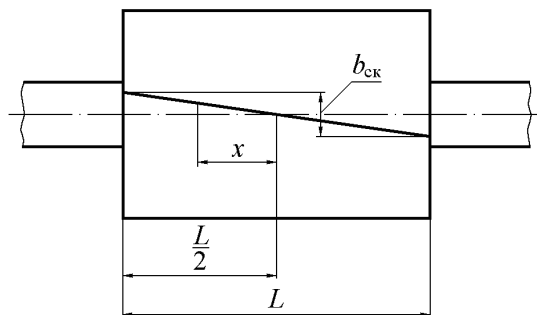


Рис. 2.16. Скос пазов на роторе

Величина скоса характеризуется дугой окружности между образующими цилиндрической поверхности сердечника, проходящими через вход и выход паза, равной $b_{\text{ск}}$ в единицах длины и $\gamma_{\text{ск}}$ в электрических угловых единицах. Эти величины связаны очевидным соотношением:

$$\gamma_{\text{ск}} = \pi b_{\text{ск}} / \tau.$$

Рассмотрим влияние скоса пазов на роторе. Когда величина $b_{\text{ск}}$ равна периоду некоторой гармоники магнитного поля статора, то в осевом направлении на одной и другой половине длины активной части обмотки ротора поле этой гармоники будет иметь противоположное направление, и в целом не оказывает на нее индукционного действия. На других гармониках, имеющих период, отличающийся от рассмотренного, индукционное действие уменьшается. Обычно величину скоса на роторе выполняют равным пазовому делению статора.

Исследуем влияние скоса пазов на произвольную пространственную гармонику порядка ν МДС обмотки. При отсутствии скоса МДС обмотки в осевом направлении не изменяется, а по окружности сердечника гармоника описывается соответствующим членом разложения (2.4).

При скосе пазов элементы длины лежащего в пазу проводника смещены относительно друг друга по окружности сердечника. Если длине L сердечника соответствует угол $\gamma_{\text{ск}}$, то на расстоянии x от центра сердечника он составит $x\gamma_{\text{ск}}/L$ электрических угловых единиц (см. рис. 2.16). На соответствующую величину изменится аргумент косинусоидальной функции, описывающей МДС обмотки, уложенной в скошенных пазах:

$$F_{\text{ск}\nu} = F_{m\nu} \cos \nu(p\alpha + \gamma_{\text{ск}}x / L).$$

Как видно из этого выражения, скос не влияет на амплитуду МДС, однако ее значение вдоль образующей цилиндрической поверхности (в осевом направлении по координате x) не остается постоянной, как это имеет место при отсутствии скоса. Поэтому среднее значение МДС $F_{\text{ск}}$ скошенной обмотки в сравнении с нескошенной на длине сердечника вдоль этой образующей уменьшается. Его можно вычислить известным из курса высшей математики способом через определенный интеграл:

$$F_{\text{ск}} = \frac{1}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} F_m \cos v(p\alpha + \gamma_{\text{ск}} \frac{x}{L}) dx = \frac{1}{v\gamma_{\text{ск}}} F_m [\sin v(p\alpha + \frac{\gamma_{\text{ск}}}{2}) - \sin v(p\alpha - \frac{\gamma_{\text{ск}}}{2})]$$

Применяя известные тригонометрические преобразования, получим:

$$F_{\text{ск}} = \left(\frac{\sin(v\gamma_{\text{ск}}/2)}{v\gamma_{\text{ск}}/2} \right) F_m \cos v p \alpha.$$

Дополнительный множитель, характеризующий относительное уменьшение вдоль образующей цилиндрической поверхности среднего значения амплитуды синусоидально распределенной МДС скошенной обмотки, называется коэффициентом скоса:

$$k_{\text{ск}v} = \frac{\sin v\gamma_{\text{ск}}/2}{v\gamma_{\text{ск}}/2}. \quad (2.14)$$

При угле $\gamma_{\text{ск}} > 0$ коэффициент $k_{\text{ск}} < 1$. Уменьшение среднего значения МДС на длине сердечника в осевом направлении приводит к соответствующему уменьшению среднего значения магнитной индукции, и, следовательно, индукционного взаимодействия скошенной и нескошенной обмотки (прежде всего на высших пространственных гармониках магнитного поля зубцового порядка).

При скошенных пазах уменьшаются продольные пульсации магнитного потока при вращении ротора, что снижает вызываемые ими шумы при работе, а также соответствующие составляющие потерь мощности.

Скос пазов имеет недостатки: увеличивается длина стержней и расход проводникового материала, возрастает индуктивное сопротивление рассеяния обмотки, приводящее к снижению максимального и пускового момента. В то же время увеличение сопротивления цепи ротора из-за удлинения стержней несколько увеличивает пусковой момент.

Недостатком скоса пазов является также то, что он приводит к неравномерному распределению магнитной индукции в осевом направлении при $\alpha = \text{const}$ (см. рис. 2.5), что следует из результатов суммирования МДС нескошенной и скошенной обмоток статора и ротора:

$$F_{\text{рез}} = F + F_{\text{ск}} = F_m \cos p \alpha \sin \omega t + F_{\text{мск}} \cos(p\alpha + \gamma x / L) \sin(\omega t + \theta_{12}),$$

где θ_{12} – сдвиг по фазе между МДС скошенной и нескошенной обмоток.

Анализ этого выражения при предположении о равенстве амплитуд обмоток ($F_m = F_{\text{мск}}$) показывает: с той стороны сердечника, где направление вращения совпадает с направлением скоса, результирующая МДС и, соответственно, возбуждаемая ею индукция уменьшаются, а с противоположной – увеличиваются. Увеличение индукции приводит к насыщению этой части магнитной цепи асинхронного двигателя, что влечет неблагоприятные последствия: повышение потерь в сердечнике, увеличение намагничивающего тока и др.

Несмотря на то, что укорочение шага обмотки, распределение ее по пазам и скос приводят к некоторому уменьшению МДС основной пространственной гармоники, их широко применяют на практике. Это позволяет значительно снизить негативное влияние высших пространственных гармоник поля на характеристики электрических машин переменного тока.

2.10. Образование вращающегося магнитного поля с помощью трехфазной обмотки

В асинхронных и синхронных машинах обмотка якоря (чаще расположенная на статоре) возбуждает круговое вращающееся магнитное поле. Для его создания требуются следующие условия:

1. Обмотка должна состоять из m частей (фаз). Обычно $m = 3$.
2. Магнитные оси фаз трехфазной обмотки, должны быть повернуты относительно друг друга по окружности зазора на «электрический» угол $2\pi / 3$. Напомним, что в теории асинхронных и синхронных машин «электрическими» называют угловые единицы, отсчитываемые в долях периода магнитного поля: один период равен электрическому углу 2π .
3. Фазы обмотки должны быть запитаны симметричным трехфазным током.

При сформулированных условиях МДС отдельных фаз обмотки описываются следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} f_u &= F_m \cos p\alpha \sin \omega t, \\ f_v &= F_m \cos(p\alpha - 2\pi/3) \sin(\omega t - 2\pi/3), \\ f_w &= F_m \cos(p\alpha + 2\pi/3) \sin(\omega t + 2\pi/3). \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

где α – текущая угловая координата, в которой рассматривается поле, t – время.

Периодическое пространственное распределение колебаний какой-либо физической величины обычно называют волновым. Если пространственное положение максимумов колебательного процесса остается неизменным во времени, волна называется пульсирующей (стоячей). Таковыми в асинхронной машине являются волны (2.1) МДС отдельных фаз. Их наложение при выполнении условий (1–3) приводит к возникновению в зазоре между статором и ротором, так называемой, круговой вращающейся волны МДС (и возбуждаемого ею магнитного поля), которая описывается выражением:

$$F(t, \alpha) = F_u + F_v + F_w = (m / 2) F_m \cos(\omega_1 t - p\alpha), \quad (2.16)$$

где $\omega_1 = 2\pi f_1$ – угловая частота тока обмотки.

Не следует понимать, «вращение» в механическом смысле, будто волна МДС или поля действительно вращается, хотя и такое понимание при $p \geq 1$ не приводит к ошибкам при математическом описании. Этот термин связан с интерпретацией выражения (2.16), описывающего распределение в пространстве и во времени МДС обмотки или аналогичного выражения для поля магнитной индукции в зазоре.

Определим частоту этого вращения. Предположим, что вместе с волной с равной скоростью движется некоторая материальная точка. В месте нахождения этой точки фаза волнового процесса будет оставаться неизменной: $\omega_1 t - p\alpha = \text{const}$. Взяв первую производную по времени от правой и левой части этого выражения, получим:

$$d\alpha / dt = \omega_1 / p = \Omega_1. \quad (2.17)$$

Величина Ω_1 , рад/с, называется угловой частотой вращения волны. Она связана с частотой вращения n_1 (обороты в секунду) очевидным соотношением:

$$\Omega_1 = 2\pi n_1. \quad (2.18)$$

Вращающаяся волна МДС вызывает в зазоре между статором и ротором вращающееся магнитное поле, частоту вращения n_1 которого называют «синхронной». Из формул (2.17), (2.18) следует, что она прямо пропорциональна частоте тока в обмотке и обратно пропорциональна числу пар полюсов:

$$n_1 = f_1 / p. \quad (2.19)$$

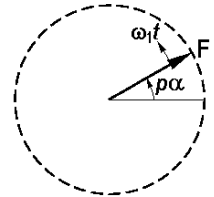
Для промышленной частоты $f = 50$ Гц частота вращения поля при небольших числах полюсов представлена в табл. 2.1.

Таблица 2.1

$2p$	2	4	6	8	10	12
n_1 , об/мин	3000	1500	1000	750	600	500

Круговое и эллиптическое вращение. Если МДС $F(t, \alpha)$ изобразить вектором (см. п. 2.7) на плоскости, то в соответствии с формулой (2.16) его конец за один период изменения тока ($\omega_1 t = 2\pi$) при описанных выше условиях 1–3 опишет окружность (рис. 2.17), так как при вращении вектор МДС не меняется по величине. Такое вращение волны МДС основной гармоники называется круговым.

Рис. 2.17. Представление кругового вращения волны МДС вращающимся вектором



Если условия 1–3 не выполняются, то при вращении вектор МДС будет изменяться по величине таким образом, что его конец опишет эллипс. Такое вращение называется эллиптическим.

Вращение волн МДС высших пространственных гармоник. Как отмечено в начале п. 2.8, МДС трехфазной обмотки, обтекаемой симметричным трехфазным током, не содержит высших пространственных гармоник, кратных трем, и поэтому вращающиеся волны этого порядка отсутствуют.

Высшие пространственные гармоники МДС порядка v имеют νp пар полюсов. В соответствии с формулой (2.19) частота их вращения будет в ν раз меньше:

$$n_1 = f_1 / (\nu p).$$

Эти пространственные гармоники можно разбить на 2 группы с порядками: 1) $\nu = 6n + 1$, 2) $\nu = 6n - 1$ (n – произвольное целое число). Можно показать, что гармоники первой группы вращаются в ту же сторону, что и основная гармоника ($\nu = 1$), а второй группы – в обратную сторону. Такое вращение объясняется прямым и обратным чередованием магнитных осей фаз обмотки для гармоник этих групп.

ГЛАВА 3. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Асинхронными называют электрические машины переменного тока, у которых частота вращения ротора (в двигательном режиме она – меньше) отличается от частоты вращения магнитного поля статора.

3.1. Общие сведения

Впервые принцип асинхронного вращения в 1824 г. был открыт французским ученым Д. Ф. Араго: вращение медной пластины над магнитной стрелкой приводило в движение и саму стрелку. Он не смог удовлетворительно объяснить его, и назвал обнаруженное явление «магнетизмом вращения». Это было сделано позднее Фарадеем, который повторил этот опыт на более совершенной установке с вращающимся магнитом.

В современных асинхронных машинах (АМ) вращающееся магнитное поле создается электромагнитным путем, с помощью неподвижной системы фазных обмоток. Открытие этого явления связано с именами ряда ученых. Наибольшую известность получили теоретические и экспериментальные исследования, которые провели независимо друг от друга итальянец Г. Феррарис и серб Н. Тесла в 1888 г. В предложенных двигателях вращающееся магнитное поле было получено с помощью системы катушек, расположенных перпендикулярно друг к другу и питаемых двухфазным током со сдвигом по фазе на $\pi/2$. В двигателе Феррариса ротор был выполнен в виде медного цилиндра, в двигателе Тесла он имел обмотку в виде двух замкнутых катушек, расположенных под прямым углом друг к другу. Вследствие недостатков в конструкции предложенные двигатели обладали неудовлетворительными характеристиками и не получили распространения.

Наиболее удачную конструкцию асинхронного двигателя (АД) с ротором типа «белчье колесо» изобрел в 1889 г. наш соотечественник М. О. Доливо-Добровольский, работавший в Германии в электротехнической компании Т. Эдисона (с 1887 г. фирма AEG). В его конструкции вращающееся магнитное поле создавалось трехфазной обмоткой, уложенной в пазах по всей окружности статора. В 1890 г. им же предложен фазный ротор с контактными кольцами и пусковыми устройствами. Разработанные М. О. Доливо-Добровольским конструкции асинхронных двигателей получили широкое распространение и применяются до сегодняшнего времени. Работая в Германии, он не порывал связей с Россией и поддерживал тесные отношения с русскими электротехниками.

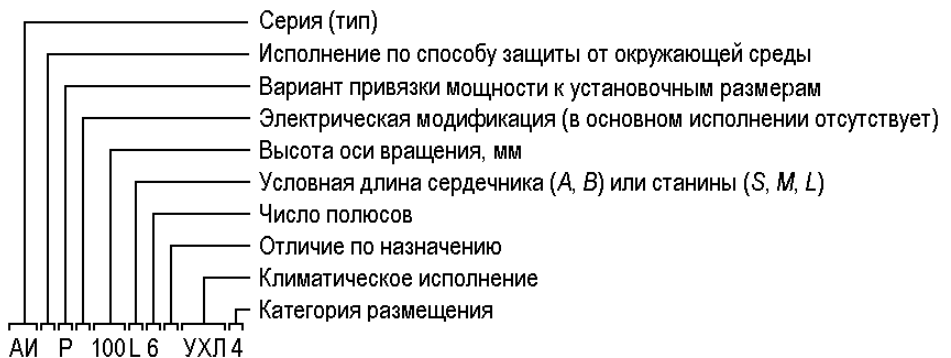
Асинхронные машины могут использоваться как двигатели, генераторы и преобразователи электрической энергии (фазорегуляторы, ин-

дукционные регуляторы, фазорасщепители). Наиболее широкое применение они получили как двигатели в электроприводах различных механизмов. Асинхронные двигатели составляют, примерно, по количеству – 90% парка электродвигателей, а по мощности – 55%. На их долю приходится до половины всей потребляемой электроэнергии и более 90% электроэнергии, расходуемой на питание электродвигателей. Они конструктивно просты, дешевы и надежны, обладают высоким КПД.

