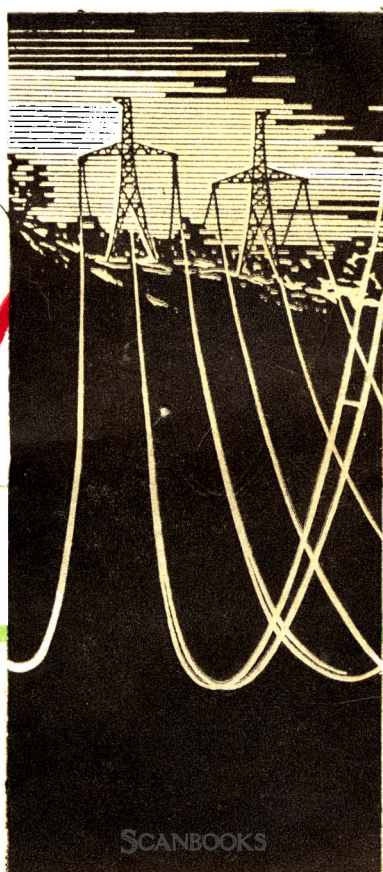


М.С. ЛИБКИНД  
И.М. МАРКОВИЧ

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО В ПУТИ



М. С. ЛИБКИНД,  
И. М. МАРКОВИЧ

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО В ПУТИ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1975

6П2.1  
Л 55  
УДК 621.315

**Либкинд М. С. и Маркович И. М.**

Л 55    Электричество в пути. Изд. 2-е. М., «Энергия», 1975.

112 с. с ил.

В книге рассказывается, откуда получается электрическая энергия, как она передается на большие расстояния и распределяется между отдельными электроприемниками. Основное внимание обращено на физические основы транспорта электроэнергии и принципиальные технические решения, применяемые в современной электроэнергетике. Изложение ведется на уровне школьного курса физики.

Книга рассчитана на широкий круг любознательных читателей различного возраста и профессий, желающих получить общее представление о современной технике передачи и распределения электрической энергии.

Книга может быть полезна учащимся старших классов средней школы и техникумов, а также студентам высших учебных заведений, не специализирующимся в области электроэнергетики.

Л  $\frac{30311-352}{051(01)-75}$  - 1-75

6П2.1

*Посвящается светлой памяти  
Г. М. Кржижановского*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Электрическая энергия — основа современной цивилизации. Эта истина становится очевидной для всех при первой крупной аварии в энергетической системе, когда внезапно исчезает электрическая энергия. Нет привычного света в квартирах и магазинах. Улицы города погружаются во мрак. Умолкают радиоприемники, меркнут экраны телевизоров и кинотеатров. Останавливаются поезда метро, в вагонах темно и душно, так как не работает вентиляция. Стоят трамваи, троллейбусы и электропоезда. Бездействуют телефонные и телеграфные аппараты. Не вращаются валы электрических двигателей, остывают электрические печи, в которых плавился металл и выпекался хлеб. Прекращается производство на фабриках и заводах.

Такое случилось в 1965 г. в США, когда один из крупнейших городов мира, Нью-Йорк, более 10 ч оставался без электрической энергии. К счастью, подобные аварии бывают очень редко.

Значение электрической энергии для общества продолжает возрастать. Возникают все новые применения в промышленной технологии (окраска изделий в электрическом поле, электропрядение и др.), в сельском хозяйстве (электрические ловушки для насекомых и др.), в медицине и других областях человеческой деятельности. Расширяется использование электрической энергии для приготовления пищи и кондиционирования воздуха в общественных и жилых зданиях. В будущем можно ожидать появления в городах электромобилей, может быть — движущихся тротуаров и т. п.

Потребление электрической энергии неуклонно возрастает. За последние 10 лет мировое производство электрической энергии примерно удвоилось, а в Совет-

представляющий собой тепловую машину, преобразует тепловую энергию горячих газов в механическую энергию движущегося автомобиля. Ввод энергии в автомобильный двигатель осуществляется в форме химической энергии жидкого топлива.

Преобразование одного вида энергии в другой происходит во всяком действующем устройстве. Электрическая плитка, нагревая воду, преобразует электрическую энергию в тепловую. Электрический двигатель, вращая колеса троллейбуса, преобразует электрическую энергию в механическую. В лампе накаливания электрическая энергия преобразуется в лучистую энергию. Практическое использование энергии невозможно без серии превращений ее из одного вида в другой, всегда сопровождаемых рассеянием некоторого количества энергии в пространстве.

**Виды энергии.** Вид энергии (химическая, тепловая, механическая, электрическая и др.) определяет ее качественное своеобразие, возможность использовать для того или иного конкретного применения. Присмотримся к особенностям различных видов энергии и начнем с возможностей ее транспорта, т. е. передачи на расстояние.

Сибирский уголь привезли на Урал; тюменскую нефть доставили по трубам в Омск, а саратовский газ — в Москву. Органическое топливо (уголь, нефть, газ) перемещается на тысячи километров; вместе со своим энергоносителем на большое расстояние перемещается и химическая энергия топлива.

Тепловая энергия горячей воды передается не более чем на несколько десятков километров. При больших расстояниях получают недопустимые потери тепловой энергии из-за охлаждения энергоносителя.

Еще менее транспортабельна механическая энергия вращательного движения, которую практически невозможно передать на расстояние, превышающее несколько десятков метров, из-за потерь энергии и несоразмерных затрат на сооружение передающих устройств.

Электрическая энергия передается на большое расстояние при сравнительно небольших транспортных потерях. В СССР уже осуществлены передачи электроэнергии на расстояние 850 км от Волжской гидроэлектростанции имени В. И. Ленина и на 1000 км от Волжской гидроэлектростанции имени XXII съезда КПСС. Ведется

подготовка к созданию электропередачи на 2000 км, чтобы направить поток дешевой электроэнергии из Сибири в центральные районы европейской части страны. Но и это расстояние не является предельным.

Важное значение имеет возможность создавать запасы энергии. Топливо на складе тепловой электростанции — это запас химической энергии. Гидроэлектрические станции получают воду из водохранилищ, которые представляют собой запас механической энергии, приводящей в движение гидравлические турбины станции. В малом количестве можно запастись тепловой энергией и энергией вращательного движения. Электрическую энергию пока не умеют накапливать в количестве, достаточном для практических целей. Поэтому вся выработанная электрическая энергия немедленно используется, т. е. превращается в другие виды энергии в процессе полезной работы.

С другой стороны, электрическая энергия абсолютно превосходит все используемые виды энергии, за исключением лучистой, в скорости распространения: за 1 с она передается в пространстве на 300 000 км. От Владивостока до Москвы — за 0,03 с!

Замечательная подвижность электрической энергии объясняется тем, что масса ее носителя, электромагнитного поля в тысячи миллиардов раз меньше (при одинаковом запасе энергии), чем масса других известных энергоносителей (движущейся воды, угля, нефти, газа). Но отличие имеется не только в скорости. Распространение поля и связанной с ним электрической энергии — это своеобразный волновой процесс, не похожий на перемещение концентрированной массы прочих энергоносителей. Процессы такого типа используются во многих областях техники. К ним относятся, например, передача тепловой энергии движущихся молекул путем теплопроводности, поток энергии ультразвуковых колебаний и др. Волновой перенос энергии осуществляют морские волны, пока еще бесполезно растрачивающие ее в береговом прибое.

Электромагнитные поля, с которыми имеют дело электроэнергетики, в отличие от электромагнитных световых излучений, органами чувств человека непосредственно не воспринимаются. Может быть, поэтому говорят о передаче электрической энергии, не вспоминая о ее носителе — электромагнитном поле. При общих рассуж-

ском Союзе почти утроилось. На XXIV съезде КПСС была принята новая грандиозная программа электрификации страны; к 1975 г. выработка электрической энергии возросла главным образом за счет сооружения электрических станций большой мощности.

Чтобы довести этот гигантский поток электроэнергии до потребителей (на заводы и железные дороги, в города, совхозы и колхозы), требуется густая сеть линий электропередачи. В настоящее время для передачи электроэнергии используется более 400 тыс. км линий напряжением от 35 до 750 кВ и в десятки раз больше линий низшего напряжения. Предстоит добавить к имеющейся сети еще миллионы километров линий различных напряжений, чтобы завершить электрификацию всего Советского Союза.

По воздушным и подземным (кабельным) линиям электрическая энергия непрерывно поступает от генераторов электростанций к ее приемникам у потребителей. *Электричество все время в пути.*

Энергетическими артериями страны и питающими их электростанциями ведают электроэнергетики. Мы хотим приобщить читателя к кругу вопросов, которые приходится решать инженеру, избравшему профессию электроэнергетика. Рассказ будет о получении электрической энергии, о том, как она передается на большие расстояния и распределяется на месте между потребителями.

Вопросы транспорта, т. е. передачи и распределения электрической энергии, нельзя обсуждать, не пользуясь рядом специальных понятий, таких как напряжение, ток, сопротивление, электрическое и магнитное поля и др. Читатель, знакомый с электротехникой только по средней школе, нуждается в напоминании основных понятий и законов этой области знания. Поэтому в книге даны краткие пояснения по мере того, как они требуются для лучшего понимания текста.

## Глава первая

### ПЕРВОЕ ЗНАКОМСТВО

**Преобразование энергии.** Для того чтобы могли действовать сотни тысяч, миллионы различных электродвигателей, светильников и других электрических устройств, нужна электрическая энергия. Непосредственно в природе такой энергии нет. Имеются запасы энергии других видов, из которых получается электрическая энергия. Общие запасы энергии нашей планеты достаточно велики. Использование энергии атомного ядра на обозримый период времени снимает вопрос об «энергетическом голоде», который вызывал беспокойство ученых 30—40 лет тому назад. Сейчас вопрос ставится по другому: какие запасы энергии использовать в первую очередь для получения электрической энергии и как это сделать при наименьших затратах человеческого труда, т. е. наиболее экономичным способом.

Преобразование энергии, к сожалению, всегда связано с ее рассеянием. Это можно пояснить на простом примере получения тепловой энергии из электрической. Обычная электрическая плитка мощностью 600 Вт расходует за 1 ч количество электроэнергии, равное

$$600 \cdot 1 = 600 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 0,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

За это время на плитке можно нагреть до кипения около 3 л воды с начальной температурой 10 °С. Теоретический расход энергии на нагревание 3 л воды от 10 до 100 °С составляет всего 0,32 кВт · ч. Часть тепловой энергии, а именно 0,28 кВт · ч, расходуется на нагревание воздуха, т. е. используется не по назначению или рассеивается.

Для работы электрических машин и приборов необходима электрическая энергия. Автомобильный двигатель,



дениях это не вызывает недоразумений. Но чтобы понять, как передается электрическая энергия, придется в дальнейшем ознакомиться с некоторыми свойствами электромагнитного поля.

Важной характеристикой вида энергии является удобство использования: возможность управлять процессом преобразования энергии и простота необходимых для этого технических средств; готовность к немедленному действию; безопасность для людей.

Для иллюстрации обратимся к такой несложной энергетической «установке», как печь для отопления жилья. Вам приходилось когда-нибудь топить печь? Работа начинается с прогулки за дровами. Набирая охапку дров, прихватите для растопки березовую кору или еловые плашки, из которых можно настругать лучины. Закладывайте дрова в печку не слишком плотно, чтобы оставить доступ воздуха, и не слишком свободно, чтобы уложить все поленья. Дрова заложены, растопка в печи, поджигайте. Если вы не забыли открыть вьюшки, если дрова сухие, если дымоход не забит сажей, если печь не выстужена слишком сильно, то дрова загорятся. Превращение химической энергии дров в тепловую пойдет дальше само собой. Только не забывайте «управлять» процессом: поворачивать и передвигать дрова в топке с помощью кочерги.