В системах автоматического управления используют различные конструкции одно- и двухфазных асинхронных двигателей, а также асинхронные тахогенераторы.

Асинхронные двигатели общего назначения мощностью от 0,06 до 400 кВт на напряжение до 1000 В выпускаются сериями, включающими основное и специализированные исполнения по условиям окружающей среды: тропическое, химически стойкое, для холодного климата, для сельского хозяйства. Основное исполнение имеет различные модификации: с короткозамкнутым ротором, с фазным ротором, с повышенным пусковым моментом, с повышенным скольжением, частотно-регулируемые, с электромагнитным тормозом, однофазные и др.

Пример расшифровки буквенно-цифрового обозначения АД типа АИР100L6УХЛ4:



Корпус 3 (станина) статора выполняется из чугуна, стали или алюминиевого сплава. Внутри него устанавливается статор с обмоткой, а по торцам – подшипниковые щиты 4 и 5, несущие ротор. Выводы обмотки статора размещаются в коробке выводов 6.

3.2. Устройство асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель состоит из неподвижного статора 1 и расположенного соосно внутри него с зазором вращающегося ротора 2 (рис. 3.1).

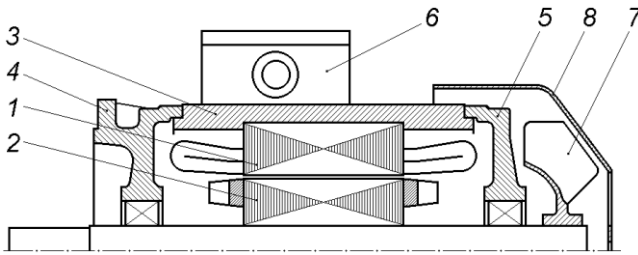


Рис. 3.1. Устройство АД закрытого исполнения:
1 – статор; 2 – ротор; 3 – корпус; 4, 5 – подшипниковые щиты;
6 – коробка выводов; 7 – вентилятор; 8 – кожух

В двигателях закрытого исполнения для интенсификации теплоотвода поверхность корпуса выполняется с ребрами (см. рис. 2.2) и обдувается с помощью вентилятора 7 и кожуха 8.

Сердечники статора и ротора обычно имеют цилиндрическую форму. Их собирают из штампованных в форме кольца или его части тонких листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм (рис. 3.2), изолированных друг от друга с целью уменьшения вихревых токов и связанных с ними потерь.

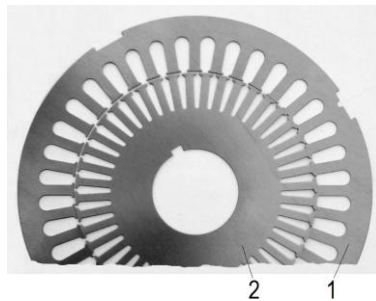


Рис. 3.2. Штампованные листы
сердечников статора (1)
и ротора (2)

На внутренней части сердечника статора равномерно расположены продольные пазы для укладки обмотки. Фазы трехфазной обмотки могут соединяться в звезду (Y) или треугольник (Δ). На табличке двигателя указывается способ их соединения в зависимости от линейного напряжения $U_{\text{ном}}$ источника питания, например, « Δ / Y» и «220/ 380 В». Это означает, что при $U_{\text{ном}} = 220$ В трехфазная обмотка статора двигателя должна соединяться по схеме «треугольник», а при $U_{\text{ном}} = 380$ В – по схеме «звезда». При обеих схемах соединения фазное напряжение получается одинаковым: $U_{\text{ф}} = 220$ В.

Асинхронные двигатели изготавливаются с короткозамкнутым и фазным ротором. Название определяется типом его обмотки.

Короткозамкнутый ротор (рис. 3.3, *а*) содержит сердечник (рис. 3.3, *б*) с обмоткой, напоминающей «беличье колесо» (рис. 3.3, *в*). В крупных АД она выполняется неизолированными медными стержнями, концы которых путем пайки или сварки электрически соединяют с кольцами. В двигателях малой и средней мощности обмотку изготавливают из алюминиевого сплава путем заливки в пазы сердечника. Одновременно отливают и короткозамыкающие кольца с вентиляционными лопатками (см. рис. 3.3, *а, в*).

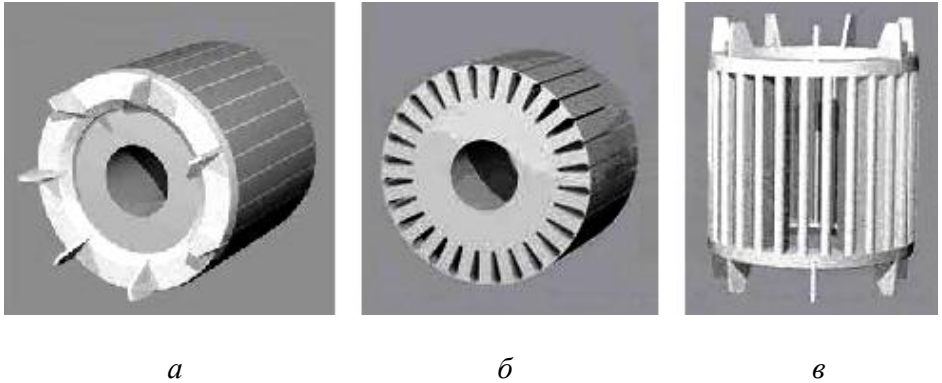


Рис. 3.3. Короткозамкнутый ротор АД (*а*), его сердечник (*б*) и литая обмотка (*в*)

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором получили наиболее широкое распространение ввиду высоких технико-экономических показателей: конструктивной простоты, надежности, низкой стоимости, высокого КПД и удовлетворительных пусковых свойств. Использование в качестве источника питания преобразователя частоты дает возможность широкого регулирования частоты вращения и ограничения пусковых токов.

Обмотка 2 фазного ротора (рис. 3.4) конструктивно сходна с обмоткой статора 1, имеет одинаковое с ней число полюсов и фаз; концы последних обычно соединяют в звезду. Выводы 4 этих фаз присоединены к расположенным на валу трем контактными кольцам 5, которые изолированы друг от друга и от вала ротора. К кольцам прилегают щетки, образуя скользящий контакт. С помощью узла контактных колец к цепи фазного ротора могут подключаться различные внешние устройства, например, реостаты или полупроводниковые преобразователи. Это позволяет ограничивать пусковой ток, увеличивать пусковой момент, регулировать в достаточно широких пределах частоту вращения. В то же время использование реостатов и других устройств усложняет схему и увеличивает стоимость электропривода.

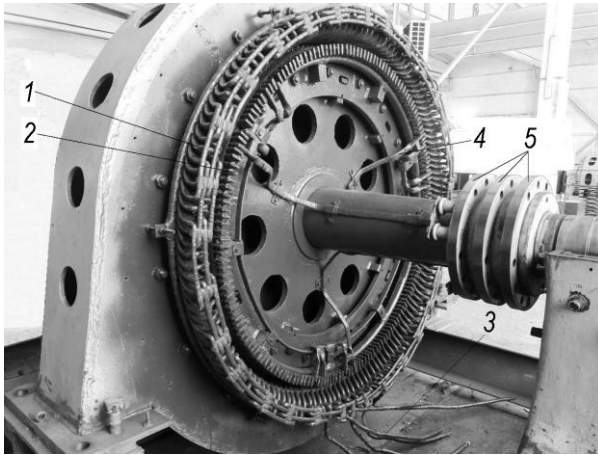


Рис. 3.4. АД с фазным ротором АКН 16-26-20:

1 – обмотка статора; 2 – обмотка ротора; 3 – выводы фаз обмотки статора;
4 – выводы фаз обмотки ротора; 5 – контактные кольца

Схемы АД приведены на рис. 3.5. Выводы фазных обмоток статора обозначаются: начала $U1, V1, W1$; концы – $U2, V2, W2$; ротора – K, L, M .

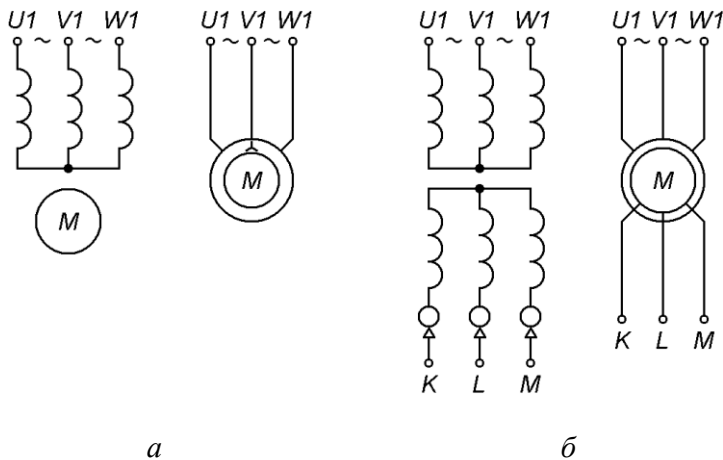


Рис. 3.5. Развернутая и упрощенная схемы АД:

a – с короткозамкнутым ротором; *б* – с фазным ротором

Двигатели с фазным ротором широко применяются в нерегулируемых приводах с тяжелыми условиями пуска, например: подъемно-транспортных механизмов, газотурбинных агрегатов, нагнетателей, компрессоров, гидравлических насосов и других механизмов. Также их используют в регулируемых приводах с полупроводниковыми преобразователями (асинхронные вентильные каскады).

В сравнении с короткозамкнутыми двигателями с фазным ротором имеют большие массу и габариты, меньшие значения КПД и коэффициента мощности, требуют периодического обслуживания.

3.3. Принцип действия

Принцип действия АД основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с токами, которые индуцируются этим полем в проводниках обмотки ротора. Таким образом, асинхронные машины, как и трансформаторы, относятся к индукционному типу.

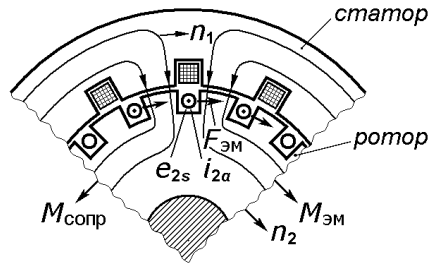


Рис. 3.6. Принцип действия асинхронного двигателя

При подключении трехфазного асинхронного двигателя к сети под действием приложенного напряжения по обмотке статора протекает трехфазный ток, создающий первичное вращающееся вокруг ротора $2p$ -полюсное магнитное поле (рис. 3.6). При пересечении линиями этого поля проводников обмотки ротора индуцируется ЭДС e_{2s} , которая вызывает в замкнутой обмотке ротора ток i_2 . Обтекаемая током обмотка ротора также создает аналогичное вращающееся магнитное поле, так что в результате наложения в двигателе существует результирующее вращающееся вокруг ротора $2p$ -полюсное магнитное поле.

Обмотка ротора обладает активным сопротивлением r_2 , и поэтому ток в ней всегда имеет совпадающую по фазе с индуцируемой ЭДС активную составляющую i_{2a} . Направление ЭДС и тока можно определить по известному «правилу правой руки».

На проводники обмотки ротора, по которым протекает активная составляющая тока i_{2a} , со стороны магнитного поля действуют электромагнитные силы $F_{эм}$, направленные в сторону вращения поля (направление действия сил можно определить, используя известное «правило левой руки»). Они создают вращающий электромагнитный момент $M_{эм}$, под действием которого ротор начинает разворачиваться в сторону вращения поля и ускоряется до тех пор, пока вращающий момент не станет равным моменту сопротивления на валу двигателя: $M_{эм} = M_{сопр}$.

В установившемся двигательном режиме частота вращения ротора всегда меньше частоты вращения поля ($n_2 < n_1$), из-за чего двигатель называют «асинхронным».

Разность частот вращения поля и ротора называется частотой скольжения:

$$n_s = n_1 - n_2. \quad (3.1)$$

Значение n_s , выраженное в относительных единицах, называют «скольжением»:

$$s = n_s / n_1 = (n_1 - n_2) / n_1. \quad (3.2)$$

Частота вращения ротора, выраженная через скольжение из уравнения (3.2), может быть рассчитана по формуле:

$$n_2 = n_1(1 - s). \quad (3.3)$$

На табличке двигателя частота n_2 вращения ротора указывается в оборотах в минуту. В номинальном режиме работы АД скольжение обычно не превышает нескольких процентов. Это дает возможность при известной частоте питающей сети определить частоту вращения поля как ближайшую к частоте вращения ротора.

3.4. Математическое описание асинхронной машины

3.4.1. Принятые допущения

Математическая модель любого устройства создается для возможности расчета его режимов, характеристик, параметров или с целью управления. Выбор модели зависит от ее назначения, требуемой точности расчета и др. В общем курсе она необходима для расчета основных режимов, характеристик и понимания основных свойств асинхронной машины. В целом, принцип ее построения аналогичен трансформатору.

Примем следующие упрощения для конструкции машины и физических свойств материалов:

1) асинхронная машина конструктивно симметрична (сердечник, обмотки и т.д.);

2) при расчете основного поля воздушный зазор по окружности сердечника принимается постоянным, т.е. не учитывается зубчатость сердечников статора и ротора; их поверхность, обращенная к зазору, предполагается гладкой;

3) сталь сердечников не насыщена, магнитная среда линейна: $\mu = \text{const}$.

При сделанных допущениях в неподвижной системе координат (статора) переменное магнитное поле во всех областях пространства, включая зазор, будет содержать только одну временную гармонику основной частоты. Это означает, что поле ротора вращается в пространстве с той же частотой, что и возбуждающее поле.

3.4.2. Разложение реального магнитного поля на составляющие

Теория асинхронной машины строится на концепции «вращающегося магнитного поля» взаимной индукции, которое создается совокупным действием вращающихся волн МДС обмоток статора и ротора. Первую пространственную гармонику этого поля относят к основному полю. Часть магнитного поля каждой из обмоток, сцепленную только со «своими» витками относят к полю рассеяния.

Каждая из составляющих поля образует соответствующие потоко-сцепления с обмотками: Φ – основное потоко-сцепление, Φ_{p1} и Φ_{p2} – потоко-сцепления рассеяния обмоток статора и ротора (рис. 3.7).

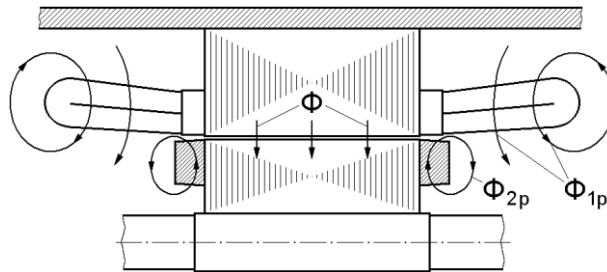


Рис. 3.7. Составляющие магнитного поля АД

Магнитное поле рассеяния асинхронной машины имеет более сложное пространственное распределение и для удобства расчета его у каждой обмотки, в свою очередь, также разбивают на составляющие:

- поле пазового рассеяния замыкается через стенки и вокруг пазов, в которых располагается обмотка;
- поле лобового рассеяния замыкается вокруг лобовых частей обмоток;
- поле дифференциального рассеяния – разность (лат. differentia) между реальным полем и полем основной пространственной гармоники в воздушном зазоре, образуемое преимущественно высшими пространственными гармониками.

Между обмотками статора и ротора индукционная связь отсутствует на высших пространственных гармониках с несовпадающими порядками. Эти гармоники образуют «чистое» поле рассеяния. На высших пространственных гармониках совпадающих порядков индукционная связь существует. Хотя эти гармоники не участвуют в полезном преобразовании энергии, они влияют на эквивалентные параметры обмоток, и их действие учитывается аналогично гармоникам несовпадающих порядков в эквивалентных параметрах.

Следует отметить, что некоторая незначительная часть поля дифференциального рассеяния образуется и за счет поля основной гармоники в воздушном зазоре.

Описанное представление позволяет свести теорию (математическое описание) асинхронной машины к теории трансформатора. Как и в трансформаторе, разложение реального магнитного поля на составляющие не является однозначным. Кроме того, магнитная связь между обмотками статора и ротора меньше, чем в трансформаторе из-за наличия воздушного зазора. Однако в связи с особенностями конструктивного исполнения электрических машин (расположение обмоток статора и ротора в пазах, относительная взаимная удаленность их лобовых частей) отдельные составляющие поля рассеяния (но не все!) могут быть более определенно отнесены к соответствующим обмоткам. Это дает возможность построить теорию асинхронной машины с точностью, приемлемой для практических расчетов.

3.4.3. Электродвижущие силы, индуцируемые в обмотках статора и ротора

Составляющие вращающегося магнитного поля асинхронной машины индуцируют в обмотках соответствующие ЭДС. Основное магнитное поле, пересекающее как проводники обмотки статора, так и ротора, индуцирует в этих обмотках основные ЭДС, которые можно рассчитать по формулам, аналогичным выражению (1.1) для трансформатора:

$$E_1 = 4,44f_1w_1k_{o\delta 1}\Phi_m, \quad (3.4)$$

$$E_{2s} = 4,44f_2w_2k_{o\delta 2}\Phi_m, \quad (3.5)$$

где w_1 и w_2 – число последовательно включенных витков, содержащихся в фазах обмоток, соответственно, статора и ротора; $k_{o\delta 1}$ и $k_{o\delta 2}$ – обмоточные коэффициенты.

Поскольку ЭДС в обмотке ротора асинхронной машины возбуждается индукционным путем, при принятых допущениях она содержит только одну временную гармонику, частота f_2 которой в системе координат ротора прямо пропорциональна частоте вращения поля относительно ротора, т.е. частоте скольжения $n_s = n_1 - n_2$:

$$f_2 = pn_s = pn_1(n_s / n_1) = f_1 s. \quad (3.6)$$

Таким образом, частота ЭДС в обмотке ротора равна произведению частоты питающей сети на скольжение. При неподвижном роторе, что имеет место в момент пуска, она равна частоте питающей сети (при $s = 1$ $f_2 = f_1$).

Подставляя в выражение для E_{2s} частоту f_2 , получим:

$$E_{2s} = (4,44f_1 w_2 k_{062} \Phi_m) s = E_2 s, \quad (3.7)$$

где $E_2 = 4,44f_1 w_2 k_{062} \Phi_m$ – ЭДС обмотки неподвижного ротора.

Отношение ЭДС обмотки статора к ЭДС обмотки неподвижного ротора называется коэффициентом трансформации ЭДС k_E :

$$k_E = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1 k_{061}}{w_2 k_{062}}. \quad (3.8)$$

Магнитные потоки рассеяния наводят в обмотках соответствующие ЭДС рассеяния, которые при ненасыщенной магнитной цепи пропорциональны токам этих обмоток. В теории асинхронных машин, так же, как и в трансформаторах, ЭДС рассеяния в обмотках статора и ротора учитывается численно равным падением напряжения на соответствующих индуктивных сопротивлениях рассеяния x_1 и x_{2s} .

Поскольку индуктивное сопротивление рассеяния ротора x_{2s} прямо пропорционально частоте тока ротора, его можно представить по аналогии с ЭДС ротора:

$$x_{2s} = x_2 s, \quad (3.9)$$

где x_2 – индуктивное сопротивление рассеяния ротора при $s = 1$.

В пусковом режиме токи обмоток возрастают в несколько раз, и создаваемые ими магнитные потоки рассеяния существенно насыщают участки магнитной цепи, через которые они замыкаются. Как следствие, индуктивные сопротивления рассеяния x_1 и x_2 в этом режиме уменьшаются, что учитывается при проектировании.

3.4.4. Уравнения электрического равновесия

В соответствии со вторым законом Кирхгофа уравнения электрического равновесия по контурам фаз обмоток статора и ротора для выбранных условных положительных направлений ЭДС, напряжений и токов (рис. 3.8) записываются в следующем виде:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 + r_1 \underline{I}_1 + jx_1 \underline{I}_1, \quad (3.10)$$

$$\underline{E}_{2s} = r_2 \underline{I}_2 + jx_{2s} \underline{I}_2. \quad (3.11)$$

При записи второго уравнения учтено, что напряжение $\underline{U}_2 = 0$, так как трехфазная обмотка ротора (в общем случае число фаз на роторе $m_2 \geq 3$) и индуцируемая в ней система ЭДС симметричны.

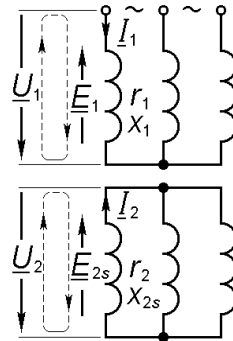


Рис. 3.8. Схема АД с условными положительными направлениями ЭДС, напряжений и токов

Уравнение для обмотки ротора асинхронной машины отличается от соответствующего уравнения для вторичной обмотки трансформатора следующим:

1) действующее значение ЭДС обмотки ротора E_{2s} и ее индуктивное сопротивление рассеяния x_{2s} зависят от скольжения, т.е. от частоты вращения ротора;

2) мгновенные величины ЭДС и тока ротора, соответствующие отображающим их комплексным значениям, изменяются во времени с частотой скольжения.

Устраним эти формальные отличия. Разделив правую и левую части уравнения для ротора на скольжение, получим:

$$\underline{E}_2 = (r_2 / s) \underline{I}_2 + jx_2 \underline{I}_2,$$

где r_2 / s – некоторое эквивалентное сопротивление, обратно пропорциональное скольжению, моделирующий смысл которого мы установим ниже.

В полученном уравнении после выполненного преобразования значения E_2 и x_2 соответствуют неподвижному состоянию ротора ($s = 1$) и не зависят от текущего режима работы. Комплексное представление ЭДС $\underline{E}_{2s}$ и тока $\underline{I}_2$ формально не связано с частотой изменения во времени, которую можно считать соответствующей неподвижному ротору. Это не влияет на их численное значение, зависящее от режима работы.

3.4.5. Уравнение равновесия магнитодвижущих сил

Поскольку ток в роторе асинхронной машины возбуждается индукционным путем, волны МДС пространственных гармоник одинакового порядка у обмоток статора и ротора вращаются относительно статора с одинаковой частотой, и, таким образом, взаимно неподвижны. Поскольку уравнения для всех пространственных гармоник однотипны, ниже для простоты будем использовать только основную гармонику.

Между обмотками статора и ротора существует взаимная индукционная связь, которая при нагрузке приводит к взаимозависимости их токов и, соответственно, МДС, которую можно установить, исходя из закона полного тока по замкнутому контуру внутри магнитопровода, охватывающему эти обмотки. Для простоты мы предположим, что скоп пазов отсутствует в обеих обмотках. Его наличие учитывается отдельно.

Будучи взаимно неподвижными, вращающиеся волны МДС обмоток статора и ротора суммируются так же, как и в трансформаторе, образуя результирующую МДС. В режиме нагрузки по аналогии с трансформатором ее можно приравнять к гипотетической МДС только одной обмотки статора в режиме идеального ХХ ($i_2 = 0$), при условии, что она создает в асинхронной машине равное магнитное поле. Примем во внимание формулы: (2.5) для амплитуды МДС одной фазы и (2.16) для вращающейся волны МДС, создаваемой всеми фазами. Учитывая с помощью обмоточного коэффициента $k_{о6}$ влияние распределения обмоток статора и ротора по пазам и укорочения шага, получим следующее уравнение равновесия для комплексных амплитуд МДС:

$$\frac{\sqrt{2}m_1w_1k_{о61}}{\pi p}\underline{I}_1 - \frac{\sqrt{2}m_2w_2k_{о62}}{\pi p}\underline{I}_2 = \frac{\sqrt{2}m_1w_1k_{о61}}{\pi p}\underline{I}_{10},$$

где $\underline{I}_{10}$ – некоторый эквивалентный ток первичной обмотки, соответствующий этой гипотетической МДС, m_1 и m_2 – число фаз обмоток статора и ротора.

Полученное для АД уравнение отличается от «трансформаторного» (1.8) только коэффициентами при токах обмоток. Разделив обе части уравнения равновесия МДС на коэффициент $m_1 w_1 k_{061} \sqrt{2} / (\pi p)$, получим выражение:

$$\underline{I}_1 - \underline{I}_2' = \underline{I}_{10}, \quad (3.12)$$

$$\underline{I}_2' = \underline{I}_2 / k_I, \quad (3.13)$$

$$k_I = \frac{m_1 w_1 k_{061}}{m_2 w_2 k_{062}}, \quad (3.14)$$

где $\underline{I}_2'$ – приведенный ток обмотки ротора, k_I – коэффициент приведения.

Уравнение (3.12) отражает свойство саморегулирования асинхронной машины, обусловленное магнитной связью обмоток: изменение силы тока в обмотке ротора влечет соответствующее изменение тока в обмотке статора.

Так как амплитуда магнитного потока в зазоре $\Phi_m \approx \text{const}$, что следует из приближенного равенства $U_1 \approx E_1$, (см. уравнение электрического равновесия для фазы статора), можно принять, что разность токов в рабочих режимах остается постоянной и равной току $\underline{I}_0$ идеального холостого хода (при $s = 0$). В этом случае соответствующие уравнения равновесия для МДС и токов обмоток будут приближенными. Такая интерпретация используется на практике.

3.4.6. Основные уравнения в приведенных величинах

С целью синтеза схемы замещения асинхронной машины, аналогичной трансформатору, необходимо, сохраняя неизменными все составляющие мощности, привести электрические величины и параметры обмоток статора и ротора к одинаковому числу витков и фаз. Обычно обмотку ротора приводят к числу витков и фаз обмотки статора. Подобное преобразование можно интерпретировать как введение в рассмотрение некоторого условного приведенного двигателя, у которого число витков и фаз обмотки ротора такие же, как и на статоре, а все составляющие мощности соответствует реальному АД. Пересчет электрических величин и параметров обмотки ротора в целом производится аналогично тому, как это выполнялось в трансформаторе:

$E_2' = E_1 = k_E E_2$ – приведенная ЭДС обмотки ротора; $\underline{I}_2'$ – приводится по формуле (3.13)–(3.14); $r_2' = k_E k_I r_2$; $x_2' = k_E k_I x_2$.

Полная система уравнений АД с приведенными параметрами обмотки ротора будет иметь следующий вид:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 + r_1 \underline{I}_1 + jx_1 \underline{I}_1, \quad (3.15)$$

$$\underline{E}_2' = \underline{E}_1 = (r_2' / s) \underline{I}_2' + jx_2' \underline{I}_2', \quad (3.16)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{10} + \underline{I}_2'. \quad (3.17)$$

Эту систему уравнений графически отображает векторная диаграмма на рис. 3.9.

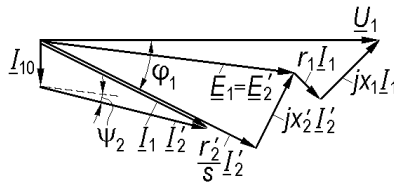


Рис. 3.9. Векторная диаграмма ЭДС, напряжений и токов АД

3.5. Схемы замещения

3.5.1. Т-образная схема замещения и физический смысл входящих в нее параметров

Системы уравнений (1.5), (1.10) и (1.11) трансформатора и (3.15)–(3.17) АД с приведенными параметрами обмотки ротора формально математически аналогичны, поэтому им соответствуют схемы замещения одинаковой структуры. Т-образная схема замещения АД, соответствующая системе (3.15)–(3.17), представлена на рис. 3.10.

Эта схема методически полезна и правильно отражает количественные соотношения в двигателе, позволяет получить практически приемлемую расчетную модель. Однако имеет тот же недостаток, что и аналогичная схема замещения трансформатора: параметры x_1 и x_2' не могут быть однозначно определены по отдельности ни расчетным, ни экспериментальным путем.

Элементы r_1 , x_1 ; r_2' , x_2' ; r_m , x_m в схемах замещения асинхронной машины и трансформатора (см. п. 1.10 и 1.11) имеют одинаковый физический смысл, однако в силу конструктивных отличий их параметры иные. При равной с трансформатором номинальной мощности и напряжении

конструктивное различие (расположение обмоток в пазах, их скос и т.п.) приводит к увеличению относительных значений индуктивных сопротивлений рассеяния x_1 и x_2 обмоток статора и ротора. В то же время из-за наличия воздушного зазора в магнитной цепи асинхронной машины относительное значение индуктивного сопротивления x_m намагничивающего контура уменьшается.