Теперь представим себе, что печка оборудована газовой форсункой. С энергетической точки зрения мало что изменилось: химическая энергия топлива по-прежнему преобразуется в тепловую. Но насколько удобнее пользоваться газообразным топливом, чем твердым! Поворотом рукоятки открываете доступ газа к форсунке. Нажали кнопку и поджигайте запальник. Через 40—50 с можно отпустить кнопку: клапан будет удерживаться в открытом состоянии тепловым автоматом, нагретым пламенем запальника. Повернули еще один кран — и веселое гудение горящего газа наполняет комнату. Если горение газа почему-либо прекратится, то автомат перекроет газовую магистраль. Необходимая предосторожность: нельзя разжигать печь, заполненную смесью несгоревшего газа с воздухом, так как может произойти взрыв. Такие случаи, к сожалению, бывают при сжигании газа в топках.

А если использовать для отопления электрическую энергию? Такое отопление всегда готово к действию и пускается в ход кнопкой. Не требуется дымоходов и лет

угрозы взлететь на -воздух. Легко автоматизировать отопление, обеспечив поддержание неизменной температуры в квартире. Когда-нибудь все жилые и общественные помещения будут не только освещаться, но и отапливаться электрической энергией. Сегодня это еще слишком дорого и может быть применено только в исключительных случаях.

Простота преобразования энергии данного вида в другие виды, транспортабельность, хранимость, готовность к действию, управляемость, безопасность — таковы качественные характеристики энергии, весьма важные в практической деятельности человека. Энергия предстает перед нашим мысленным взором как нечто многостороннее, разнообразное, имеющее свои особенности, которые оборачиваются недостатками в одних случаях использования и достоинствами в других.

**Электрическая энергия.** Из всех известных в настоящее время видов энергии электрическая энергия наиболее удобна для использования во всех отраслях народного хозяйства и для бытовых целей. Именно поэтому коммунистическое общество, применяющее самую передовую технику в целях максимального благополучия и удобств для человека, строится на основе сплошной электрификации.

Природная электрическая энергия встречается на нашей планете в таком состоянии, что не может быть использована в энергетических целях. В самом деле, ни атмосферные электрические явления (молния, полярное сияние, огни св. Эльма), ни животное электричество (электрические рыбы) нельзя заставить работать на человека из-за непостоянства действия и малого количества энергии этих природных источников. Мощность грозового разряда может превосходить мощность крупной электростанции в десятки раз, но связанное с ним количество электроэнергии ничтожно мало вследствие кратковременности процесса. При полном использовании энергии одного грозового разряда ее хватило бы для того, чтобы вскипятить 100 л воды. За счет электроэнергии десяти тысяч крупных электрических угрей можно обеспечить движение электропоезда на протяжении нескольких минут. На возобновление заряда понадобились бы сутки, в течение которых поезд был бы вынужден стоять.

Человеческое общество получает столь необходимую ему электрическую энергию из энергии других видов.

В первых источниках электрической энергии осуществлялось прямое преобразование химической энергии (гальванические элементы). С помощью гальванических элементов были обнаружены и обследованы многие электрические явления; от них получали энергию первые электротехнические устройства. Однако вследствие высокой стоимости химических источников, медленного их действия и ограниченного запаса энергии они не могли стать базой для широкого использования электрической энергии.

Современная электроэнергетика зародилась в середине XIX в., после открытия электромагнитной индукции, которое привело к созданию генераторов, преобразующих механическую энергию вращательного движения в электрическую. К тому времени уже применялось преобразование тепловой энергии водяного пара в механическую. Еще раньше была известна и широко использовалась энергия падающей воды (водяные колеса). Электромеханические генераторы удачно сочетались с цепочкой освоенных энергетических превращений: химическая энергия топлива — тепловая энергия пара — механическая энергия теплового двигателя или потенциальная энергия водохранилища — механическая энергия гидравлического двигателя. Они стали основным источником электрической энергии в энергетике нашего времени. В следующей главе мы расскажем об электромеханических генераторах и о некоторых новых тенденциях в генерации электрической энергии.

В 1970 г. мировое производство электрической энергии достигло 5000 млрд. кВт·ч, что составляет около 5% общего потребления энергии на земле. Преобладающая часть всей энергии (40%) используется непосредственно в форме тепла на отопление жилищ, приготовление пищи, на транспорте и в промышленности. Огромное количество энергии теряется, т. е. идет на нагревание воздуха (55%). Электрическая энергия занимает весьма скромное место в мировом потреблении. Но качественное своеобразие делает ее незаменимой, и трудно представить себе цивилизованную страну без развитой электроэнергетики.

Электрическая энергия производится на электростанциях, мощность которых измеряется сотнями тысяч и миллионами киловатт. От электростанций энергия поступает к многочисленным потребителям по линиям пере-

дачи, соединенным между собой в общую электрическую сеть. Совокупность электростанций, работающих на общую сеть, линий передачи и других элементов сети, о которых речь впереди, а также установок потребителей, использующих электрическую энергию (приемников энергии), образует энергетическую систему. Энергетические системы при дальнейшем их развитии объединяются посредством специальных линий передачи, так называемых межсистемных связей. В Советском Союзе процесс объединения закончится созданием Единой энергетической системы страны.

Централизация производства электрической энергии была предложена еще в плане ГОЭЛРО<sup>1</sup>, который предусматривал строительство крупных электростанций, обеспечивающих электроснабжение целых экономических районов. Крупными тогда считались электростанции мощностью в несколько десятков тысяч киловатт. В настоящее время в Советском Союзе действуют тепловые электростанции мощностью 2,4 млн. кВт и гидроэлектрические станции мощностью 6 млн. кВт. Электропередачи, предусмотренные планом ГОЭЛРО, были не длиннее 100 км, с напряжением до 110 кВ. Сейчас сооружены передачи на расстояние 1000 км, а напряжение достигло 750 кВ. Существенно изменился масштаб производства электроэнергии, но идея, заложенная в плане ГОЭЛРО, сохраняет свое значение.

Концентрация производства электрической энергии снижает стоимость электростанций и расходы на эксплуатацию, повышает к. п. д. оборудования, сокращает сроки строительства. Централизованное производство электроэнергии имеет неоспоримые экономические преимущества. По такому пути идет развитие электроэнергетики в СССР и других странах.

Чем мощнее электростанция, тем больше размеры обслуживаемого ею географического района. Для условий СССР расход энергии на душу населения в ближайшем будущем составит примерно 6000 кВт·ч в год. Если принять плотность населения обжитого района 100 чел. на 1 км<sup>2</sup>, то при 6000 ч работы электростанции в год удельная мощность составит  $\frac{6000 \cdot 100}{6000} = 100$  кВт/км<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> ГОЭЛРО — Государственный план электрификации России, принятый в 1920 г. Рассчитанный на 10—15 лет план ГОЭЛРО был выполнен к 1931 г.

Таким образом, электростанция мощностью в 2,4 млн. кВт может обслужить территорию в 24 000 км<sup>2</sup>, что соответствует квадрату со стороной около 150 км. При равномерной плотности потребления электрической энергии и при размещении станции в центре обслуживаемого района наибольшая длина передачи не превысила бы  $0,5 \cdot 150 \cdot \sqrt{2} = 105$  км.

В действительности путь электроэнергии может быть длиннее в несколько раз из-за неравномерной плотности населения и неодинакового расхода энергии. Затем местоположение станции не обязательно совпадает с центром района. Более того, она может находиться далеко за пределами обслуживаемого района: электростанции размещают там, где это целесообразно, например тепловые станции, — вблизи месторождения угля. Гидростанции всегда привязаны к тому месту на реке, в котором их можно поставить, независимо от местоположения потребителей. Атомные электростанции свободны от ограничений по условиям транспортировки энергоносителя: из 1 кг урана можно получить столько же тепловой энергии, сколько дает сжигание 2500 т каменного угля. Однако для их работы требуется большое количество пресной воды, которая имеется не везде.

В Советском Союзе насущной потребностью является транспорт энергии из Сибири в центральные районы. Дело в том, что 85% всех энергетических ресурсов находится на востоке страны, в то время как 3/4 всей потребляемой энергии расходуется в ее европейской части. Наряду с транспортировкой топлива по трубопроводам одним из возможных решений является передача электрической энергии. Для этого требуются линии электропередачи длиной 2000—3000 км, мощностью 6 млн. кВт и более.

Транспорт электрической энергии по проводам линий передачи имеет выдающееся значение для энергетики нашего времени. Без него невозможна полная электрификация страны.

## *Глава вторая*

### **ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

**Основной закон.** Вследствие того что на земле нет природных запасов электрической энергии, пригодных для пользования, ее получают из энергии других видов. Преобразование происходит в соответствии с законом сохранения и превращения энергии, а именно:

*численное значение полной энергии изолированной системы остается неизменным, какие бы превращения ни происходили в этой системе.*

В зависимости от рассматриваемого физического явления абстрактное понятие «изолированная система» обретает то или иное конкретное содержание. Но, скажем прямо, не просто его конкретизировать, потому что в изолированную систему, по определению, включаются лишь такие объекты, которые взаимодействуют только друг с другом и не взаимодействуют с другими объектами вне изолированной системы. Если учитывать все известные на сегодня виды взаимодействия, не считаясь с их значениями для интересующего нас процесса, то изолированная система всегда будет иметь космические размеры. Выход состоит в том, чтобы отбросить второстепенные связи. Закон сохранения и превращения энергии помогает разобраться в том, какими энергетическими преобразованиями можно пренебречь в данном случае.

Рассмотрим для примера энергетические соотношения при подъеме и свободном падении тела в поле земного тяготения. Некто поднял шар массой в 1 кг на высоту 1 м. На работу по преодолению силы тяготения затрачивается мускульная энергия. Количество работы, равное 1 кгс·м, является вместе с тем мерой расхода этой энергии. Шар не претерпевает никаких видимых изменений, но он уже не в точности то же самое, чем был до подъема: изменился, увеличился запас его энергии в поле земного тяготения на величину, равную выполненной работе; настолько же уменьшился запас мускульной энергии.

Выпущенный из рук шар падает отвесно вниз, предположим, на резиновый коврик. Коснувшись коврика, он подпрыгнет несколько раз, после чего придет в состояние покоя. Опыт можно повторить много раз, подымая шар на ту же высоту быстро или очень быстро, медленно или очень медленно, равномерно или неравномерно. Быстрый и неравномерный подъем потребует большего мускульного напряжения, но результаты опытов (число и высота отскоков шара) будут во всех случаях одинаковыми. Расход мускульной энергии, а стало быть, количество выполненной работы и приращение энергии поднятого шара не зависят от скорости подъема.

Если энергия шара увеличивается на 1 кгс·м за 2 с, то средняя скорость процесса равна 0,5 кгс·м/с; если за 0,2 с, то средняя скорость равна 5 кгс·м/с. Скорость изменения количества энергии называют мощностью.

*Способность выполнить работу зависит от количества энергии, способной совершить работу за определенное время — от мощности.*

Падение шара, кроме видимого движения, сопровождается еще следующими физическими явлениями. Постепенно уменьшается запас потенциальной энергии, зависящей от положения шара относительно земли; движущийся шар приобретает кинетическую энергию, зависящую от скорости движения. Количество энергии обоих видов в сумме остается неизменным. В момент соприкосновения с ковриком кинетическая энергия шара достигает наибольшей величины, а потенциальная энергия становится минимальной. Сжимая резину, шар продолжает двигаться с убывающей скоростью. Кинетическая энергия расходуется на преодоление упругости резины и частично на нагревание. После полной остановки шара начнется его перемещение в обратном направлении под действием сил упругости резины (пренебрегаем деформацией жесткого пола, на котором лежит ков-

рик). При этом энергия упругой деформации будет переходить в кинетическую энергию шара. В этом преобразовании часть энергии снова рассеется в виде тепла (внутреннее трение в резине). После нескольких преобразований процесс завершится и шар придет в состояние покоя. Мускульная энергия человека в конце концов преобразовалась в тепловую энергию коврика и шара, но были еще промежуточные преобразования в потенциальную и кинетическую виды энергии.

Изолированная система, о которой говорится в законе сохранения и превращения энергии, в рассмотренном примере состоит из земного шара, человека, экспериментального шара и коврика. Воздух не включен в эту систему, так как трение об него при подъеме и падении шара сопровождается столь малым выделением тепла, что можно пренебречь этим преобразованием энергии. Также мало аэродинамическое сопротивление воздуха при тех скоростях движения шара, которые имеют место. Другой пример изолированной системы — электрическая плитка, сосуд с водой, воздух (см. гл. I).

Закон сохранения и превращения энергии дает возможность свести измерение количества энергии одного вида к измерению количества энергии другого вида, например механической. Поэтому понятие энергии иногда определяют как «способность совершать работу» или как «эквивалент работы».

Иногда физические явления можно рассматривать так, что на первый план выступает сохранение энергии без существенного ее превращения в энергию другого вида. Создается видимость независимого существования различных видов энергии. Так возникли при постепенном развитии науки и техники различные единицы измерения энергии, которыми пользуются механики, теплотехники, электротехники. В настоящее время многие энергетики предпочитают измерять энергию любого вида в электротехнических единицах (кВт·ч). В этом можно усмотреть признание великой пользы электрической энергии.

**Промышленное производство электрической энергии.** Господствующим способом промышленного производства электрической энергии в наше время является преобразование механической энергии вращательного движения, осуществляемое в электрических генераторах. Генераторы приводятся в движение так называемыми первичными двигателями, которые получают энергию от потоков перегретого водяного пара или воды. Соответствующие электрические станции называют тепловыми или гидравлическими.

Если проследить дальше цепочку энергетических преобразований, то наибольшее разнообразие обнаружится у тепловых электрических станций. Тепло для превращения воды в пар и его дополнительного подогрева может быть получено из химической энергии топлива различных видов (газ, мазут, торф, бурый и каменный уголь) или из ядерной энергии. В Италии, Исландии и некоторых других странах для этой цели используется внутреннее тепло земного шара (горячие источники или гейзеры). Энергетические установки такого типа имеются и в Советском Союзе на базе горячих ключей Камчатки.

Гидравлические электростанции строятся на горных и равнинных реках. В последнем случае обычно устраивают большие водохранилища, что дает возможность регулировать поток воды через гидравлические турбины и тем самым скорость преобразования энергии (электрическую мощность станции).

Опубликованы предложения и технические схемы энергетического использования морского прилива. В Советском Союзе заканчивается сооружение приливной станции на Баренцовом море. Однако с позиций «большой» энергетики использование энергии моря находится в зачаточном состоянии.

В мировом производстве электрической энергии ведущая роль принадлежит тепловым электрическим станциям. В 1970 г. они выработали примерно 70% всей электрической энергии.

В дальнейшем удельный вес таких станций в общей выработке электрической энергии будет постепенно уменьшаться. Последняя треть XX в. станет свидетелем быстрого развития атомных электростанций, использующих ядерное топливо.

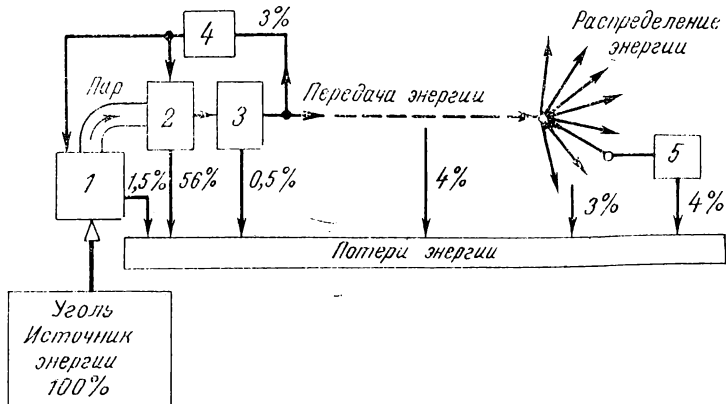


Рис. 1. Цепь энергетических преобразований при получении и использовании электрической энергии.

1 — паровой котел; 2 — турбина; 3 — электрический генератор; 4 — вспомогательные механизмы электростанции — «собственные нужды»; 5 — электродвигатель.

На рис. 1 показана цепь энергетических преобразований при получении электрической энергии на тепловой станции, при транспорте этой энергии и полезном ее использовании. На каждом этапе преобразования часть энергии теряется, рассеивается в окружающем пространстве в форме тепловой энергии. Как видно из рисунка, в паровом котле, турбине и электрическом генераторе теряется 58% энергии топлива; кроме того, 3% энергии расходуется на вспомогательные механизмы станции. Транспорт энергии дает 7% потерь, а в электродвигателях теряется еще 4% всей энергии.

Теряется — значит, не используется в наших целях: закон сохранения и превращения энергии при этом, конечно, не нарушается. Однако интересы человеческого общества нарушаются не только прямой растратой труда, но и вредным влиянием на биосферу планеты. Количество тепловых станций и их мощность столь велики, что отходы производства электрической энергии (дымовые газы и унос топлива, топочные шлаки) заметно загрязняют воздушный бассейн планеты и ее поверхность. Поэтому важнейшими задачами



являются совершенствование существующих способов преобразования энергии и поиски новых. Без электрической энергии теперь уже нельзя обойтись, но греть воздух вовсе не обязательно.

**Ток, напряжение и электрическое поле.** Электрический ток в металлических проводниках — это упорядоченное движение отрицательных зарядов, электронов, происходящее под действием электрического поля. Такой электрический ток называют током проводимости.

Наличие в проводнике электрического тока обнаруживается по магнитному и тепловому действию: вблизи проводника возникает

магнитное поле, а сам проводник нагревается. Интенсивность этих действий зависит от силы тока, под которой понимается количество электричества, проходящего через поперечное сечение проводника в единицу времени. Кроме величины, электрический ток характеризуется еще и направлением. Условно принято, что направление тока совпадает с направлением движения положительно заряженных частиц, т. е. противоположно направлению движения электронов. Тепловое действие тока проводимости

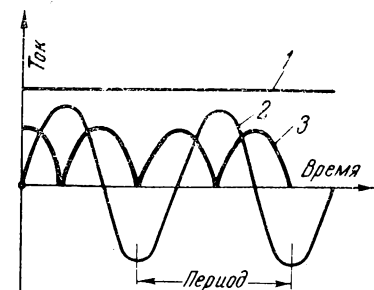


Рис. 2. Постоянный, синусоидальный и пульсирующий токи.

сти не зависит от направления, магнитное — зависит.

Если движение электронов происходит с постоянной скоростью, то величина и направление тока будут неизменными и ток называется постоянным. Если скорость движения электронов изменяется, то получается переменный ток, величина которого в каждый момент времени имеет другое численное значение. Направление переменного тока может оставаться неизменным или может изменяться с течением времени по какому-нибудь определенному закону. На рис. 2 показаны графики постоянного тока 1 и двух видов переменного тока: синусоидального 2 и пульсирующего 3. Величина пульсирующего тока изменяется так же, как и синусоидального, но направление остается без изменения.

Из рис. 2 видно, что мгновенные значения синусоидального тока, т. е. значения, соответствующие определенным моментам времени, систематически повторяются. Наименьший промежуток времени, по истечении которого повторяются все мгновенные значения, называют периодом электрического тока, а число периодов в секунду — частотой. Единица измерения частоты — герц (Гц) численно равна одному полному колебанию в секунду.

Синусоидальные переменные токи настолько часто встречаются в электроэнергетике, что о них обычно говорят коротко: «переменный ток», опуская прилагательное «синусоидальный». В этой книге упоминаются переменные токи только двух видов: синусоидальный переменный ток и пульсирующий. Поэтому мы также будем опускать прилагательное «синусоидальный».

Из опыта известно, что прохождение электрического тока сопровождается нагреванием проводников. Предположим, что по металлическому проводнику проходит постоянный ток. Количество выделяющейся тепловой энергии, как показали измерения Джоуля (1841 г.),

пропорционально времени прохождения тока и квадрату его величины

$$W = rI^2t, \quad (1)$$

где  $W$  — энергия;  $r$  — коэффициент пропорциональности;  $I$  — сила тока;  $t$  — время.

На основании закона сохранения и превращения энергии это выражение одновременно определяет и расход электрической энергии на рассматриваемом участке проводника, так как в данном случае происходит только одно преобразование энергии — электрической в тепловую.

Выражение (1) определяет расход энергии и в том случае, когда по проводнику проходит переменный ток. Буква  $I$  обозначает тогда действующее значение тока, численно равное значению эквивалентного постоянного тока, при прохождении которого выделяется в единицу времени такое же количество тепловой энергии, что и при данном переменном токе. Действующее значение переменного тока в  $\sqrt{2}$  раз меньше его максимального (амплитудного) значения.

Скорость преобразования электрической энергии, т. е. электрическая мощность, равна:

$$P = \frac{W}{t} = rI^2. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности  $r$ , являющийся мерой скорости преобразования энергии, называется электрическим сопротивлением проводника. Величина сопротивления зависит от материала проводника и его температуры, а также от геометрических размеров. Короткий проводник с большим поперечным сечением оказывает меньшее сопротивление электрическому току, чем длинный и тонкий.

Явление электрического тока иногда пытаются пояснить, исходя из существующего сходства между законами движения электричества в проводнике и жидкости в трубе. В действительности это сходство чисто внешнее и механизмы движений существенно различаются.

Электрический ток в металлах представляет собой движение «свободных», слабо связанных с атомами, электронов под действием электрического поля. Электроны пробегает очень короткий путь, порядка  $10^{-6}$  см, сталкиваются с атомами и передают им кинетическую энергию, запасенную при ускорении в электрическом поле. При этом усиливается беспорядочное движение атомов: электрическая энергия переходит в тепловую. Свободные электроны металла передают «электрическую эстафету» от атома к атому, и в проводнике устанавливается электрический ток. Это явление, скорее, похоже на волну, бегущую по поверхности моря, чем на течение жидкости в трубе, при котором каждый элементарный объем переносится по всей длине пути.

Однако в силу известной общности математического описания гидравлического и электрического видов движения можно установить формальное соответствие между понятиями гидравлики и электротехники. Так, расход жидкости, т. е. количество жидкости, протекающей в единицу времени через поперечное сечение трубы, аналогичен силе тока. Гидравлическое сопротивление трубы соответствует

электрическому сопротивлению проводника. Падение напора на участке трубопровода сопоставляется с электрическим напряжением.

Гидравлический напор в трубопроводе создается насосом. В электрической цепи роль насоса играет источник электрической энергии. Чем больше гидравлическое сопротивление трубопровода, тем меньше расход жидкости при данном напоре насоса. Аналогично обстоит дело в электрической цепи: при данном напряжении источника ток будет тем меньше, чем больше электрическое сопротивление цепи.