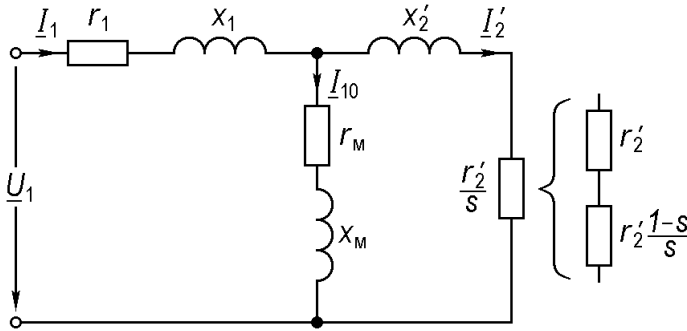


Рис. 3.10. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Резистивный элемент $\frac{r_2'}{s}$ можно представить в виде последовательного соединения двух элементов (см. рис. 3.10):

$$\frac{r_2'}{s} = r_2' + r_2' \frac{(1-s)}{s}. \quad (3.18)$$

Сравнивая одинаковые по структуре Т-образные схемы замещения трансформатора и АД (см. рис. 1.20 и рис. 3.10), можно заключить, что сопротивление резистивного элемента $r_2' \frac{(1-s)}{s}$ аналогично активному сопротивлению нагрузки, включенному на выход схемы замещения трансформатора. Из этого следует, что этот элемент моделирует механическую мощность, являющуюся подобной «нагрузкой» для АД. На основании схемы замещения она может быть рассчитана по формуле

$$P_{\text{мех}} = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{(1-s)}{s}. \quad (3.19)$$

В соответствии с выражением (3.18) в активном сопротивлении $\frac{r_2'}{s}$ дополнительно содержится активное сопротивление обмотки ротора r_2' , которым учитываются электрические потери:

$$P_{\text{эл2}} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2'. \quad (3.20)$$

Таким образом, элемент схемы замещения $\frac{r_2'}{s}$ учитывает всю мощность, передаваемую со статора на ротор, которая называется электромагнитной:

$$P_{\text{эм}} = P_{\text{эл2}} + P_{\text{мех}} = \frac{P_{\text{эл2}}}{s} = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s}. \quad (3.21)$$

3.5.2. Упрощенная Г-образная схема замещения

Г-образная схема замещения представляет собой разветвленную электрическую цепь, неудобную для анализа и практических расчетов. Аналогично трансформатору (см. рис. 1.19, б) для АД можно предложить упрощенную Г-образную схему замещения (рис. 3.11) с вынесенной на зажимы цепью r_0 , x_0 , параметры которой определяются теми же формулами. Так как из-за наличия воздушного зазора в магнитной цепи ток холостого хода в АД значительно больше, чем у трансформатора, то эта схема менее точна. Однако, ввиду простоты, она широко используется в расчетах.

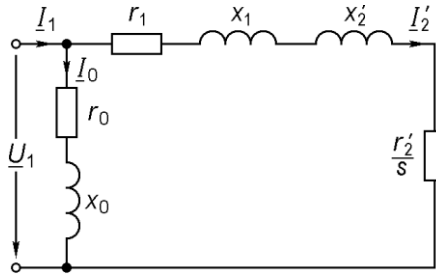


Рис. 3.11. Упрощенная Г-образная схема замещения АД

Укажем также на то, что в отличие от трансформатора все параметры схемы замещения АД зависят от режима работы, особенно при больших скольжениях: r_2' увеличивается из-за явления вытеснения тока на большой частоте, x_1 и x_2' уменьшаются вследствие насыщения магнитной цепи (зубцовой зоны) потоками рассеяния, создаваемыми пусковыми токами.

Заметим, что любые математические модели какого-либо реального объекта всегда являются приближенными, из-за того, что никогда не смогут учесть все его особенности. В то же время всегда нужно стре-

миться к тому, чтобы как можно полнее отразить реальный объект, т.е. сделать модель более точной.

С помощью Г-образной схемы замещения могут быть рассчитаны различные электрические величины, характеризующие работу асинхронного двигателя.

3.6. Энергетическая диаграмма

Энергетическая диаграмма наглядно отображает распределение мощности, потребляемой из сети (рис. 3.12) в двигательном режиме.

Поступающая мощность частично расходуется на покрытие потерь: электрических $\Delta P_{э1}$ – в обмотке статора, и магнитных ΔP_m – в сердечниках статора $\Delta P_{м1}$ и ротора $\Delta P_{м2}$. В рабочем режиме при небольших скольжениях частота перемагничивания сердечника ротора составляет единицы герц и магнитные потери в нем относительно невелики. Остальная мощность $P_{эм}$, называемая электромагнитной, посредством вращающегося магнитного поля передается на ротор. Часть ее компенсирует мощность $\Delta P_{э2}$ электрических потерь в обмотке ротора, оставшаяся, механическая мощность $\Delta P_{мех}$, идет на совершение ротором механической работы. Мощность на валу P_2 , передаваемая рабочей машине, меньше механической мощности вследствие потерь на трение о воздух, включая вентиляцию, и в подшипниковых узлах.

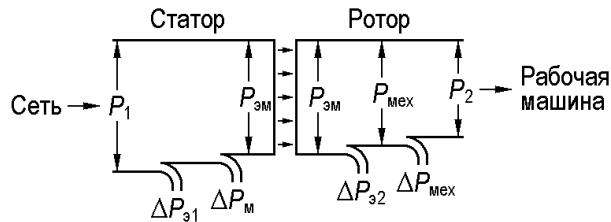


Рис. 3.12. Энергетическая диаграмма АД

Заметим, что энергетическая диаграмма соответствует полученным выше выражениям (3.19)–(3.21).

Отношение мощности на валу P_2 к мощности P_1 , потребляемой из сети, называется коэффициентом полезного действия:

$$\eta = P_2 / P_1.$$

Как и в случае с трансформатором потребляемая из сети мощность P_1 рассчитывается как сумма мощностей на валу и суммарных потерь:

$$P_1 = P_2 + \Delta P.$$

Представленная на энергетической диаграмме структура мощностей в АД несколько упрощена. В расчетной практике дополнительно учитывают различные виды добавочных потерь, обусловленные полями рассеяния, пульсациями магнитного потока в зубцовой зоне и др. В целом, они невелики и не оказывают существенного влияния на общие закономерности. Таким образом, суммарная мощность ΔP всех видов потерь энергии в АД отличается от потерь в трансформаторе (1.20) наличием механических $\Delta P_{\text{мех}}$ и добавочных потерь $\Delta P_{\text{доб}}$:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}.$$

3.7. Электромагнитный момент ротора. Механическая характеристика

Как указывалось при рассмотрении принципа действия (см. п. 3.3), электромагнитный момент создается электромагнитными силами, действующими на ротор. Вывод расчетной формулы для этого момента через электромагнитные силы, связанный с решением задачи теории поля, весьма затруднителен и выходит за рамки общего курса. Получим эту формулу, исходя из физических соображений, энергетических соотношений (рис. 3.12) и схемы замещения двигателя (рис. 3.11).

Электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$ в АД создается магнитным полем, вращающимся с синхронной частотой Ω_1 . В соответствии с курсом механики, соответствующая электромагнитная мощность рассчитывается по формуле: $P_{\text{эм}} = M_{\text{эм}}\Omega_1$. Механическая мощность вычисляется по аналогичной формуле с учетом того, что ротор вращается с другой частотой $\Omega_2 = \Omega_1(1 - s)$: $P_{\text{мех}} = M_{\text{эм}}\Omega_2 = M_{\text{эм}}\Omega_1(1 - s)$. С учетом этих выражений и согласно энергетической диаграмме (рис. 3.10) имеем:

$$P_{\text{эл2}} = P_{\text{эм}} - P_{\text{мех}} = M_{\text{эм}}\Omega_1 s. \quad (3.22)$$

Приравняем выражения (3.20) и (3.22) для $P_{\text{эл2}}$:

$$M_{\text{эм}}\Omega_1 s = m_1 I_2'^2 r_2'. \quad (3.23)$$

Определим силу тока через напряжение питающей сети согласно закону Ома из Г-образной схемы замещения (рис. 3.11):

$$I_2'^2 = \frac{U_1^2}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}.$$

Выполнив соответствующие подстановки, из выражения (3.23) получим выражение электромагнитного момента через напряжение питания, параметры обмоток и скольжение:

$$M_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{эм}}}{\Omega_1} = \frac{pm_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1 \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}. \quad (3.24)$$

Из этой формулы (3.24) видно, что при неизменном скольжении электромагнитный момент прямо пропорционален квадрату напряжения. Таким образом, АД весьма чувствителен к его отклонению, что необходимо учитывать при эксплуатации.

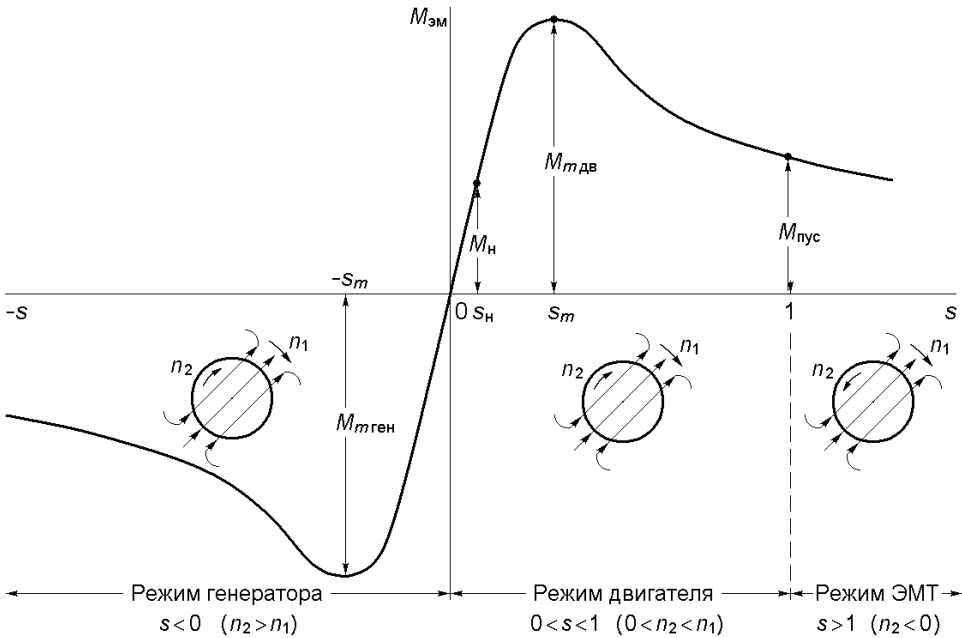


Рис. 3.13. Механическая характеристика асинхронной машины

Когда $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$ выражение (3.24) содержит только одну переменную s , которая при различных режимах работы машины теоретически может принимать значения в диапазоне скольжений $+\infty \dots -\infty$.

Зависимость $M_{\text{эм}} = f(s)$ называется механической характеристикой, в графическом виде она представлена на рис. 3.13. На оси абсцисс указаны зоны скольжений (и соответствующие им диапазоны частот вращения), соответствующие различным режимам работы асинхронной машины.

3.8. Режимы работы асинхронной машины

Двигательный режим является естественным для машины, подключенной к сети. В этом режиме электромагнитный момент $M_{эм}$ является вращающим, ротор увлекается полем и вращается в одну с ним сторону с меньшей частотой вращения ($0 < s < 1$, $0 < n_2 < n_1$). При этом энергия потребляется из сети на совершение полезной механической работы. Некоторая ее часть теряется: на нагрев, трение и т.д.

При $s = 0$ электромагнитный момент $M_{эм} = 0$, что соответствует принципу действия асинхронного двигателя, который не может создавать вращающий момент при синхронной частоте вращения $n_2 = n_1$. С ростом скольжения момент увеличивается, что соответствует принципу действия асинхронного двигателя: большее скольжение приводит к увеличению индуцируемой ЭДС, возрастанию силы тока в роторе и силовому взаимодействию со статором.

В установившемся режиме двигатель работает в диапазоне скольжений $0 < s < s_m$. Скольжение s_n , при котором развивается номинальный момент M_n , обычно не превышает нескольких процентов ($s_n = 0,02–0,09$).

При скольжении s_m , называемым критическим, двигатель развивает максимальный вращающий момент M_{max} , который определяет перегрузочную способность двигателя.

Выражение для критического скольжения s_m можно получить на основе известного из курса электротехники условия выделения максимальной мощности на двухполюснике, согласно которому его сопротивление должно быть равно полному сопротивлению цепи, от которой этот двухполюсник получает питание. В соответствии с физическим смыслом элементов Г-образной схемы замещения (см. рис. 3.11) таким двухполюсником является резистивный элемент с активным сопротивлением $\frac{r'_2}{s_m}$. Мощность, передаваемая на ротор и, соответственно, развиваемый им момент будут максимальными тогда, когда это сопротивление будет равно сопротивлению остальной части ветви, через которую резистивный элемент получает питание. Отсюда получаем выражение

$$s_m = \pm \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}},$$

в котором знаки «+» и «−» относятся, соответственно, к двигательному и генераторному режимам.

Для расчета s_m часто используют более простое выражение, которое получается, если в подкоренном выражении пренебречь слагаемым r_1^2 (так как $r_1^2 \ll (x_1 + x_2')^2$):

$$s_m \approx \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2'} . \quad (3.25)$$

Из полученных выражений следует, что величина критического скольжения s_m прямо пропорциональна активному сопротивлению обмотки ротора. Таким образом, это сопротивление определяет положение максимумов механической характеристики.

Подставляя значение критического скольжения в уравнение механической характеристики, получим выражение для максимального момента:

$$M_{\max} = \frac{m_1 U_1^2}{2\Omega_1 \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]} .$$

Видно, что максимальное значение момента не зависит от сопротивления цепи ротора r_2' и прямо пропорционально квадрату приложенного напряжения. При $s > s_m$ электромагнитный момент снижается.

Электромагнитный момент $M_{\text{пус}}$ при $s = 1$ ($n_2 = 0$) называется пусковым. Он развивается двигателем в момент времени, когда при неподвижном роторе на обмотку статора подается напряжение питающей сети. Его можно рассчитать по выражению (3.24) при скольжении $s = 1$. Из этого выражения видно, что, в отличие от максимального, пусковой момент зависит от сопротивления обмотки ротора: чем оно меньше, тем меньше $M_{\text{пус}}$. При $r_2' = 0$ и $M_{\text{пус}} = 0$. Это также следует из принципа действия: электромагнитный момент возникает от взаимодействия вращающегося магнитного поля с активной составляющей тока ротора, которая отсутствует при $r_2' = 0$, так как в этом случае сопротивление обмотки ротора будет чисто реактивным. Таким образом, имеется определенное противоречие: для снижения потерь энергии в обмотке ротора в рабочем режиме ее сопротивление необходимо уменьшать, а для обеспечения требуемого пускового момента – увеличивать. В определенной степени это противоречие удастся разрешить за счет использования явления вытеснения тока, искусственно усиливаемого в некоторых модификациях АД (применение на роторе узких глубоких пазов или обмоток из двух клеток).