Для цепи постоянного тока, составленной из металлических проводников, три важнейших понятия электротехники — напряжение  $U$ , ток  $I$  и сопротивление  $r$  — связаны законом Ома (1827 г.)

$$U = rI. \quad (3)$$

Это соотношение получено из опыта.

Используя закон Ома, можно представить мощность постоянного тока в другом виде:

$$P = rI^2, \text{ или } P = rII = UI. \quad (4)$$

Если речь идет о мощности всей цепи, внешней по отношению к источнику электрической энергии, то  $U$  означает напряжение источника. Если речь идет о мощности на участке цепи, то  $U$  означает падение напряжения только на этом участке (рис. 3).

Электрическая энергия, преобразуемая в тепловую форму за время  $t$ , может быть представлена в соответствии с формулами (1) и (3) в виде

$$W = UI t. \quad (5)$$

Произведение тока на время ( $It$ ) представляет полное количество электричества, которое перемещается в проводнике за рассматриваемый промежуток времени. Обозначим это произведение буквой  $Q$ . Тогда

$$W = UQ. \quad (6)$$

Выражение (6) дает возможность установить связь между электрическим напряжением и напряженностью электрического поля в цепи постоянного тока.

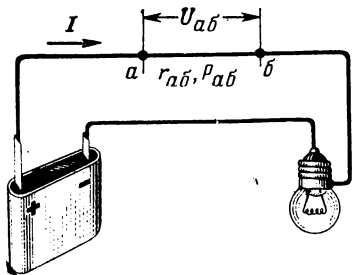


Рис. 3. Падение напряжения на участке цепи постоянного тока.

$$P_{ab} = I^2 r_{ab} = IU_{ab}.$$

Из опыта известно, что вокруг заряженных тел образуется электрическое поле. Электрический заряд, висевший в поле, испытывает механическое действие, т. е. притягивается или отталкивается (в зависимости от знака). Сила, действующая на неподвижный точечный положительный заряд, равный единице, называется напряженностью поля. Если точечный заряд содержит  $Q$  единиц, то механическая сила увеличивается в  $Q$  раз.

Движение электронов в проводнике происходит под действием

сил, обязанных своим происхождением электрическому полю. Количество работы, совершаемой этими силами, равно:

$$W = Fl = QEl, \quad (7)$$

где  $F$  — механическая сила, действующая на электроны;  $E$  — напряженность электрического поля;  $l$  — длина участка проводника.

Эквивалентом работы, численно ей равным, в случае постоянного тока является количество электрической энергии, определенное выражением (6). Сопоставляя два выражения для энергии (6) и (7), находим:

$$E = \frac{U}{l}. \quad (8)$$

Напряженность поля на участке проводника, обтекаемого постоянным током, прямо пропорциональна напряжению участка и численно равна падению напряжения на единицу длины проводника.

Напряжение участка цепи постоянного тока связано с электрическим полем этого участка. Соответственно электродвижущая сила (э. д. с.) источника электрической энергии зависит от поля внутри источника, которое создается в результате химической реакции, теплового или иного процесса. В отличие от электрического поля в проводнике поле источника существует и при отсутствии тока, когда цепь разомкнута. Электродвижущая сила источника электрической энергии численно равна напряжению на его зажимах при отсутствии тока.

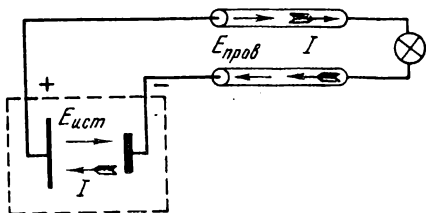


Рис. 4. Направление тока  $I$  и электрических полей  $E_{ист}$  и  $E_{прот}$  в цепи постоянного тока.

Электрическое поле внутри источника направлено навстречу току, протекающему через источник. Перемещение зарядов в источнике осуществляется при противодействии сил поля за счет химической, тепловой или иной энергии. Вне источника направление поля совпадает с направлением тока: во внешней цепи происходит обратное преобразование электрической энергии в тепловую (металлический проводник) или иного вида, например, в химическую (при зарядке аккумуляторов). Направление тока  $I$  и электрических полей  $E_{ист}$  и  $E_{прот}$  в цепи постоянного тока показано на рис. 4.

Понятия и соотношения, приведенные выше для постоянного тока, распространяются и на переменный ток, но с некоторыми изменениями. Так, например, напряжение и ток в цепи переменного тока связаны между собой не простым законом Ома [формула (3)], а похожим на него более сложным выражением, в котором приходится учитывать не только свойства проводящей цепи, но и ее расположение в пространстве, а также свойства окружающей среды. Особенности переменного тока, важные для транспорта электрической энергии, рассматриваются в последующих главах.

**Электрическая энергия из механической.** Преобразование механической энергии в электрическую, так же как и обратное преобразование, основывается на двух родственных физических явлениях:

механическом взаимодействии электрического тока с магнитным полем (Эрстед, Био, Савар, Ампер, 1820—1827 гг.) и электромагнитной индукции (Фарадей, 1831 г.).

Движение электрических зарядов — электрический ток — всегда сопровождается появлением магнитного поля, существование которого обнаруживается различными способами, в частности по его механическому действию на проводник с током.

Электрические токи, проходящие по соседству и находящиеся

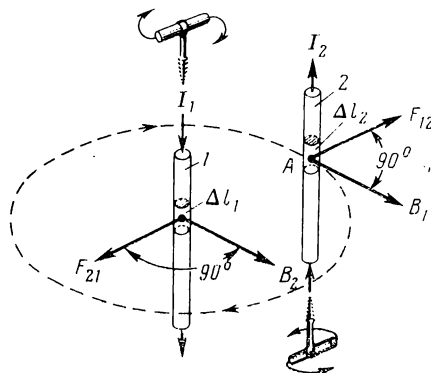


Рис. 5. Направления векторов магнитной индукции  $B_1$ ,  $B_2$  и механических сил  $F_{12}$ ,  $F_{21}$  в поле длинных проводников с токами  $I_1$  и  $I_2$ .

каждый в магнитном поле других токов, испытывают механическое взаимодействие. Так, например, два параллельных проводника притягиваются, если токи в них направлены в одну сторону, и отталкиваются, если токи направлены в разные стороны.

Количественная оценка магнитного поля дается величиной магнитной индукции<sup>1</sup>. Эта физическая величина, подобно скорости движения, характеризуется не только определенным числовым значением, но и направлением в пространстве, т. е. является вектором. Значение магнитной индукции равно отношению механической силы, действующей на малый элемент проводника с электрическим током, к произведению силы тока и длины элемента при условии такого расположения проводника в магнитном поле, чтобы это отношение было наибольшим. Направление магнитной индукции перпендикулярно механической силе и оси проводника. На рис. 5 показаны направления вектора магнитной индукции  $B_1$  в точке  $A$  магнитного поля длинного проводника 1 с током  $I_1$  и вектора механической силы  $F_{12}$ , которая действует на элемент  $\Delta l_2$  другого проводника 2 с током  $I_2$ , проходящего через эту точку. По мере удаления точки  $A$  от тока  $I_1$  магнитная индукция и механическая сила быстро убывают.

Ток  $I_2$  создает свое магнитное поле, которое накладывается на поле тока  $I_1$ . На рис. 5 показаны также направления векторов магнитной индукции  $B_2$  от тока  $I_2$  и силы  $F_{21}$ , действующей на элемент  $\Delta l_1$  проводника 1.

Если длинный проводник с током находится в однородной среде, то его магнитное поле симметрично: магнитная индукция имеет одинаковое значение во всех точках окружности, расположенной в плоскости поперечного сечения проводника и имеющей центр на его

<sup>1</sup> Не путать с явлением электромагнитной индукции, которое упоминалось в начале этого раздела и рассматривается в дальнейшем.

оси. Направление магнитной индукции совпадает с касательной к окружности в данной точке (рис. 5), причем положительное направление связано с положительным направлением тока следующим правилом: если ввинчивать правый винт по направлению тока, то направление вращения совпадает с направлением магнитной индукции. Чем больше ток проводника, тем больше значение магнитной индукции.

*Механическое действие поля на ток возникает как при постоянном значении магнитной индукции, так и при изменяющемся, на-*

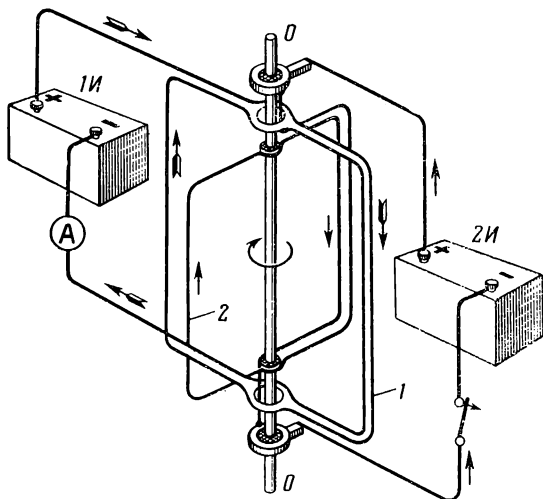


Рис. 6. Модель электрической машины.

пример, если магнитное поле создается переменным током. *Явление электромагнитной индукции наблюдается только в переменных полях, когда меняется значение магнитной индукции или ее направление в пространстве.* Оба явления можно показать на простейшей модели электрической машины, изображенной схематически на рис. 6.

Модель состоит из двух плоских обмоток 1 и 2, изготовленных из изолированной медной проволоки. Обмотка 1 неподвижна, а обмотка 2 может поворачиваться внутри первой обмотки вокруг оси  $O—O$ . На оси расположены два металлических кольца, с помощью которых обеспечивается протекание электрического тока в обмотке 2 при ее движении.

Присоединим концы обеих обмоток к источникам электрической энергии, например к автомобильным аккумуляторам 1И и 2И, как показано на рис. 6. В обмотках установятся постоянные токи, а в окружающем пространстве возникнет магнитное поле, также постоянное. Вследствие взаимодействия тока с полем обмотка 2 начнет поворачиваться вокруг оси из положения, показанного на рис. 6. Движение закончится, когда обе обмотки расположатся в одной плоскости и близлежащие стороны двух обмоток будут обтекаться токами одного направления. На обмотку 1 также действуют механические силы, но она закреплена и потому не движется.

Обмотку 2 можно привести в состояние непрерывного вращения, если изменять направление тока в одной из обмоток на обратное каждый раз в тот момент, когда обмотка 2 окажется в положении равновесия.

Предположим теперь, что обмотка 2 повернулась и остановилась в положении равновесия. Отключим источник тока 2И; измерительный прибор А в цепи обмотки 1 покажет кратковременное увеличение тока в момент разрыва цепи обмотки 2. Мы имеем дело с явлением электромагнитной индукции, состоящем в том, что *при всяком изменении магнитного поля в замкнутом электропроводящем контуре, который находится в этом поле, возникает электрический ток.*

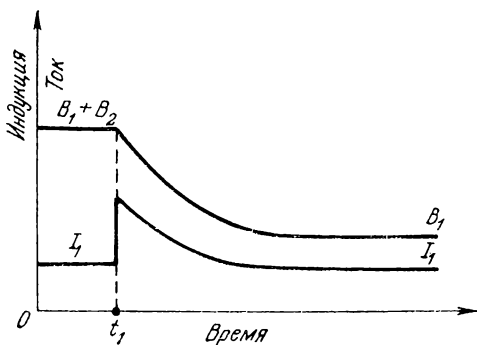


Рис. 7. Изменение магнитной индукции и тока в модели электрической машины при отключении одного источника. Источник 2И отключен в момент  $t_1$ .