Значения максимального и пускового момента приводятся в паспортных данных в относительных единицах через их кратности:

$$k_{\max} = M_{\max} / M_{\text{ном}} \quad (k_{\max} = 2, 2 \dots 3),$$

$$k_{\text{пус}} = M_{\text{пус}} / M_{\text{ном}} \quad (k_{\text{пус}} = 1, 2 \dots 2, 2).$$

Величина номинального момента $M_{\text{ном}}$ рассчитывается по номинальным значениям мощности P_2 , Вт, и частоте вращения n_2 , об/мин:

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\Omega_2} = \frac{P_{2\text{ном}}}{2\pi n_2 / 60}. \quad (3.26)$$

Генераторный режим. Если ротор АД, подключенного к сети, вращать с частотой $n_2 > n_1$ с помощью постороннего первичного двигателя, то относительное направление вращения ротора и поля будет противоположным двигательному режиму ($s < 0$). Соответственно, изменится направление индуцируемой в обмотке ротора ЭДС, активной составляющей тока и действующих на ротор электромагнитных сил, которые будут оказывать на ротор тормозное действие, что означает переход в генераторный режим работы. В этом режиме энергия подводится извне к ротору в виде механической энергии: вращающий момент первичного двигателя преодолевает тормозной момент электромагнитных сил. Вырабатываемая электроэнергия поступает в сеть, к которой подключен АД, некоторая ее часть компенсирует потери.

Частота возвращаемой в сеть электроэнергии всегда соответствует частоте сети, к которой подключена обмотка статора АД, независимо от частоты вращения ротора. Физически это обусловлено тем, что подключенная к сети обмотка статора АД одновременно является обмоткой возбуждения и может взаимодействовать с обмоткой ротора только на частоте магнитного поля возбуждения.

Генераторный режим возникает также при переходном процессе, например, в полюсно-переключаемых двигателях при переключении на большее число полюсов. При этом поле практически мгновенно начинает вращаться с новой синхронной частотой, а ротор вследствие инерции продолжает вращение с прежней частотой. В процессе торможения, пока частота вращения ротора превышает синхронную, машина находится в генераторном режиме, преобразуя с возвратом в сеть кинетическую энергию вращающихся масс в электрическую энергию (так называемое, рекуперативное торможение).

Механическая характеристика АМ не обладает центральной симметрией: при одинаковом по величине критическом скольжении $s=\pm s_m$ максимальное значение электромагнитного момента в генераторном режиме ($s < 0$) больше, чем в двигательном ($0 < s < 1$).

Физически это обусловлено следующим. Потери в обмотке статора в двигательном режиме компенсируются за счет сети, а в генераторном – за счет первичного двигателя. Поэтому при одном и том же моменте на валу активная мощность, а следовательно, и ток в обмотке статора в генераторном режиме меньше, чем в двигательном. При одном и том же скольжении наоборот, ток в обмотке статора, а следовательно, и момент на валу в генераторном режиме больше. Это может быть показано также математически, исходя из схемы замещения.

В режим электромагнитного тормоза (ЭМТ) асинхронную машину можно перевести, если с помощью внешнего двигателя вращать ротор в направлении, противоположном вращению поля ($n_2 < 0$, $s > 1$). В этом режиме энергия поступает из двух источников: из сети – как электрическая, от внешнего двигателя – как механическая. Вся она расходуется на потери внутри АМ, вызывая нагрев.

Режим ЭМТ может также возникнуть как переходной при изменении направления вращения двигателя путем подключения двигателя к источнику питания с обратным порядком чередования фаз. Его также используют при торможении противовключением.

3.9. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочие характеристики (рис. 3.14) дают наиболее полное представление об эксплуатационных свойствах асинхронного двигателя. Они представляют зависимость частоты вращения ротора (n_2), скольжения (s), коэффициента мощности ($\cos\varphi$), КПД (η), потребляемого из сети тока (I_1) и вращающего момента (M_2) от мощности P_2 на валу двигателя. Характеристики снимаются при номинальном питающем напряжении $U_{1н}$ и частоте $f_{1н}$. На рис. 3.14 зависимости величин, имеющих размерность, приведены в относительных единицах (помечены знаком «*»).

Проанализируем характер изменения различных величин. Скольжение s при увеличении нагрузки растет, а частота вращения n_2 в соответствии с выражением (3.3) снижается. Поскольку снижение незначительно ($s_n = 3\text{--}7\%$), характеристика $n_2 = f(P_2)$ короткозамкнутого асинхронного двигателя является достаточно жесткой.

Зависимость от нагрузки потребляемого из сети тока $I_1 = f(P_2)$ аналогична соответствующей зависимости для полной мощности S_1 , так как

$$I_1 = \frac{S_1}{\sqrt{3}U_1} = \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}{\sqrt{3}U_1}, \text{ где } S_1, P_1 \text{ и } Q_1 - \text{ полная, активная и реактивная}$$

мощности двигателя, U_1 – линейное напряжение на выводах. При холостом ходе двигатель потребляет значительный ток $I_{0*} = 0,2-0,4$, на порядок превышающий соответствующее значение для трансформатора. Это обусловлено наличием воздушного зазора в магнитной цепи двигателя.

С ростом мощности нагрузки потребляемый ток $I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$ возрастает из-за увеличения активной составляющей тока I_{1a} .

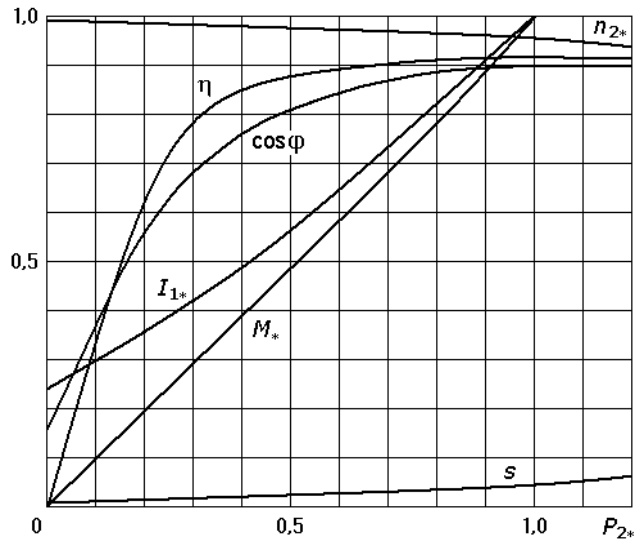


Рис. 3.14. Рабочие характеристики АД

Характер зависимости $\cos\varphi = f(P_2)$ связан с изменением соотношения между активной и полной мощностью с ростом нагрузки, так как

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}. \text{ В режиме холостого хода низкое значение коэф-}$$

фициента мощности ($\cos\varphi_0 = 0,15 \dots 0,20$), обусловлено тем, что $Q_0 \gg P_0$. С ростом мощности P_2 растет потребляемая мощность $P_1 = P_2 + \Delta P$ (ΔP – суммарные потери мощности) и $\cos\varphi_1$ увеличивается, достигая максимального значения при нагрузке, близкой к номинальной ($P_{2*} = 0,9-1,0$). При дальнейшем увеличении нагрузки полная мощность растет быстрее активной из-за пропорциональной квадрату тока части реактивной мощности, обусловленной магнитным полем рассеяния, и $\cos\varphi$ уменьшается.

Характер зависимости $\eta = f(P_2)$ связан с изменением при нагрузке соотношения между полезной и потребляемой из сети активной мощностью ($\eta = P_2 / P_1$). Для объяснения сложного характера этой зависимости необходимо проанализировать структуру потерь в двигателе. Суммарные потери мощности разделяют на постоянные $\Delta P_{\text{пост}}$ и переменные $\Delta P_{\text{пер}}$: $\Delta P = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}}$. К постоянным относят магнитные и механические потери, мало зависящие от нагрузки, к переменным – электрические потери в обмотках, пропорциональные квадрату тока.

В режиме холостого хода $\eta = 0$, так как $P_2 = 0$. В области относительно небольших нагрузок полезная мощность растет быстрее потребляемой и КПД возрастает, достигая максимального значения при $\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{пер}}$. Асинхронные двигатели проектируют таким образом, чтобы это соответствовало наиболее вероятной нагрузке при эксплуатации ($P_{2*} = 0,75\text{--}0,9$). При дальнейшем увеличении P_2 потребляемая мощность P_1 растет быстрее (из-за возрастающих пропорционально квадрату тока электрических потерь в обмотках), и КПД двигателя снижается.

Величина КПД при номинальной нагрузке зависит от мощности и частоты вращения асинхронных двигателей и находится в диапазоне: при малой мощности (сотни ватт) – 0,55–0,75; средней мощности (киловатты – десятки киловатт) 0,75–0,93; большой мощности (сотни киловатт) – 0,93–0,95.

Зависимость вращающего момента M от мощности на валу двигателя P_2 можно объяснить, исходя из связывающего эти величины выражения (3.26). Если бы частота вращения при нагрузке оставалась постоянной, то характеристика $M = f(P_2)$ являлась бы прямо пропорциональной зависимостью. Но так как n_2 с ростом нагрузки незначительно снижается, вращающий момент M на валу растет несколько быстрее мощности P_2 .

3.10. Способы пуска асинхронных двигателей

Пуском называется переходной процесс от момента подключения двигателя к источнику питания вплоть до достижения им установившегося режима работы. Этот режим является одним из наиболее ответственных, он существенно влияет на ресурс работы АД и электропривода в целом.

Выбор способа пуска зависит от мощности АД, конструкции, способа питания и необходимости обеспечения определенных пусковых характеристик. Основными параметрами, характеризующими различные методы пуска, являются пусковой ток и пусковой момент.

3.10.1. Прямой пуск

Метод прямого пуска используется для короткозамкнутых асинхронных двигателей малой и средней мощности. Сущность метода состоит в подключении двигателя непосредственно на полное напряжение сети с помощью какого-либо коммутационного аппарата K (рис. 3.15). При этом способе параметры пускового режима определяются механическими характеристиками двигателя и рабочей машины. Прямой пуск обеспечивает удовлетворительный пусковой момент ($k_{\text{пус}} = 1\text{--}2$), однако при этом через двигатель и по сети протекает значительный пусковой ток $I_{\text{пус}} = (5\text{--}8)I_{\text{н}}$. Это может вызвать недопустимое снижение напряжения в сети и отрицательно повлиять на работу других электроприемников, получающих питание от той же сети. Протекание больших пусковых токов вызывает резкое возрастание (пропорционально квадрату тока) электродинамических усилий в лобовых частях обмоток и перегрев изоляции из-за увеличения электрических потерь. Также возникают ударные нагрузки и сильные механические вибрации, которые могут вызвать разрушение в электромеханическом приводе редукторов и подшипников.

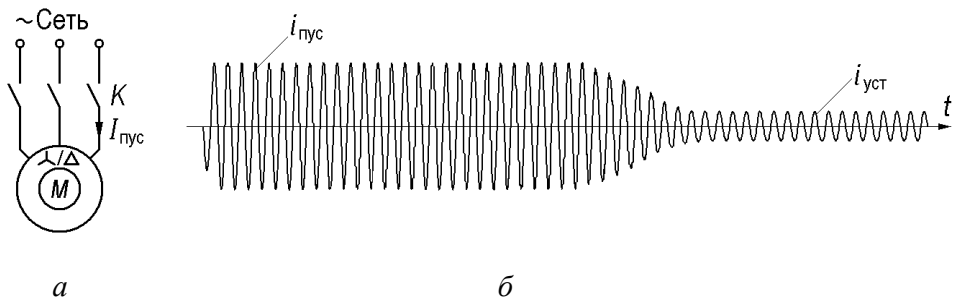


Рис. 3.15. Прямой пуск АД:
а – схема; б – осциллограмма тока

Возникновение броска тока можно объяснить следующим. В начальный момент пуска, когда ротор неподвижен и магнитное поле вращается относительно него с синхронной скоростью, в проводниках обмотки ротора индуцируется ток, имеющий частоту питающей сети. При этой частоте реактивная составляющая тока ротора многократно превышает его активную составляющую. Создаваемое реактивным током магнитное поле направлено встречно полю обмотки статора, уменьшая результирующее поле двигателя. Это приводит к соответствующему уменьшению противо-ЭДС в обмотке статора и, как следствие, возрастанию пускового тока.

Бросок пускового тока можно также объяснить, основываясь на схеме замещения (см. рис. 3.11). Сила тока, потребляемого двигателем из сети, зависит от скольжения. В начальный момент пуска, когда ротор неподвижен ($s = 1$) электрическая цепь имеет значительно меньшее эквивалентное сопротивление, чем при скольжении в рабочем режиме ($s = 0,02 \dots 0,08$). Если пренебречь относительно небольшим намагничивающим током пусковой ток в соответствии с законом Ома возрастает обратно пропорционально степени уменьшения этого сопротивления:

$$I_{\text{пус}} = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}}. \quad (3.27)$$

Как следует из выражения (3.27), пусковой ток может быть уменьшен путем снижения подводимого к нему напряжения, а также за счет увеличения эквивалентного сопротивления электрической цепи. Выбор метода пуска и его техническая реализация зависит от ряда факторов: тип, мощность и особенности конструктивного выполнения обмоток двигателя, обеспечение определенного уровня пускового тока, требование рабочего механизма к моменту, время и плавность процесса пуска и др.

3.10.2. Пуск при пониженном напряжении

Для снижения напряжения на выводах двигателя применяют специальные устройства с возможностью регулирования: автотрансформаторы, тиристорные пускатели и др.

Необходимость в сравнительно недорогих устройствах для пуска двигателей с ограничением тока в процессе разгона привела к широкому распространению устройств плавного пуска (УПП), являющихся по существу тиристорными регуляторами напряжения (ТРН), которые состоят из силовой части (обведена пунктиром) и системы управления (СУ). Питание двигателя в такой схеме обычно осуществляется от трехфазной сети через встречно-параллельно включенные тиристоры в каждой фазе (рис. 3.16).

Основная идея плавного пуска – ограничение и плавное увеличение напряжения U на двигателе в процессе пуска. ТРН на основе фазового метода регулирования формирует ток в пределах $1,5-3I_n$ и требуемый момент двигателя во время пуска. Это уменьшает выделение тепла в обмотках, а также ударные моменты, что благоприятно для механической части привода. По мере разгона двигателя потребляемый ток

уменьшается, а напряжение с помощью тиристорного регулятора увеличивается, пока не станет равным номинальному значению. По окончании пуска ТРН отключается.

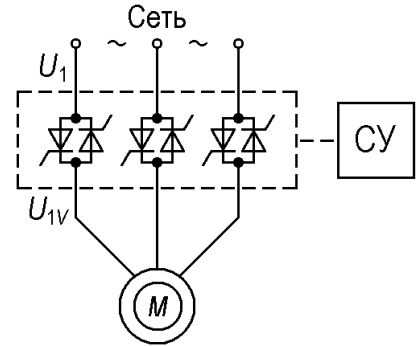


Рис. 3.16. Схема питания двигателя при пуске от ТРН

Снижению напряжения эквивалентны изменения схемы обмотки статора: переключение на период пуска фаз с треугольника на звезду или параллельных ветвей на последовательное соединение.

Первый способ переключения реализуем, если в рабочем режиме двигатель работает с соединением фаз обмотки в треугольник. Пусковой ток снижается в 3 раза, и во столько же раз уменьшается пусковой момент.

Второй способ может быть реализован, когда обмотка содержит параллельные ветви, и имеются выводы от них. Пусковой ток может быть уменьшен пропорционально квадрату числа параллельных ветвей в фазе обмотки, во столько же раз снижается пусковой момент.

Недостаток обоих способов – необходимость использования дополнительной коммутационной аппаратуры.

Снижение напряжения U на зажимах АД приводит к уменьшению пускового момента, который, как следует из выражения (3.24), пропорционален U^2 . Поэтому в необходимых случаях требуется выполнить соответствующие расчеты, подтверждающие возможность нормального пуска АД и его работы при пониженном напряжении.

3.10.3. Увеличение эквивалентного сопротивления цепи асинхронного двигателя

Пусковой ток может быть снижен путем увеличения на время пуска эквивалентного сопротивления электрической цепи АД. При короткозамкнутом роторе это достигается включением на период пуска последовательно в цепь статора трехфазного пускового реактора L (рис. 3.17, а). После его окончания реактор шунтируется контактором K . На рис. 3.17, б представлено устройство пусковое реакторное (УПР) для

пуска асинхронных двигателей большой мощности, выполненное в виде шкафа, в котором установлены пусковой реактор, высоковольтный контактор, аппаратура управления и сигнализации.

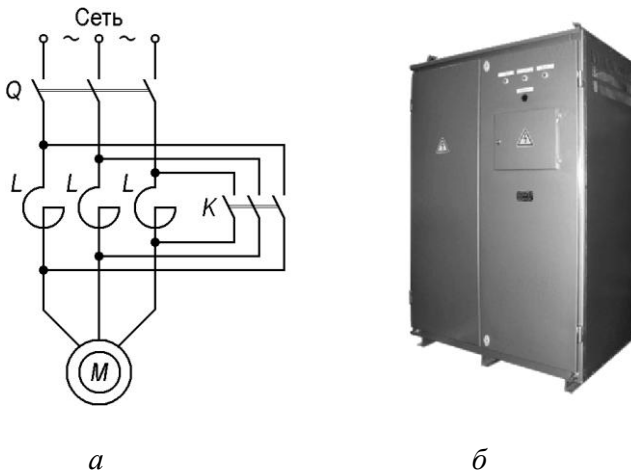


Рис. 3.17. Устройство пусковое реакторное типа УПР:
а – схема силовой части; б – шкаф с оборудованием

Недостатком всех рассмотренных выше способов пуска АД с короткозамкнутым ротором является значительное уменьшение пускового момента. Поэтому они могут быть использованы для пуска на холостом ходу или с нагрузкой вентиляторного типа (центробежных насосов, помп, вентиляторов и т.п.), не требующей большого пускового момента.

В АД с фазным ротором добавочное сопротивление в виде реостата (рис. 3.18) включается в цепь ротора через контактные кольца при пуске. Одновременно при этом можно увеличить пусковой момент, поэтому такую схему применяют в приводах механизмов, создающих при пуске большой момент сопротивления на валу: кранов, мельниц, станков, поршневых насосов, дробилок и др.

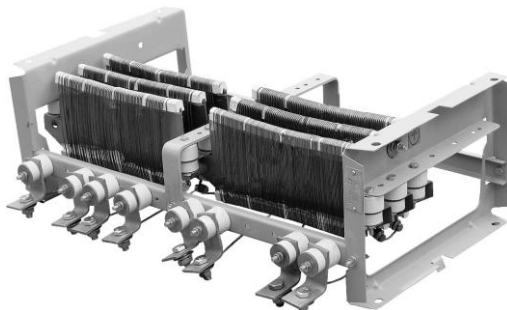


Рис. 3.18. Блок резисторов
типа Б6 У2 ИРАК

Из формулы (3.25) следует, что с увеличением активного сопротивления цепи ротора максимум момента сдвигается в сторону больших скольжений и, соответственно, меньших значений частоты вращения ротора. Механические характеристики АД при различных значениях активного сопротивления цепи ротора показаны на рис. 3.19, а.

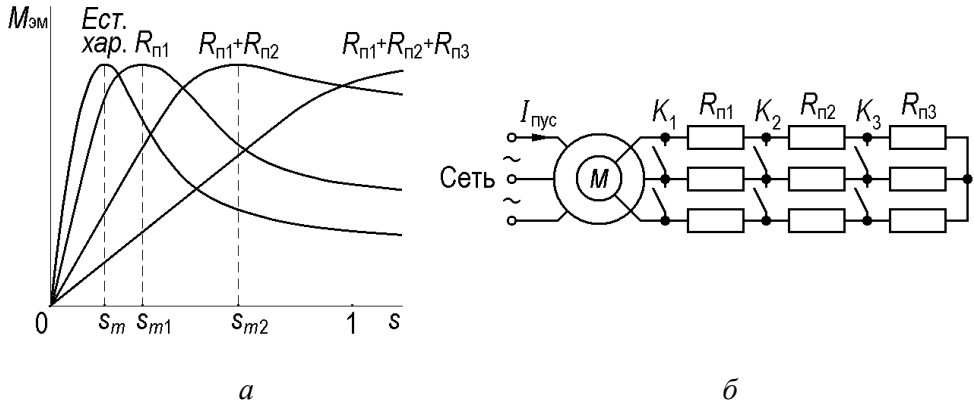


Рис. 3.19. Реостатный пуск АД:
а – механические характеристики при различных сопротивлениях пускового реостата; б – схема

В момент пуска в цепь ротора включаются все ступени реостата ($R_{\pi} = R_{\pi 1} + R_{\pi 2} + R_{\pi 3}$), для чего все контакты K_1 , K_2 и K_3 замыкаются (рис. 3.19, б). По мере разгона двигателя ступени пускового реостата поочередно выводятся из цепи ротора с помощью коммутационной аппаратуры путем закорачивания контактами. После окончания пуска двигатель работает на естественной характеристике.

3.11. Способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей

Рассмотрим возможные способы регулирования частоты вращения АД. Выразим из формулы (3.2) частоту вращения ротора:

$$n_2 = n_1(1 - s) = (1 - s)f_1 / p.$$

Из этого выражения видны возможные способы регулирования:

- 1) регулирование частоты питающего двигателя напряжения f_1 ;
- 2) изменение числа полюсов $2p$;
- 3) изменение крутизны рабочего участка механической характеристики;

4) введение ЭДС частоты скольжения в цепь ротора с помощью полупроводниковых преобразователей (асинхронный вентильный каскад (АВК)).

Первые два способа влекут изменение частоты вращения магнитного поля: $n_1 = f_1 / p$, об/с, и используются только в АД с короткозамкнутым ротором, которые управляются через обмотку статора. Третий и четвертый способ реализуется в короткозамкнутых АД и с фазным ротором.

При снижении частоты вращения необходимо учитывать ухудшение охлаждения самовентилируемых асинхронных двигателей. Это требует уменьшения мощности при длительном режиме работы.

3.11.1. Частотное регулирование

Частотное регулирование используется в современных электроприводах с короткозамкнутыми АД. Оно экономично (потери в двигателе не соответствуют уровню нерегулируемого режима работы), обеспечивает плавность и широкий диапазон регулирования. Его основным недостатком является высокая стоимость преобразователей частоты, особенно реализующих векторный способ управления.

В двигателях с фазным ротором частотный способ регулирования не применяется, так как необходимо параллельно управлять двумя обмотками: статора и ротора, что по технико-экономическим соображениям нецелесообразно.

Преобразователь частоты (ПЧ) – это устройство на электронных ключах (тиристорах или транзисторах), преобразующее входное напряжение частотой $f_1 = 50$ Гц в изменяющееся по определенному закону выходное переменное напряжение другой частоты. В основном применяются двухзвенные преобразователи, состоящие из выпрямителя и инвертора, управляемого посредством системы управления (СУ). В инверторе постоянное напряжение посредством широтно-импульсной модуляции преобразуется в набор импульсов, из которых формируется синусоидальное напряжение с плавно регулируемой величиной и частотой, начиная с $f_1 = 0$ до требуемого значения.

Принцип частотного регулирования двигателя состоит в изменении частоты n_1 вращения магнитного поля (см. выражение (2.21)) путем регулирования частоты напряжения U_{1v} , подводимого к двигателю (рис. 3.20).

Существует две основных способа (с рядом разновидностей) частотного регулирования: скалярное и векторное.

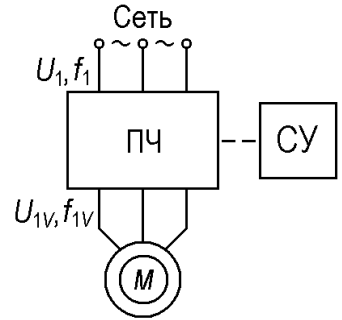


Рис. 3.20. Схема питания АД от преобразователя частоты

При скалярном управлении в качестве переменных в системе используются действующие значения скалярных величин: напряжений, токов и потокоцеплений и закономерности, следующие из схемы замещения. Как следует из полученного выше уравнения (3.4), магнитный поток в двигателе будет изменяться обратно пропорционально частоте, что при ее снижении может привести к насыщению магнитной цепи. Во избежание этого одновременно с частотой изменяют напряжение. В общем случае при регулировании может изменяться нагрузочный момент. Закон изменения напряжения при частотном способе регулирования частоты вращения асинхронного двигателя сформулирован академиком М. П. Костенко в 1925 г. (при условии неизменности коэффициента перегрузочной способности и пренебрежения активным сопротивлением обмотки статора):

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{f_1}{f_2} \sqrt{\frac{M_1}{M_2}}, \quad (3.28)$$

где величины с индексами 1 и 2 соответствуют двум различным режимам работы.

При регулировании по закону Костенко связаны изменяют амплитуду и частоту приложенного к двигателю напряжения в функции нагрузки на валу. Если нагрузка уменьшается, то при неизменном запасе статической устойчивости напряжение и частота уменьшаются в соответствии с выражением (3.28). Если в процессе регулирования момент сопротивления на валу остается постоянным, то $\sqrt{M_1/M_2} = 1$, и одновременно с частотой в обратной пропорции изменяют напряжение так, что $U/f = \text{const}$. Магнитный поток при этом приблизительно остается постоянным $\Phi_m \approx \text{const}$.

Скалярный способ базируется на уравнениях, описывающих установившиеся режимы работы. В динамических (переходных) режимах такая математическая модель становится некорректной. Поэтому скалярное

регулирование используется в тех случаях, когда к приводу не предъявляются высокие требования по диапазону регулирования и динамическим характеристикам.

При векторном управлении в качестве математической модели используются дифференциальные уравнения, корректно описывающие двигатель и в установившихся, и в динамических режимах. В качестве переменных в системе управления используется амплитуда и фаза синусоидально изменяющихся во времени напряжения или тока статора, которые можно представить векторами. Этим обусловлено происхождение термина «векторное управление».

Векторное управление обеспечивает диапазон регулирования 1:1000 и более при высокой точности и быстродействии.

Подробно скалярное и векторное частотное регулирование рассматриваются при изучении курса «Электропривод».

3.11.2. Переключение числа полюсов обмотки статора

Переключение числа полюсов, как и частотное регулирование, изменяет частоту вращения поля, но ступенчато ($n_1 = f_1 / p$), так как число пар полюсов дискретно (см табл. 2.1). Поэтому частота вращения ротора также изменяется ступенчато. Промышленность выпускает модификацию полюсно-переключаемых АД на две, три и четыре частоты вращения.

Изменять число полюсов обмотки статора можно либо укладкой в пазах статора двух обмоток с разным числом полюсов, либо укладкой одной обмотки, конструкция которой позволяет путем одновременного переключения в фазах катушечных групп получать различное число полюсов (рис. 3.21). Второй способ получил наибольшее применение.

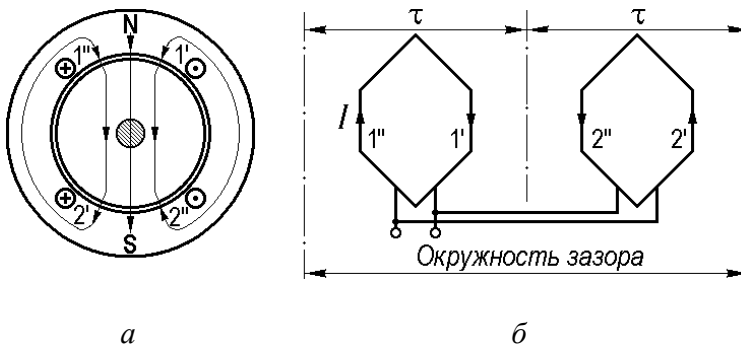


Рис. 3.21. Изменение числа полюсов обмотки изменением полярности взаимного подключения катушечных групп

Для изменения числа полюсов обмотки необходимо изменить число периодов изменения тока по окружности сердечника, которое осуществляется путем изменения полярности взаимного подключения катушечных групп. Принцип переключения катушечных групп фазы обмотки с $2p = 4$ (см. рис. 2.4 и 2.10) на $2p = 2$ (рис. 3.21, а) заключается в изменении периодичности создаваемого ими тока, для чего во второй катушке (рис. 3.21, б) направление тока изменено на противоположное.

Одновременно с изменением полярности подключения относительно зажимов произведено переключение катушек с последовательного соединения на параллельное. Это вызвано необходимостью сохранения магнитного состояния сердечника. Параллельное соединение двух катушечных групп приводит к увеличению в 2 раза напряжения, приходящегося на один виток обмотки, что соответствует увеличению примерно в то же количество раз ЭДС одного витка и сцепленного с ним магнитного потока. Но поскольку полюсное деление, как видно из выражения (2.1), при уменьшении в 2 раза числа полюсов увеличивается, магнитная индукция (и насыщение магнитопровода), остается, примерно, на одном уровне.

3.11.3. Асинхронный вентильный каскад

Асинхронный вентильный каскад (АВК) представляет собой систему электропривода, у которого цепь фазного ротора АД подключена к источнику регулируемой ЭДС частоты скольжения, выполненному на основе вентильного преобразователя. На рис. 3.22 изображена одна из наиболее простых схем, содержащая асинхронный двигатель M с фазным ротором и два вентильных преобразователя $U1$ и $U2$. Инвертор $U1$ подключен к сети переменного тока через трансформатор T , согласующий уровни напряжения сети и цепи ротора; выпрямитель $U2$ – к контактным кольцам двигателя. По цепи постоянного тока преобразователи $U1$ и $U2$ соединены последовательно, реактор L служит для сглаживания пульсаций тока в этой цепи.