Направление наведенного или, как говорят, индуцированного тока определяется правилом Ленца (1833 г.), современная формулировка которого может быть дана в следующем виде: токи, наводимые в процессе электромагнитной индукции, противодействуют вызвавшей их причине. В данном случае отключение источника 2И уменьшает общее магнитное поле обмоток; поэтому индуцированный ток в оставшейся цепи 1 совпадает по направлению с током источника 1И и общее магнитное поле на мгновение остается неизменным. Далее индуцированный ток и его магнитное поле постепенно уменьшаются до нуля, так как связанная с этим током электрическая энергия расходуется на нагревание проводников цепи 1. По истечении определенного времени останется только ток источника 1И со своим магнитным полем и переход из одного состояния в другое закончится. На рис. 7 показано изменение магнитной индукции и тока при отключении источника 2И.

Если осуществить периодическое изменение тока в обмотке 2, например, путем повторных включений и отключений источника 2И, то в цепи 1 также будет наблюдаться периодически изменяющийся ток, даже в отсутствии источника энергии 1И. Появление тока в обмотке 1, не присоединенной к внешнему источнику электрической энергии, свидетельствует о возникновении электрического поля в самой обмотке. На это указывает также наличие напряжения на концах разомкнутой обмотки 1, величину которого можно определить с помощью измерительного прибора — вольтметра. Через вольтметр проходит такой малый ток, что измеренное им напряжение можно считать равным э. д. с.

Обмотка, помещенная в переменное магнитное поле, становится как бы источником электрической энергии: в ней возникает э. д. с. Откуда она берется и не нарушается ли здесь закон сохранения и превращения энергии? Нет, основной закон не нарушается. В обмотку 1 энергия поступает из обмотки 2, по которой протекает изменяющийся ток, т. е. в конечном итоге от внешнего источника. Как это происходит, объясняется в гл. 5, в которой описывается трансформатор — важнейший аппарат для транспорта энергии переменным током.

Переменное электрическое поле возникает не только в металлических витках обмоток. Оно существует всюду, где имеется переменное магнитное поле. Витки образуют проводящие контуры, вдоль которых легко обнаруживается появление электрического поля по току, проходящему в обмотке. В этом смысле можно провести аналогию с качающимися ветками деревьев, по движению которых можно судить о наличии ветра. Возникновение переменного электрического поля в переменном магнитном поле отражает внутреннюю связь между разными сторонами единого материального объекта — электромагнитного поля.

Рассмотрим еще один режим модели, а именно равномерное вращение обмотки 2 от некоторого постороннего двигателя. Обмотка 2 соединена с источником постоянного тока 2И, а обмотка 1 — с электрической лампочкой (источник 1И убран). Вследствие вращения обтекаемой током обмотки 2 магнитная индукция в плоскости обмотки 1 будет изменяться по периодическому закону (рис. 8). В обмотке 1 возникает электрический ток, также периодически изменяющийся от нуля до максимума и меняющий направление через каждые пол-оборота. При прохождении через лампочку электрический ток раскаляет нить, в лампочке происходит преобразование электрической энергии в тепловую и лучистую. Из какого источника поступает электрическая энергия в этом случае?

Как только в обмотке 1 появится электрический ток, он создаст магнитное поле, которое будет действовать на ток обмотки 2. В свою очередь магнитное поле обмотки 2 действует на ток обмотки 1. Возникают механические силы, приложенные к обеим обмоткам. При этом в соответствии с правилом Ленца механические силы будут противодействовать изменению магнитного поля, т. е. относительному перемещению обмоток. Двигатель, приводящий в движение обмотку 2, совершает работу по

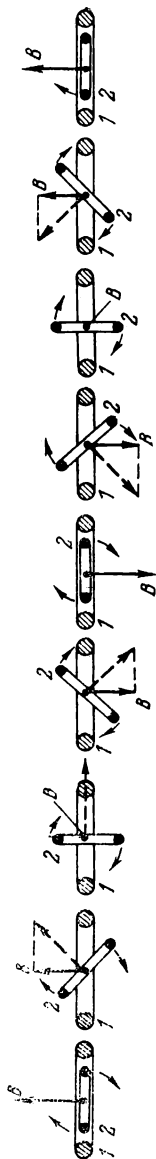


Рис. 8. Изменение магнитной индукции  $B$  в обмотке 1 при вращении обтекаемой током обмотки 2.



преодолению противодействующих сил электромагнитного происхождения, подобно тому, как человек, поднимающий груз, совершает работу по преодолению силы земного тяготения.

В соответствии с законом сохранения и превращения энергии механическая работа двигателя равна, за вычетом энергии, выделяющейся в виде тепла при трении о воздух и в подшипниках, электрической энергии, расходуемой в цепи обмотки  $I$ . Закон сохранения реализуется здесь в явлениях электромагнитной индукции и механического взаимодействия магнитных полей с токами.

Преобразование механической энергии вращательного движения в электрическую — обратимый процесс: электрическая машина, показанная схематически на рис. 6, в принципе пригодна как для выработки электрической энергии, так и для потребления. В первом случае она называется электрическим генератором, во втором — электрическим двигателем. Огромные генераторы станций, вырабатывающие электрическую энергию, и маленький двигатель настольного вентилятора действуют по одним и тем же основным законам.

Электрические машины прошли долгий путь технического развития и теперь представляют собой довольно совершенные устройства. Современные генераторы большой мощности (300 000—800 000 кВт) преобразуют механическую энергию в электрическую с высоким к. п. д. (примерно 0,99). Но к. п. д. тепловой электрической станции в целом не превышает 0,42, несмотря на непрерывное совершенствование техники сжигания органического топлива и прогресс в построении тепловых машин. Дело в том, что к. п. д. тепловых машин принципиально ограничен некоторым идеальным значением, зависящим от температуры рабочего вещества, например пара. Наибольшее по физическим соображениям значение к. п. д.

$$\eta_{\text{пред}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + 273}, \quad (9)$$

где  $T_1$  — температура рабочего вещества на входе в тепловую машину;  $T_2$  — температура рабочего вещества на выходе из тепловой машины.

В турбинах электростанций работает водяной пар. Для увеличения к. п. д. турбины температуру пара  $T_1$  повышают путем дополнительного его нагревания до 600—650 °С; давление пара доходит при этом до 300—350 кг/см<sup>2</sup>. Дальнейшее повышение рабочей температуры сдерживается трудностью получения материалов, способных длительно выдерживать высокие температуры при больших динамических нагрузках (частота вращения рабочего колеса современной паровой турбины составляет 3000 об/мин). Если  $T_1 = 600$  °С, то даже при  $T_2 = 100$  °С (температура пара при нормальном давлении) предельный к. п. д. по формуле (9) будет меньше 0,6. В реальных тепловых машинах не удается создать наилучшие условия для восприятия тепловой энергии пара и к. п. д. получается ниже идеального.

В стремлении повысить к. п. д. ученые и инженеры ищут новые способы производства электрической энергии. Поиски стимулируются еще и тем, что появилось новое топливо — ядерное. Должно ли расходовать его на превращение воды в пар в многоэтажных котельных, как это происходит до сих пор с углем или нефтью?

Целью ли найти более целесообразное использование для ядерного топлива, в частности такое, чтобы избежать промежуточного преобразования тепловой энергии в механическую?

**Электрическая энергия из тепловой.** Воздух и другие газы при комнатной температуре не проводят электричество. При температуре в несколько тысяч градусов происходит тепловая ионизация газа, т. е. расщепление части атомов с образованием электронов и ионов, и газ становится проводящим. Перемещение горячего ионизированного газа (плазмы) в магнитном поле может быть использовано для получения электрической энергии.

Преобразователь тепловой энергии плазмы в электрическую получил название магнитогидродинамического генератора (МГД-генератор) по имени новой области физики—магнитогидродинамики, изучающий течение жидких и газообразных проводников электричества в электромагнитном поле.

На рис. 9 показана одна из возможных схем МГД-генератора.

Поток горячего ионизированного газа 1 прогоняется в магнитном поле, направленном перпендикулярно к потоку. Заряженные частицы, электроны и ионы, движущиеся в потоке газа, отклоняются от прямого пути под действием внешнего магнитного поля, создаваемого электромагнитом 3 и приближаются к стенкам проточной части 2 генератора. На электродах 4, вставленных в эти стенки, накапливаются электрические заряды противоположных знаков. Если соединить между собой электроды вне генератора металлическим проводом, то в нем возникает электрический ток. Включив в цепь нагрузку 5, как показано на рис. 9, можно использовать электрическую энергию для совершения полезной работы.

Чистые газы ионизируются при таких высоких температурах, при которых существующие твердые материалы работать не могут. Поэтому к рабочему веществу МГД-генератора, например гелию, подмешивается небольшое количество металла (калия, цезия), обеспечивающее появление нужного количества свободных электронов, т. е. достаточно большую проводимость плазмы при более низких температурах около 2500 °С. МГД-генератор по схеме на рис. 9 является источником постоянного тока, но могут быть предложены и другие схемы в которых генерируется переменный ток.

Создание МГД-генератора находится в начальной стадии. Нужно подробно исследовать свойства горячих ионизированных газов и разобраться в процессах, которые происходят при работе генератора; найти подходящие конструктивные решения и материалы для изготовления самого МГД-генератора, его проточной части и электродов, которые могли бы устоять против химической коррозии (разъедания) и выдержать высокую рабочую температуру; выбрать наи-

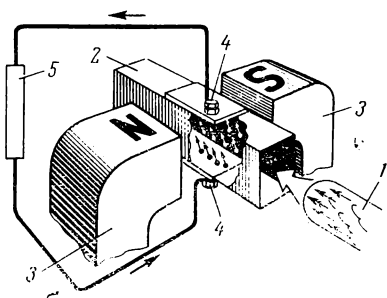


Рис. 9. Схема магнитогидродинамического преобразования тепловой энергии в электрическую.

1 — поток ионизированного газа; 2 — проточная часть генератора; 3 — электромагнит; 4 — электроды; 5 — нагрузка.

выгоднейшие технологические схемы электрических станций с МГД-генераторами и, в частности, определить источник тепловой энергии для нагрева рабочего вещества и многое другое.

Но предварительные оценки уже сделаны: к. п. д. тепловой электрической станции с МГД-генераторами, возможно, достигнет 0,55!

МГД-генератор — не единственная надежда электроэнергетиков. Привлекает к себе внимание термоэлектронный преобразователь тепловой энергии в электрическую — своеобразная тепловая машина без движущихся массивных частей. Рабочим веществом в этой «машине» служит электронный газ, т. е. множество свободных электронов, выброшенных из сильно нагретого металлического электрода (катода) в разреженное пространство.

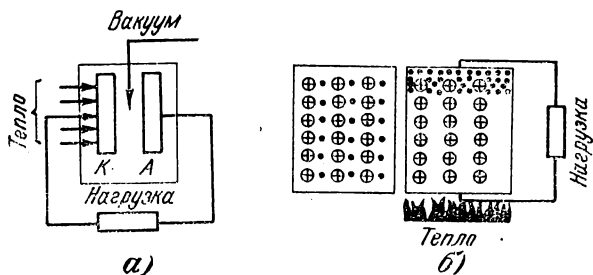


Рис. 10. Схемы преобразования тепловой энергии в электрическую.

*а* — термоэлектронный преобразователь; *б* — термоэлектрический (полупроводниковый) преобразователь.

«Испарение» электронов происходит вследствие увеличения скорости их беспорядочного движения; оно становится достаточно интенсивным при температуре в несколько тысяч градусов, так что тепловая энергия, затраченная на «испарение», может быть преобразована с высоким к. п. д., достигающим теоретической величины 0,7—0,8. Электроны, выброшенные нагретым катодом, достигают второго, более холодного электрода (анода) и далее попадают во внешнюю цепь, где могут совершить полезную работу (рис. 10, *а*).