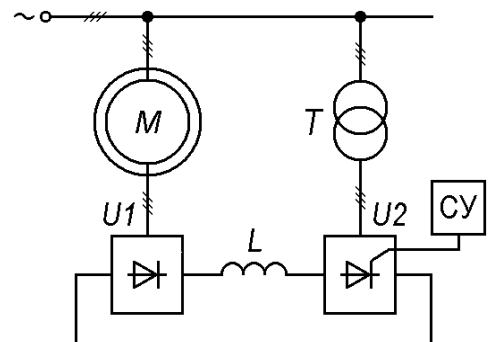


Рис. 3.22. Однолинейная схема АВК

При работе АВК угол управления задается системой управления в таком диапазоне, при котором преобразователь $U1$ работает в инверторном режиме на уменьшение результирующей ЭДС цепи ротора. С ростом угла управления ток в цепи и, как следствие, частота вращения ротора уменьшается.

Мощность преобразователей АВК, работающих во вторичной цепи ротора, меньше мощности частотных преобразователей и, соответственно, их стоимость ниже. Они обеспечивают достаточно высокие значения КПД и коэффициента мощности, обладают хорошими динамическими свойствами, однако имеют значительно меньший диапазон регулирования (примерно, 3:1).

АВК применяют в механизмах, не требующих частых пусков и торможений (буровые установки, конвейеры, вентиляторы и др.)

3.11.4. Изменение крутизны рабочего участка механической характеристики

Как видно из выражения (3.24) при некотором фиксированном скольжении $s = \text{const}$ электромагнитный момент АД пропорционален квадрату приложенного напряжения. Его снижение приводит к соответствующему уменьшению максимального значения момента M_m (рис. 3.23) и, как следствие, снижению крутизны $dM_{эм} / ds$ рабочего участка ($0 < s < s_m$) механической характеристики и росту скольжения в нагруженном двигателе: $s_1 < s_2 < s_3$. При этом частота вращения уменьшается: $n_3 < n_2 < n_1$.

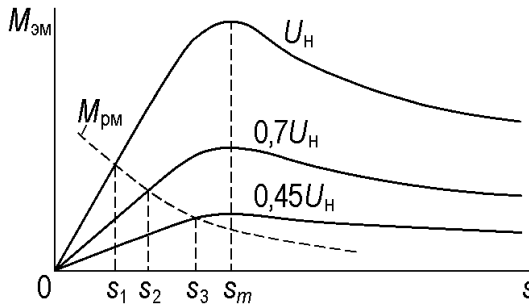


Рис. 3.23. Механические характеристики при различном напряжении на зажимах двигателя

Как указывалось выше (см. п. 3.14), у двигателей основного исполнения скольжение в рабочем режиме не превышает нескольких процентов, из-за чего диапазон регулирования частоты вращения получается весьма небольшим. В связи с этим рассмотренный способ применяют в

приводах, не требующих широкого диапазона регулирования и использующих модификацию АД с повышенным скольжением, обычно с нагрузкой вентиляторного типа, у которой момент сопротивления резко падает с уменьшением частоты вращения.

Для изменения подводимого напряжения могут использоваться различные аппараты: автотрансформатор, тиристорный регулятор напряжения (см. рис. 3.16) и др.

Крутизна рабочего участка механической характеристики уменьшается также при введении добавочного сопротивления в цепь фазного ротора (см. рис. 3.19), что приводит к уменьшению частоты вращения в нагруженном АД. В современных электроприводах реостатное регулирование не используется из-за больших потерь энергии в реостате, пропорциональных скольжению.

3.11.5. Изменение направления вращения

Изменение направления вращения (реверс) АД выполняют путем изменения направления вращения поля. Для этого меняют на обратное чередование фаз трехфазного напряжения на выводах двигателя, переключая любые две питающие фазы из трех (рис. 3.24).

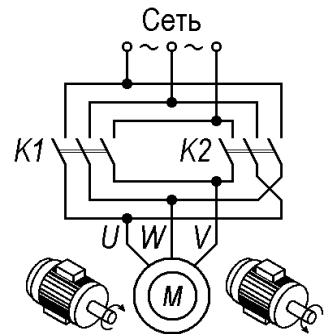


Рис. 3.24. Изменение направления вращения АД

При включенных контактах $K1$ и отключенных $K2$ на двигатель подается трехфазное напряжение с прямым чередованием фаз, а при включенных контактах $K2$ и отключенных $K1$ – напряжение с обратным чередованием фаз (изменено подключение первых двух фаз).

3.12. Способы торможения асинхронных двигателей

После отключения АД от источника питания проходит определенное время до полной остановки вращающихся масс (ротора и рабочей машины) называемое, «свободным выбегом». При большом моменте инерции оно весьма значительно и может уменьшать производительность

рабочей машины. Торможение используют для сокращения времени остановки, замедления движения, что позволяет повысить эффективность работы оборудования.

В режиме торможения двигатель должен создавать момент, противодействующий движению рабочей машины. В определенных режимах работы тормозной момент может возникать естественно в соответствии с механической характеристикой (см. п. 3.14), или создаваться искусственно путем перевода асинхронной машины в нехарактерные для нее режимы работы.

Как следует из п. 3.14, в подключенном к сети АД тормозной момент может возникнуть в режиме генератора $n_2 > n_1$ ($s < 0$) и в режиме электромагнитного тормоза ($n_2 < 0$, $s > 1$).

Для торможения могут также использоваться различные составляющие токов при переходных процессах после выключения, а также остаточное намагничивание.

Торможение противовключением осуществляется при реверсировании двигателя на ходу путем изменения чередования фаз питающего напряжения на выводах обмотки статора (силовая схема переключения питающих фаз аналогична рис. 3.24).

На рис. 3.25 изображены механические характеристики АД в режиме двигателя и при торможении противовключением. В момент реверсирования направление вращения магнитного поля и направление действия создаваемого им электромагнитного момента практически мгновенно изменяются на обратное (переход из точки A_1 в точку A_1'), в то время как ротор по инерции продолжает вращаться в ту же сторону. Возникает режим электромагнитного тормоза (характеристика $1'$ на рис. 3.25). Схема управления этим режимом должна предусматривать отключение от источника питания в момент (точка B_1') остановки двигателя. Иначе он начнет разгоняться в противоположную сторону.

В режиме противовключения по обмоткам двигателя протекают токи, превышающие пусковые, что вызывает потери энергии, которые могут быть в 2–3 раза больше потерь в процессе пуска и вызывать быстрый нагрев двигателя.

В цепь фазного ротора при торможении обычно вводятся добавочные сопротивления (см. рис. 3.19), что позволяет увеличить тормозной момент и одновременно ограничивать ток (характеристика $2'$ на рис. 3.25).

Торможение противовключением весьма эффективно и широко применяется в механизмах передвижения кранов и др.

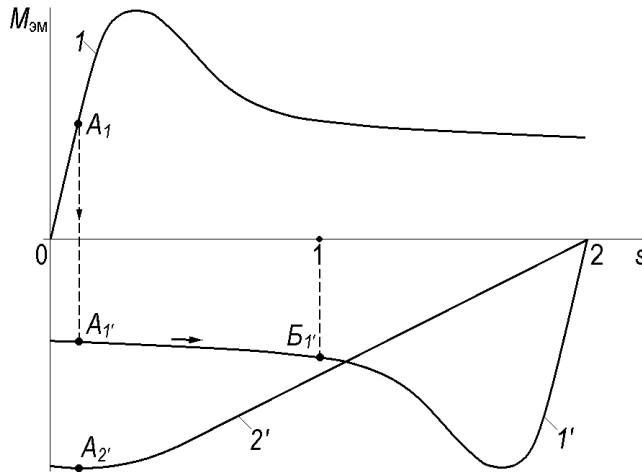


Рис. 3.25. Торможение АД противовключением:

1, 1' – естественные механические характеристики при прямом и обратном включении;
2' – механическая характеристика двигателя с фазным ротором при обратном включении с добавочным сопротивлением в цепи ротора

Электродинамическое торможение осуществляется путем подключения контактом K2 выводов двух фаз обмотки статора к источнику постоянного тока на (рис. 3.26, а). В частности, таким источником может быть выпрямитель, подключенный через трансформатор к той же сети, что и двигатель, так как для создания постоянного тока необходимой силы (примерно, на 30% выше номинального) требуется значительно меньшее напряжение. Перед торможением двигатель отключается от питающей сети переменного тока контактами K1.

При питании постоянным током обмотка статора АД создает неподвижное в пространстве многополюсное магнитное поле, неизменное во времени. При вращении проводники обмотки ротора пересекают силовые линии магнитного поля, и в них индуцируется ЭДС, вызывающая ток. Взаимодействие обтекаемых током проводников обмотки ротора с магнитным полем статора создает тормозной электромагнитный момент, приводящий к останову двигателя. При этом кинетическая энергия вращающихся масс расходуется в основном на нагрев обмотки ротора. Время выбега зависит от величины тормозного момента и запасенной кинетической энергии электропривода.

Как и в двигательном режиме в процессе торможения частота f_2 тока в обмотке (в системе координат ротора) уменьшается от некоторого значения до нуля, что следует из формулы (3.6) при неподвижном поле статора: $f_2 = pn_2$. Это позволяет использовать механическую характеристику этом режиме в качестве тормозной $M_{\text{торм}}(n_2)$ (рис. 3.26, б). При $n_2 = 0$ она проходит через начало координат.

При отключении двигателя от сети переменного тока и подключении к источнику постоянного тока рабочая точка переместится из точки A механической характеристики рабочего режима в точку B характеристики тормозного режима, а затем по мере торможения и остановки – в начало координат.

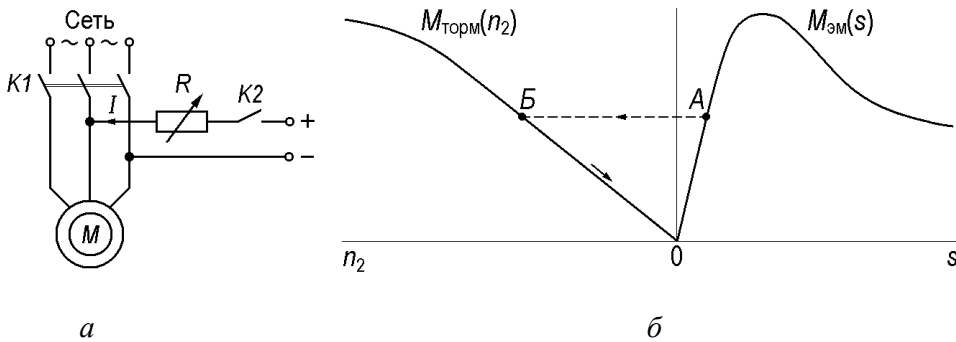


Рис. 3.26. Электродинамическое торможение АД:

a – схема подключения; b – механические характеристики в рабочем режиме $M_{эм}(s)$ и при торможении $M_{торм}(n_2)$

Как видно из характеристики $M_{торм}(n_2)$ на рис. 3.26, b при снижении частоты вращения n_2 тормозной момент уменьшается, что является недостатком рассматриваемого способа торможения.

При электродинамическом способе торможения двигателя можно плавно изменять тормозной момент путем регулирования постоянного тока в цепи статора (при ненасыщенной магнитной системе тормозной момент пропорционален току) или напряжением источника, или сопротивлением R . В АД с фазным ротором на режим торможения можно также влиять введением сопротивления в цепь ротора (аналогично схеме на рис. 3.17).

Рекуперативное торможение (от латинского «recuperatio» – обратное получение) с возвратом энергии в сеть осуществляется путем перевода АД в генераторный режим (см. рис. 3.13). Оно является наиболее экономичным в сравнении с другими способами торможения, при которых энергия теряется. Как указывалось выше (см. п. 3.14), в режиме генератора необходимо, чтобы частота n_2 вращения ротора превышала синхронную частоту вращения поля n_1 . В условиях питания от промышленной сети это может быть реализовано в электроприводе грузоподъемных машин при включении двигателя на спуск груза, который своим весом разгоняет ротор до скорости выше синхронной. При этом потенциальная энергия груза преобразуется в электрическую энергию, отдаваемую в сеть.

Рекуперативное торможение может быть также использовано на транспорте при движении под уклон или при торможении перед остановкой. В первом случае потенциальная, а во втором кинетическая энергии преобразуются в электрическую.

Торможение при частотном управлении. В частотно-регулируемых приводах реализуется инверторное торможение и рекуперативное торможение. При малых скоростях применяется и рассмотренное выше электродинамическое торможение, когда в обмотку статора АД подается постоянный ток от преобразователя частоты.

Принцип **инверторного торможения** рассмотрим по схеме (рис. 3.27), которая состоит из промежуточного звена постоянного тока, содержащего неуправляемый выпрямитель B и Γ -образный L - C фильтр на его выходе, а также автономного инвертора напряжения (АИН), питающего обмотку статора АД. Тормозной резистор R , на котором рассеивается кинетическая энергия вращающихся масс, включается на шины постоянного тока с помощью управляемого электронного ключа K .

Инверторное торможение АД является одним из способов электродинамического торможения. Двигатель переводится в режим генератора путем задания с помощью автономного инвертора напряжения (АИН) такой частоты питания обмотки статора, при которой частота вращения поля в процессе торможения ниже частоты вращения ротора. При снижении частоты питающего напряжения частота вращения ротора уменьшается за счет тормозного момента вплоть до полной остановки. Генерируемая при торможении энергия рассеивается на тормозном резисторе R , который включается с помощью электронного ключа K .

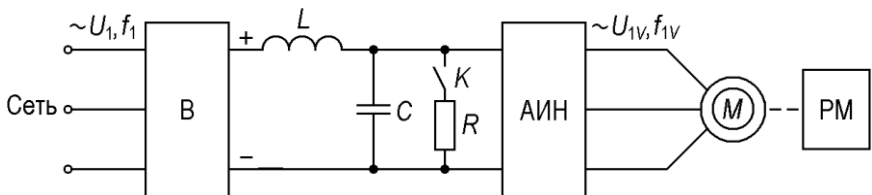


Рис. 3.27. Функциональная схема инверторного торможения

Этот способ торможения получил широкое применение для автономных электроприводов: крановые и др. Основным его недостатком является отсутствие возможности возврата энергии в сеть.

При **рекуперативном торможении** значительная часть энергии вращающихся масс может быть возвращена обратно в сеть. Соответствующая функциональная схема привода в целом аналогична рис. 3.27. Для рекуперации энергии в сеть выпрямитель должен быть заменен на преобразователь, собранный на управляемых ключах по реверсивной

схеме (двухкомплектный). Управление частотным преобразователем производится одним из импульсных методов.

От шины постоянного тока этого преобразователя через АИН получают питание отдельные частотно-управляемые приводы. Когда некоторый привод переводится в режим генераторного торможения, другие приводы потребляют эту энергию. Получается переток энергии от одного привода к другому.

Если баланс смещается в сторону генерации, то напряжение на шине постоянного тока начинает возрастать и преобразователь рекуперировывает энергию постоянного тока в сеть.

3.13. Однофазные асинхронные двигатели

3.13.1. Общие сведения

Однофазными двигателями называют потому, что они получают питание от однофазной сети переменного тока. Существует ряд их разновидностей: конденсаторные, с пусковой обмоткой, с экранированными (расщепленными) полюсами и др. На статоре они имеют двухфазную обмотку (одна из фаз может включаться только на время пуска), на роторе – короткозамкнутую.

Как показано ниже, в «чистом» однофазном исполнении такие двигатели не имеют пускового момента. Поэтому в явном или неявном виде они имеют двухфазную обмотку на статоре. В явном – конденсаторные двигатели, двигатели с пусковой обмоткой (включается только на период пуска), в неявном – двигатели с экранированными (расщепленными) полюсами.

По энергетическим и пусковым характеристикам (КПД, $\cos\varphi$, пусковой момент, перегрузочная способность) однофазные АД уступают трехфазным и преимущественно применяются в тех случаях, когда отсутствует трехфазная сеть, в частности, в бытовой технике. Также они используются в качестве исполнительных двигателей в автоматике. В качестве однофазного может быть использован трехфазный АД, для чего используются специальные схемы включения с фазосдвигающими элементами (обычно – конденсаторами).

Чисто однофазный АД с одной обмоткой (фазой) на статоре при подключении к сети не может самостоятельно раскрутиться из-за отсутствия пускового момента. Рассмотрим причины этого явления.

Однофазная обмотка создает пульсирующее магнитное поле (см. любое из выражений (2.15)), которое в течение одного полупериода изменения переменного тока имеет одно направление вдоль оси обмотки, а в течение другого – противоположное. В соответствии с правилами

тригонометрии, например, первая формула в (2.15) может быть преобразована к виду:

$$F_u = F_m \cos p\alpha \sin \omega t = 0,5F_m \cos(\omega_1 t - p\alpha) + 0,5F_m \cos(\omega_1 t + p\alpha).$$

Слагаемые правой части по форме подобны (2.16) и поэтому могут быть интерпретированы как прямо и обратно вращающиеся волны МДС половинной амплитуды, каждая из которых возбуждает собственное вращающееся магнитное поле (рис. 3.28).

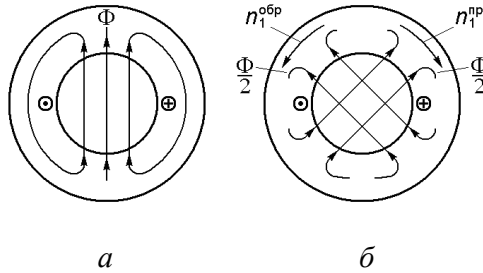


Рис. 3.28. Пульсирующее по оси однофазной обмотки магнитное поле (а) и его разложение на прямо и обратно вращающиеся поля (б)

К создаваемым ими моментам может быть применен принцип наложения: результирующую механическую характеристику можно получить путем сложения характеристик, обусловленных каждым из полей (рис. 3.29) по отдельности.

Используя принцип наложения, можно считать, что каждое из полей индуцирует в обмотке ротора «свои» токи соответствующей частоты: $f_{2пр} = f_1 s$, $f_{2обр} = f_1(2 - s)$. При неподвижном роторе ($s = 1$) токи, индуцированные в его обмотке, и их частоты равны. Поэтому зависимости от скольжения электромагнитных моментов (рис. 6.2), обусловленных прямо и обратно вращающимися полями ($M_{пр}(s)$ и $M_{обр}(s)$) взаимно симметричны относительно точки $s = 1$: $M_{пр}(1 - s) = -M_{обр}(1 + s)$.

Используя принцип наложения, можно считать, что взаимодействие токов с прямо и обратно вращающимися полями при неподвижном роторе создает равные и противоположно направленные вращающие моменты. Результирующий момент $M(s) = M_{пр}(s) + M_{обр}(s) = 0$. То есть АД с однофазной обмоткой не способен самостоятельно разогнаться.

При $s \neq 1$ действующий на ротор результирующий момент M , как видно из рис. 3.29, отличен от нуля. Если ротор с помощью внешних сил привести во вращение в какую-либо сторону, то один из моментов станет преобладать, равновесие нарушится, двигатель раскрутится в эту сторону и может нести соответствующую нагрузку.

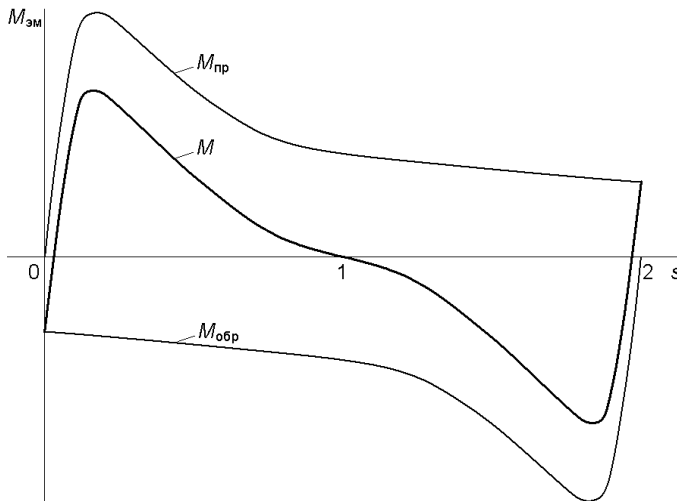


Рис. 3.29. Механические характеристики для прямо ($M_{пр}$) и обратно ($M_{обр}$) вращающихся полей и результирующая (M)

Для создания в однофазных АД пускового момента, необходимы дополнительные конструктивные решения.

3.13.2. Асинхронные двигатели с пусковой обмоткой

Эти двигатели имеют на статоре рабочую (РО) и пусковую (ПО) обмотки (рис. 3.30, а), обычно занимающие, соответственно, $2/3$ и $1/3$ пазов сердечника.

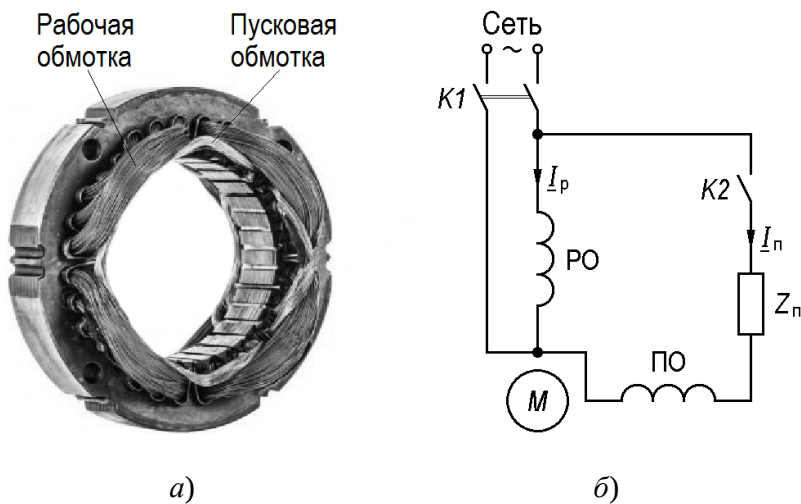


Рис. 3.30. АД с пусковой обмоткой:
а – статор; б – схема включения

При указанном числе пазов, занимаемых рабочей и пусковой обмотками, из разложения (2.4) исключается третья пространственная гармоника МДС обмоток, оказывающая негативное влияние на работу двигателя. Магнитные оси обмоток сдвинуты относительно друг друга в пространстве на электрический угол, равный $\pi / 2$.

Рабочая и пусковая обмотки присоединяются к одной и той же однофазной сети (рис. 3.30, б).

Пусковая обмотка подключается к сети кратковременно (на период пуска), что дает возможность выполнить ее из проводников меньшего сечения. Как следствие, она имеет большее, чем у рабочей обмотки, активное сопротивление, что в большинстве случаев позволяет избежать дополнительной установки резисторов, которые должны быть рассчитаны на пусковой ток. Из-за различных активных сопротивлений обмоток возникает некоторый сдвиг по фазе между их токами I_p и I_n . В совокупности со сдвигом в пространстве это приводит к образованию эллиптического вращающегося магнитного поля (см. п. 2.10), при котором двигатель имеет пусковой момент $M_{\text{пус}}$ (рис. 3.31, участок механической характеристики 1).

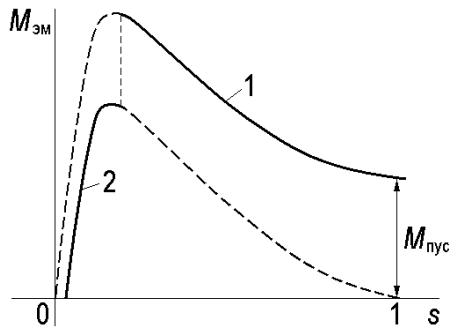


Рис. 3.31. Механическая характеристика однофазного АД с пусковой обмоткой:

- 1 — при включенных рабочей и пусковой обмотках;
2 — при включенной рабочей обмотке

Для большего приближения эллиптического поля к круговому и увеличения пускового момента $M_{\text{пус}}$ последовательно с пусковой обмоткой может дополнительно включаться фазосдвигающий элемент Z_n : резистор, конденсатор или катушка (см. рис. 3.30, б).

После разгона пусковая обмотка отключается, двигатель развивает вращающий момент посредством только рабочей обмотки (рис. 3.31, участок механической характеристики 2).

3.13.3. Конденсаторные асинхронные двигатели

Конденсаторными называют однофазные по питанию двухфазные асинхронные двигатели, в которых в качестве фазосдвигающего элемента используется конденсатор. Наличие двух фаз с подключением одной из них через конденсатор позволяет приблизить технико-экономические характеристики этих двигателей к трехфазным, что расширяет сферу их применения. Если конденсаторные двигатели являются модификацией некоторого основного исполнения, их конструкция в значительной степени ему соответствует (рис. 3.32). Основное отличие – пристроенный рабочий конденсатор 1, который соединяется с одной из фаз в коробке выводов 2. В соответствии с ГОСТом такие двигатели выпускаются в тех же конструктивных исполнениях, что и трехфазные (см. рис. 2.2).

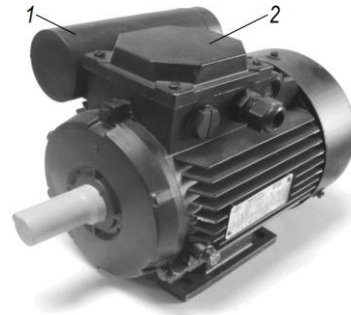


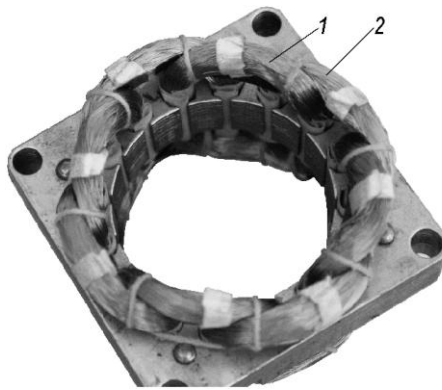
Рис. 3.32. Конденсаторный АД серии АИРЕ:
1 – рабочий конденсатор; 2 – коробка выводов

Конденсаторные двигатели выполняются на мощность до 3 кВт и применяются в электроприводах бытового, сельскохозяйственного и промышленного назначения различных механизмов (насосы, вентиляторы, кормоизмельчители, деревообрабатывающие станки, и др.).

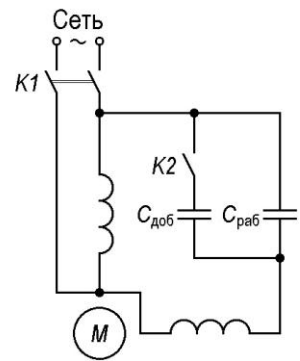
По устройству эти двигатели являются двухфазными (рис. 3.33, а) с короткозамкнутым ротором. На статоре уложены две одинаковые обмотки (фазы), обычно занимающие равное число пазов, которые подключены к однофазной сети и в пусковом, и в рабочем режимах (рис. 3.33, б). Для образования вращающегося магнитного поля магнитные оси обмоток сдвинуты относительно друг друга в пространстве на электрический угол, равный $\pi/2$, и в цепь одной из фаз включен фазосдвигающий элемент – конденсатор (рис. 3.32, б). Его емкость рассчитывают таким образом, чтобы разность фаз у токов обмоток был близок к $\pi/2$. Как следует из схемы замещения АД (см. рис. 3.11), при изменении скольжения s ее эквивалентные параметры изменяются. Поэтому для каждого режима работы существует своя оптимальная рабочая емкость, которая обычно рассчитывается для номинального или

наиболее вероятного режима работы. Она прямо пропорциональна мощности двигателя (номинальному току) и обратно пропорциональна напряжению. Необходимые рекомендации по ее определению имеются в справочных руководствах.

Пусковой момент конденсаторного двигателя с емкостью, рассчитанной на номинальный режим работы, составляет обычно 0,25–0,4 номинального значения. Для увеличения пускового момента оптимальная пусковая емкость $C_{\text{пус}}$ конденсатора должна быть увеличена в 2,5–3 раза. Обычно ее собирают из параллельно включенных рабочего $C_{\text{раб}}$ и добавочного $C_{\text{доб}}$ (пускового) конденсатора: $C_{\text{пус}} = C_{\text{раб}} + C_{\text{доб}}$ (см. рис. 3.32, б). Добавочный конденсатор подключают на время пуска, после чего отключают.



а)



б)

Рис. 3.33. Конденсаторный АД малой мощности:

а – статор; б – схема включения;

1, 2 – фазы обмотки

Для изменения направления вращения конденсаторного АД необходимо изменить на противоположное подключение выводов одной из двух его обмоток.

Учебное издание

Сотников Владимир Васильевич

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Часть 1. Трансформаторы. Общие вопросы теории электрических машин. Асинхронные двигатели

Учебное пособие

Редактор В. И. Пустовая

Подписано в печать 09.09.19. Формат 70×100/16. Усл. печ. л. 12,9. Уч.-изд. л. 13,9.

Тираж 135 экз. Заказ № Цена

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете
им. В. Г. Шухова

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46