Первые электроны, покинувшие катод, оказываются в пустоте (воздух откачен). Следующие за ними электроны попадают в облако себе подобных, отталкиваются от них и возвращаются обратно на катод, не достигнув анода. Образуется так называемый пространственный или объемный электрический заряд, препятствующий работе преобразователя. Один из способов уничтожения объемного заряда состоит в добавке положительных ионов в количестве, достаточном для нейтрализации заряда электронов. Проще всего использовать для этой цели ионы щелочного металла цезия, например, путем нанесения его тонким слоем на катод.

К настоящему времени построены образцы термоэлектронных преобразователей с нейтрализацией объемного заряда, в которых достигнут к. п. д. 0,1—0,13 и удельные нагрузки несколько ватт на 1 см<sup>2</sup> поверхности катода. Для первого шага — это немало, хотя в таком виде преобразователь еще не является генератором электрической энергии для большой энергетики. Много творческого труда понадобится, чтобы создать действительно «энергетический» термоэлектронный преобразователь тепла в электричество. Для оценки препятствий, стоящих на этом пути, укажем хотя бы проблему испарения металла: при температуре 2600 °С за 1000 ч работы с катода испаряется слой вольфрама толщиной 0,64 мм. Для повышения к. п. д. до 0,3 нужно повысить температуру до 2900 °С; при этом будет испаряться за то же время слой металла толщиной 12,4 мм. Вольфрам — один из самых тугоплавких металлов — оказывается недостаточно стойким материалом для катода термоэлектронного преобразователя.

Возникает также трудная задача длительного сохранения вакуума внутри преобразователя, так как при высокой температуре металлический катод становится проницаемым для газов. Может быть, решение этой задачи будет найдено на путях использования солнечной энергии для нагревания катода? Прозрачная оболочка термоэлектронного преобразователя, пропустив через себя потоки лучистой энергии солнца к катоду, останется холодной.

Заманчиво сочетание термоэлектронного преобразователя в одном аппарате с атомным реактором, что позволило бы наилучшим образом использовать высокую температуру ядерной реакции.

Наряду с термоэлектронным преобразователем набирает силы термоэлектрический преобразователь. Действие этого преобразователя основано на свойстве некоторых материалов электризоваться при неравномерном нагреве (рис. 10,б). Электроны (условно обозначены точками) перемещаются к холодному концу, а положительные ионы (условно обозначены крестами) остаются на месте. От горячего конца к холодному действует постоянная э. д. с.

Термоэлектрические явления известны более 140 лет и давно уже используются для измерения температуры. Развитие теории этих явлений и успехи в технологии производства соответствующих материалов открыли путь для энергетического использования термоэлектрического эффекта. В настоящее время получено много материалов, которые могут работать при температурах до 600 °С. При более высоких температурах термоэлектрический эффект исчезает, так как наряду с электронами начинают смещаться также ионы. Ученые ищут новые материалы, способные выделять электрические заряды при температуре 1000 °С и выше.

С помощью известных термоэлектрических материалов тепловая энергия преобразуется в электрическую с к. п. д., который уже достигает 0,17 и в ближайшие годы еще возрастет, вероятно, до 0,3, а может быть, и более. Коэффициент полезного действия преобразователя в целом получается гораздо ниже (0,06—0,1) вследствие того, что значительная часть тепловой энергии не используется по назначению: рассеивается в окружающей среде. Тепловые потери можно было бы уменьшить при использовании ядерного топлива, поместив источник тепла внутри термоэлектрического элемента.

Уже сегодня термоэлектрические генераторы работают с к. п. д., более высоким, чем обычные преобразователи энергии очень малой

мощности, к. п. д. которых составляет 0,05—0,06. Если удастся под-  
нять к. п. д. термоэлектрического генератора до 0,2, то для него  
найдется много полезных применений в диапазоне мощностей, изме-  
ряемых тысячами киловатт. Какое место займут термоэлектриче-  
ские преобразователи в большой энергетике, где требуются  
установки мощностью в сотни тысяч и миллионы киловатт, покажет  
будущее.

**Что будет дальше?** Электроэнергетика стоит накануне перево-  
рота в способах генерации электрической энергии, но трудно указать,  
как скоро это произойдет.

На смену электромеханическим генераторам придут магнито-  
гидродинамические, термоэлектронные или термоэлектрические (иначе,  
полупроводниковые) генераторы. Может быть, это будут какие-  
нибудь иные преобразователи, например топливные элементы, произ-  
водящие электрическую энергию непосредственно из химической  
энергии топлива. Все эти способы производства электрической энер-  
гии сулят повышение к. п. д. будущих электрических станций по  
сравнению с существующими и именно потому привлекли внимание  
энергетиков. Конечно, успех определяется не только величиной  
к. п. д. Не меньшее значение имеют затраты на сооружение преоб-  
разователей энергии, их технические характеристики, надежность  
действия, срок жизни. Новые преобразователи энергии вступают  
в соревнование за право производить электрическую энергию для  
нужд человеческого общества.

Есть основания ожидать, что электрические генераторы, изго-  
товленные, например, в 2000 г., не будут похожи на современные  
генераторы, как современные — на те химические источники, которые  
давали энергию первой электрической лодке на Неве (Якоби, 1838 г.).  
Вместе с тем нет никаких оснований предполагать, что интересую-  
щая нас проблема транспорта электрической энергии утратит свое  
значение в энергетике и сведется в будущем к передаче энергии  
на малое расстояние от отдельного источника к обособленному  
потребителю.

Технические особенности и экономические показатели известных  
способов генерации электрической энергии таковы, что побуждают  
энергетиков увеличивать мощность электрических станций. Так было  
с ныне действующими электромеханическими генераторами; такие  
же тенденции прослеживаются в новых генераторах электрической  
энергии вплоть до многообещающих, но еще не реализованных уст-  
ройств с использованием реакции тормоядерного синтеза.

Электрическая энергия производится генераторами большой  
мощности, а потребляется сравнительно малыми «порциями», и каж-  
дая крупная станция вынуждена обслуживать большой географиче-  
ский район. С другой стороны, условия потребления электрической  
энергии (суточные и сезонные колебания спроса) и невозможность  
ее длительного хранения определяют целесообразность работы мно-  
гих станций на общую электрическую сеть, охватывающую терри-  
торию одной страны или даже ряда стран.

В 1970 г. в Советском Союзе электростанции, объединенные  
в энергетические системы, произвели 95% всей электрической энер-  
гии, а доля мелких изолированных электростанций составила 5%.  
В дальнейшем удельный вес мелких электростанций станет еще  
меньше и они будут использоваться лишь в особых случаях: на  
транспортных машинах, для электроснабжения удаленных населен-  
ных пунктов, лесозаготовок, дорожных работ и т. п.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ В ПУТИ

Электрическая энергия — одно из свойств электромагнитного поля. Когда говорят о передаче электрической энергии из одной точки пространства в другую, имеют в виду какие-то «изменения» поля, в результате которых определенное количество электромагнитного поля и связанной с ним энергии переносится с места генерации на место потребления.

Исходя из современной практики, невольно хочется связать транспорт энергии с электрическим током в металлических проводах. Причем здесь электромагнитное поле?

Действительно, металлические проводники играют и еще долго будут играть выдающуюся роль в передаче электрической энергии на расстояние. Но, во-первых, электроэнергию можно передавать и без проводов. Если так не делают до сих пор, то причиной этому не принципиальная невозможность, а неудовлетворительные энергетические показатели — недостаточная мощность, низкий к. п. д., большие затраты на сооружение и др. Во-вторых, вокруг проводника с током существуют электрическое и магнитное поля, не зависящие одно от другого при постоянном токе или в форме единого электромагнитного поля, если ток переменный. Попробуем выяснить роль электромагнитного поля и металлического проводника в транспорте энергии.

**Металлическая колея для энергии.** Тепловоз, преодолевая сопротивление сил трения, тянет по рельсам железнодорожный состав с нефтью. Доставленная на место нефть может быть сожжена в топке котла для получения тепловой энергии. Работа по движению поезда осуществляется за счет энергии топлива, сжигаемого в двигателе тепловоза. Перемещение поезда и, следовательно, запаса химической энергии нефти в пространстве определяется направлением рельс, по которым катятся колеса.

При транспорте электрической энергии такими направляющими являются металлические проводники, по которым проходит ток. Но на этом, как будет видно из дальнейшего, кончается аналогия с рельсовым транспортом химической энергии топлива.

Начнем с постоянного тока, проходящего по металлическому проводу с круглым поперечным сечением. Из опыта известно, что провод нагревается, т. е. в нем выделяется тепловая энергия. Как объяснить поступление энергии в провод исходя из понятия электромагнитного поля?

В отсутствие источника электрической энергии свободные электроны металла находятся в состоянии беспорядочного движения и провод не обнаруживает никаких электрических свойств. Электрическое поле, возникающее при подключении источника, организует движение электронов и создает тем самым ток  $I$ . При этом в соответствии с законом Ома между двумя точками по оси провода возникает электрическое напряжение. Отношение напряжения к расстоянию между этими точками равно напряженности электрического поля внутри провода  $E_{\text{внутр}}$ , которая направлена параллельно его оси в ту же сторону, что и ток.

В пространстве, окружающем провод с током, также образуется электрическое поле. Оно создается зарядами, имеющимися на проводе, и его напряженность  $E_{\text{внешн}}$  зависит от величины э. д. с.

источника энергии, от диаметра провода и наличия поблизости других тел, проводящих электричество. Напряженность  $E_{\text{внешн}}$  направлена перпендикулярно к оси провода.

На поверхности провода оба поля, внутреннее и внешнее, складываются в одно общее электрическое поле, напряженность которого  $E_{\text{сум}}$  равна геометрической сумме напряженностей  $E_{\text{внутр}}$  и  $E_{\text{внешн}}$ . Как правило,  $E_{\text{внешн}}$  значительно больше, чем  $E_{\text{внутр}}$ , и

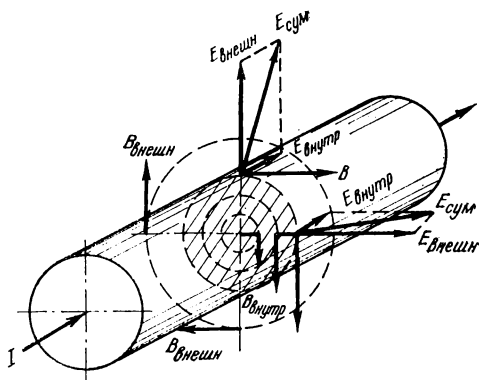


Рис. 11. Внешнее и внутреннее поля провода линии постоянного тока.

резльтирующая напряженность близка по величине и направлению к  $E_{\text{внешн}}$ . Если, например, провод принадлежит линии передачи постоянного тока высокого напряжения, то  $E_{\text{внешн}}$  у его поверхности измеряется киловольтами на сантиметр (кВ/см), а напряженность  $E_{\text{внутр}}$  — милливольтами на сантиметр (мВ/см), т. е. в  $10^6$  раз мень-

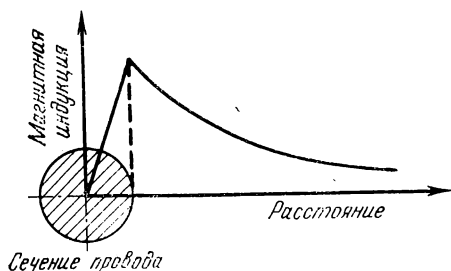


Рис. 12. Изменение индукции магнитного поля провода линии постоянного тока в зависимости от расстояния.

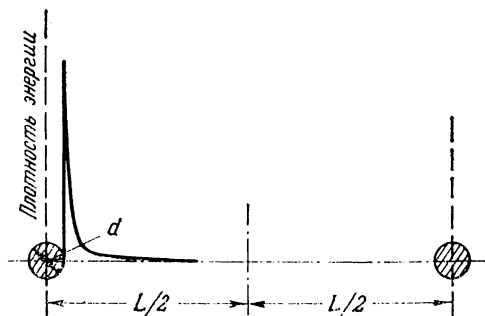
ше. В таких случаях напряженность общего электрического поля практически перпендикулярна к поверхности провода. При других соотношениях между  $E_{\text{внешн}}$  и  $E_{\text{внутр}}$  направление  $E_{\text{сум}}$  на поверхности провода образует острый угол с направлением тока, как показано на рис. 11.

На электрическое поле внутри и вне провода накладывается магнитное поле тока. В каждой точке пространства магнитная индукция направлена по касательной к окружности, расположенной в плоскости поперечного сечения провода и имеющей центр на его оси. Величина магнитной индукции равна нулю на оси провода,

линейно возрастает при удалении от оси и достигает наибольшего значения на поверхности провода. По мере удаления от поверхности магнитная индукция уменьшается (рис. 12).

Электрическое и магнитное поле — две стороны единого электромагнитного поля, неразрывно связанного с движущимися электрическими зарядами. Хотя при равномерном движении зарядов (постоянный ток) между электрическим и магнитным полем нет количественной зависимости и эти поля часто рассматривают обособленно, мы должны интересоваться ими одновременно: в передаче энергии всегда участвуют оба поля. Иначе можно сказать, что энергия передается в пространстве только электромагнитным полем, но не электрическим или магнитным полем в отдельности.

Рис. 13. Распределение плотности электроэнергии в поле воздушной линии постоянного тока. Масштаб не выдержан. Диаметр провода  $d$  в сотни раз меньше расстояния между проводами  $L$ .



Электромагнитное поле и свойственная ему электроэнергия распределены в пространстве. В соответствии с этим физическим фактом единице объема пространства, занятого полем, например  $1 \text{ см}^3$ , можно приписать определенное количество электромагнитной энергии<sup>1</sup> подобно тому, как каждый кубический сантиметр нагретого тела обладает определенным количеством тепловой энергии. Количество энергии в единице объема электромагнитного поля (плотность энергии) зависит от напряженностей электрического и магнитного полей и от свойств среды, в которой находятся поля<sup>2</sup>.

На рис. 13 показано распределение плотности энергии поля воздушной линии передачи постоянного тока. Подавляющая часть всей энергии, практически 100%, сосредоточена во внешнем поле, вблизи проводов. Такое соотношение между энергией внутри и вне проводов характерно для линий электропередачи. Увеличение энергии внутрен-

<sup>1</sup> Электромагнитная или электрическая энергия — энергия, носителем которой является электромагнитное поле. В физике под электрической энергией иногда понимают энергию электрического поля неподвижных зарядов. Более правильно пользоваться в таких случаях термином «энергия электрического поля».

<sup>2</sup> Напряженность магнитного поля  $H$  в воздухе совпадает по направлению с магнитной индукцией  $B$  и отличается от нее по величине только постоянным коэффициентом. Для некоторых металлов, в том числе для железа, зависимость между напряженностью и индукцией представляется на графике не прямой линией, а некоторой кривой, и направления этих величин в пространстве могут быть различными.



ство поля провода означало бы, как будет показано ниже, что большее количество электромагнитной энергии преобразуется в тепловую, т. е. привело бы к увеличению тепловых потерь энергии.

Электромагнитное поле обладает замечательным свойством: оно всегда движется и при этом переносит энергию в определенном направлении, перпендикулярном направлениям напряженностей электрического  $E$  и магнитного  $H$  полей в соответствии с правилом правого винта (рис. 14,а). Чем больше напряженности электрического и магнитного полей,

тем больше количество переносимой энергии.

На рис. 14,б показан участок провода с током, заключенный между двумя поперечными сечениями. В соответствии с направлениями напряженностей  $E_{\text{внутр}}$  и  $H$  (направление  $H$  совпадает с направлением  $B$ , см. рис. 11) поток энергии  $W_{\text{внутр}}$  направлен внутрь провода в каждой точке поверхности и в каждой точке любого поперечного сечения. По мере углубления в металл этот поток уменьшается (ослабляется магнитное поле, см. рис. 12) и становится равным нулю на оси провода. Энергия электромагнитного поля рассеивается в металле в виде тепловой энергии.

Количество энергии  $W_{\text{внутр}}$ , поступающей в металл и рассеиваемой там,

прямо пропорционально напряженностям электрического  $E_{\text{внутр}}$  и магнитного  $H$  полей на поверхности провода. С другой стороны,  $E_{\text{внутр}}$  прямо пропорционально сопротивлению провода и силе тока, а  $H$  — силе тока. Поэтому потери энергии в металле (нагревание провода) возрастают пропорционально квадрату тока и первой степени сопротивления.

При изменении направления тока на обратное изменяются также направления напряженностей  $E_{\text{внутр}}$  и  $H$ , но направление потока энергии  $W_{\text{внутр}}$  остается без изменения. Протекание электрического тока по металлическому проводу сопровождается преобразованием определенного количества энергии в тепловую вне зависимости от направления тока.

Рассмотрим теперь потоки электроэнергии вне провода. На рис. 15 изображены цилиндрические поверхности, охватывающие, кроме проводов, еще и часть окружающего пространства. Вблизи провода, присоединенного к положительному зажиму источника энергии (рис. 15,а), поток энергии  $W_{\text{внешн}}$  направлен в соответствии с направлениями напряженностей  $E_{\text{внешн}}$  и  $H$  параллельно оси цилиндра; через боковую поверхность электромагнитная энергия не переносится. Так же обстоит дело в окрестности другого провода,

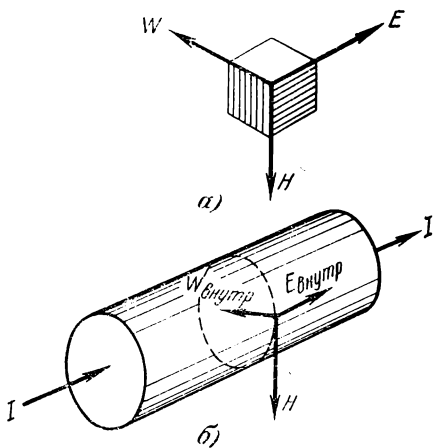


Рис. 14. Направления напряженностей электрического поля  $E$ , магнитного поля  $H$  и потока электроэнергии  $W$ . Поступление электроэнергии в металлический провод с током.

присоединенного к отрицательному зажиму источника, с тем, однако, отличием, что здесь энергия переносится в направлении, противоположном направлению тока (рис. 15,б). Оба провода линии передачи служат для передачи потока энергии от источника к приемнику.

В соответствии с законом сохранения и преобразования поток энергии  $W_2$  меньше, чем  $W_1$  (рис. 15), на величину тепловых потерь на участке провода, заключенном в рассматриваемом цилиндре. Поскольку ток по длине провода не меняется, остается без изменения и напряженность магнитного поля  $H$ . Следовательно, по мере удаления от источника электрической энергии должна уменьшаться напряженность внешнего электрического поля  $E_{\text{внешн}}$ . Так и происходит в действительности: чем дальше от источника, тем меньше напряжение между проводами и пропорциональная ему напряженность внешнего электрического поля.

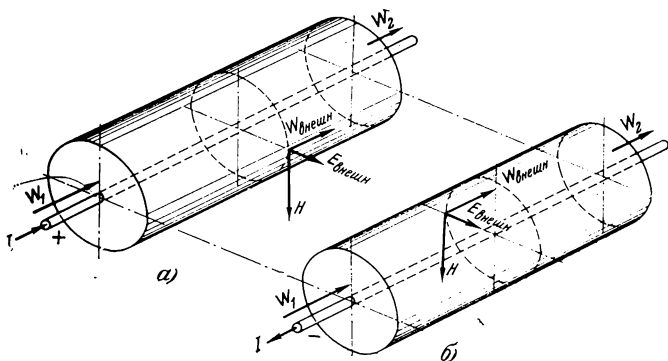


Рис. 15. Передача электроэнергии вдоль провода с током.

Итак, электрическая энергия переносится электромагнитным полем вдоль проводов линии передачи; малая часть энергии расходуется на нагревание проводов, преобладающая часть доводится до потребителей. Запас энергии поля, о котором говорилось в связи с рис. 13, непрерывно уменьшается и также непрерывно пополняется от источника, причем в каждой точке пространства плотность энергии остается неизменной (во времени). Этот процесс напоминает равномерное течение воды в трубе: один объем воды незаметно сменяется другим, а труба остается заполненной водой.

В случае источника с постоянной э. д. с., о котором идет речь, можно создать электрическое поле в окружающем пространстве и в отсутствии тока. Но электромагнитное поле, которое осуществляет перенос энергии, возникает только вокруг проводника с током. Металлический провод — необходимое условие транспорта энергии постоянным током и вместе с тем колея, которая определяет направление потока энергии в пространстве.

При сравнительно медленном изменении величины и направления тока, например при переменном токе 50 Гц, передача энергии происходит в основном так же, как при постоянном токе. Однако наблюдаются некоторые, принципиально новые явления, в которых, как

в зародыше, скрыта возможность транспорта электрической энергии без металлических проводов. Эта возможность реализуется при быстром изменении полей, т. е. при использовании токов высокой частоты.

**Ток смещения.** Если поместить в переменное магнитное поле проводящий контур, например металлическое кольцо, то в нем возникает электрический ток. Так было открыто явление электромагнитной индукции. Если же контур изготовлен из непроводящего материала, то электронного тока, иначе, тока проводимости, конечно, не будет, но вдоль контура возникает переменная э. д. с., свидетельствующая о появлении переменного электрического поля.

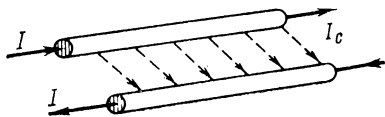
Всякое переменное электрическое поле в свою очередь создает переменное магнитное поле. Постоянные поля, электрическое и магнитное, могут существовать сами по себе в отдельности, например электрическое поле заряженного тела или магнитное поле постоянного магнита. В случае постоянного тока оба поля наблюда-

ются одновременно, но в количественном отношении независимы одно от другого. При изменяющихся токах невозможно отделить магнитное поле от электрического: в каждой точке пространства имеются оба поля, напряженности которых взаимозависимы.

Определяющим признаком тока является магнитное поле. Прочие признаки могут обнаруживаться в одних условиях и не быть в других. Так,

Рис. 16. Токи в проводах линии переменного тока.

$I$  — ток проводимости;  $I_c$  — ток смещения.



электрический ток оказывает химическое действие только на определенные проводящие материалы. Выделение тепла сопутствует току проводимости в обычных условиях, но прекращается при охлаждении некоторых проводников до температуры, близкой к  $-273^\circ\text{C}$ , т. е. к абсолютному нулю (явление сверхпроводимости). Магнитное поле и такие его проявления, как электромагнитная индукция и механические силы, всегда присущи электрическому току. Поэтому появление магнитного поля в переменном электрическом поле дает основание рассматривать изменение электрического поля во времени как разновидность тока, получившую название ток смещения.

Открытие тока смещения (Максвелл, 1873 г.) сыграло выдающуюся роль в развитии теории электромагнитных полей и их практического использования для передачи сигналов без проводов (Попов, 1895 г.) и других целей. Само это название возникло на почве существовавшей в XIX в. гипотезы о «мировом эфире» — воображаемой среде, частицы которой якобы смещаются электрическим полем из своих положений. Современная наука отвергла «мировой эфир», но сохранила термин «ток смещения».

При медленных изменениях электрического поля ток смещения в проводниках ничтожно мал по сравнению с током проводимости. Если, например, напряженность поля изменяется периодически с частотой 50 Гц, то ток смещения в медном проводнике будет меньше тока проводимости в  $10^{16}$  раз, т. е. практически отсутствует.

Токи смещения приобретают практическое значение при частоте

50 Гц, по крайней мере, в двух случаях: когда нарушена замкнутость металлической цепи тока и в разрыв включен конденсатор (см. гл. 6); когда два металлических провода, обтекаемые переменным током, расположены на большом протяжении один рядом с другим. В пространстве между проводами устанавливается переменное электрическое поле, т. е. проходит ток смещения, величина которого может оказаться значительной (рис. 16).

Наши представления об электрическом токе несколько расширились. Оказывается, что электрический ток может быть двух видов: ток проводимости в металлах (постоянный, переменный, пульсирующий) и ток смещения в любой среде, в том числе и в пустоте. Ток смещения бывает только изменяющимся во времени, в частности — переменным. *Общим свойством тока проводимости и тока смещения является возникновение вокруг них магнитного поля.*

Электрическая энергия передается в пространстве, если имеются обе составляющие электромагнитного поля: электрическая и магнитная. Существование токов смещения делает возможной передачу энергии без проводов.

**Частота должна быть высокой.** Чем быстрее меняется электрическое поле, тем больше ток смещения и его магнитное поле и, следовательно, тем большее количество энергии может быть передано. О передаче энергии без проводов можно думать, только имея в виду высокие частоты — миллионы герц или еще выше. Но есть и другая причина, по которой низкие частоты оказываются непригодными при отсутствии металлических проводов.

Электромагнитное поле распространяется в пустоте и воздухе со скоростью света, равной 300 000 км/с. Это очень большая скорость, но все же не бесконечно большая. Поэтому изменение электромагнитного поля в пространстве, окружающем источник энергии происходит не мгновенно: оно запаздывает относительно изменений тока в источнике и тем значительнее, чем более отдалена рассматриваемая точка пространства.

Предположим, что ток в источнике изменяется во времени по синусоидальному закону. Пусть в какой-то момент времени  $t_0$ , принимаемый за начальный, ток имеет наибольшую величину в положительном направлении (рис. 17). Это значение будет повторяться через промежутки времени  $T$ ,  $2T$ ,  $3T$  и т. д., где  $T$  — продолжительность одного периода. За время  $T$  электромагнитное «возмущение» отдалится от источника энергии на расстояние

$$\lambda = cT = c/f, \quad (10)$$

где  $c$  — скорость света;  $f$  — частота изменения тока.

Расстояние  $\lambda$ , на которое поле распространяется за один период, называется длиной волны.

Промежуточным значениям тока, которые он принимает на протяжении периода, соответствуют свои послышки электромагнитного поля (возмущения), соразмерные этим значениям. Все послышки передаются в пространстве с той же скоростью света. Возмущение от положительного максимума тока к концу интервала времени  $T$  рас-

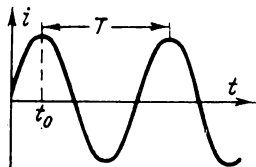


Рис. 17. Переменный синусоидальный ток.

$T$  — продолжительность периода;  $t_0$  — момент времени, условно принятый за начало отсчета.

пространится на расстояние  $\lambda$ , но возмущение от следующего за ним отрицательного максимума распространится только на расстояние  $\lambda/2$ , поскольку отрицательный максимум наступает на полпериода позднее. Продолжая рассуждение, можно убедиться, что синусоидальное изменение тока источника вызывает синусоидальное изменение поля в пространстве. Во всех точках пространства электромагнитное поле изменяется во времени с одной и той же частотой, равной частоте тока, но колебания поля в точках, более удаленных от источника, запаздывают по отношению к колебаниям в близких точках. О таких колебаниях говорят, что они имеют разные фазы или происходят со сдвигом фаз.

Сдвиг фаз играет существенную роль в передаче электрической энергии без проводов. Чтобы выяснить это, представим несколько подробнее действие источника возмущений — излучателя электромагнитного поля.

Вначале рассмотрим идеализированную схему излучателя, состоящую из двух коротких проводников, обтекаемых токами высокой частоты. Пусть токи в проводниках излучателя имеют одинаковые фазы, т. е. в каждый момент времени равны по величине и направлению. Если расстояние между проводниками мало по сравнению с длиной волны, то напряженности полей (электрического и магнитного) от обоих проводников в какой-нибудь отдаленной точке равны между собой и одинаково направлены, т. е. также имеют одинаковые фазы. Следовательно, поле двух проводников будет в два раза сильнее, чем одного. Если же расстояние между проводниками соизмеримо с длиной волны, то фазы полей, создаваемых ими в отдаленной точке, будут неодинаковыми вследствие конечной скорости распространения электромагнитного возмущения. Пусть, например, расстояние между проводниками равно полуволне. Два таких проводника с токами, совпадающими по фазе, в отличие от случая близко расположенных проводников не создадут поля в отдаленной точке: напряженности поля каждого из них будут равны по величине, но противоположны по направлению и в сумме получатся нуль. Излучения не будет. Наоборот, если токи будут сдвинуты по фазе на  $T/2$ , то проводники, разнесенные на расстояние  $\lambda/2$ , образуют излучающую систему, а близлежащие проводники — неизлучающую систему.

Реальный излучатель представляет собой некий контур, в котором протекает ток высокой частоты. Примем для простоты рассуждений, что он выполнен в виде металлического кольца (с разрезом).

Электромагнитное поле такого излучателя в каждой точке пространства можно рассматривать как сумму полей, создаваемых элементарными излучателями — малыми участками кольца. При сложении нужно принять во внимание фазу напряженности каждого элементарного поля. Кольцо мысленно подразделяется на диаметрально расположенные пары элементарных проводников, токи которых равны по величине и направлены в противоположные стороны (разность фаз  $T/2$ ). Из предыдущего ясно, что при малом по сравнению с длиной волны диаметре кольца оно практически не излучает электромагнитной энергии. Сказанное о кольце относится к излучателям любой конфигурации.

Теперь понятно, почему низкие частоты непригодны для передачи электрической энергии без проводов: при частоте 50 Гц длина волны  $\lambda=6000$  км! Такого порядка должны были бы быть и размеры излучателя. Вот при частоте 10 млн. Гц длина волны

составляет всего 30 м. Излучатель таких размеров практически приемлем.

**Передача без проводов.** Передача электромагнитной энергии без проводов — пока еще только мечта энергетиков. Но это уже сегодняшний день радиотехники. Почему энергетика не может использовать то, что уже применяется в другой области техники?

Радиостанция посылает свои сигналы во всех направлениях. Пусть на расстоянии 1 км от станции плотность электромагнитной энергии равна единице. На расстоянии 10 км от станции плотность энергии составит уже только 0,01, поскольку поле распространяется во все стороны одинаково, а на расстоянии 100 км — только 0,0001 исходной плотности (рис. 18). Это грубая оценка, но она дает представление о порядке величин. Можно ли так передавать энергию?

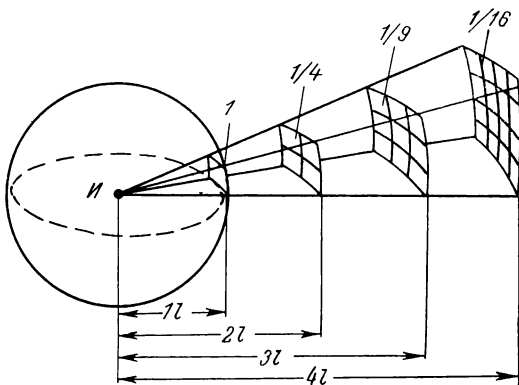


Рис. 18. Уменьшение плотности излучаемой электроэнергии с расстоянием.

Не будет ли расточительством наводнять потоками энергии безлюдные леса, пустыни вместо того, чтобы доставлять энергию только туда, где она требуется? Может быть, в далеком будущем, когда плотность населения во всех местах земного шара станет достаточно большой, окажется целесообразным распределять энергию по принципу: всем — всем. Сегодня такую роскошь может позволить себе разве лишь Солнце: из общего количества энергии, излучаемой Солнцем, Земля перехватывает менее 1/2 000 000 000 части!

Для транспорта энергии требуется направленное излучение: энергия должна быть доставлена по адресу.

Поток электромагнитного поля можно заставить двигаться в определенном направлении, если придать излучателю надлежащую форму. Существуют такие излучающие системы, которые направляют в заданную сторону почти всю излучаемую энергию. Но этого еще недостаточно. Приемная антенна не только принимает энергию, но и посылает часть этой энергии обратно, влияя на работу излучателя. При малых к. п. д., которые имеют место в радиосвязи, практически нет обратного влияния приемных антенн на передающую станцию.

Транспорт электроэнергии должен происходить по беспроводной «линии» с высоким к. п. д. И здесь уже нельзя пренебрегать действием приемной антенны на передающую. Расчеты показывают, что при правильном соотношении между размерами антенн—передающей и приемной, длиной волны и расстоянием, на которое передается электроэнергия, можно получить довольно высокий к. п. д. Так, например, с помощью плоских антенн размером  $100 \times 100$  м можно было бы передавать электроэнергию на расстояние 5 км с к. п. д. 60% при длине волны 1 см (частота  $3 \cdot 10^{10}$  Гц) и на расстояние 2 км с к. п. д. 50% при длине волны 10 см. В этих расчетах принималось, что отправная антенна состоит из миллионов (1) элементарных излучателей, в каждом из которых проходит ток, имеющий одинаковую фазу со всеми другими токами. Такую систему практически невозможно осуществить.

Этот пример приведен не для того, чтобы убедить читателя в нереальности транспорта энергии без проводов. Нет, мы надеемся, что эта грандиозная по своему значению научно-техническая задача будет решена; но трудности, которые надо преодолеть на пути к цели, еще очень и очень велики.

Могут быть предложены антенные системы, более подходящие и более простые, чем плоская антенна, о которой шла речь. Так, например, если придать антенне форму параболоида и обеспечить распределение токов в ее элементарных излучателях по определенному закону, то размеры антенны сократятся примерно в 10 раз, а число излучателей уменьшится до десятков тысяч. Это уже проще, чем плоская антенна, но тоже еще вряд ли приемлемо.

Нет сомнения, что передача электроэнергии без проводов на значительные расстояния возможен только на очень высоких частотах. Мощные генераторы с хорошими экономическими показателями для высоких частот еще не созданы. Разработка таких генераторов—важнейшая проблема для беспроводной передачи электроэнергии.

Энергетика еще только присматривается к транспорту электроэнергии без проводов.

#### *Глава четвертая*

### **ЧТО НУЖНО ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Электрическую энергию можно передавать по проводам как постоянным, так и переменным током. Самые первые передачи электрической энергии были на постоянном токе. Затем переменный ток низкой частоты почти повсеместно вытеснил постоянный ток<sup>1</sup>. В настоящее время снова начали применять постоянный ток для передачи на расстояния более 700—800 км. На постоянном

---

<sup>1</sup> В Советском Союзе и большинстве других государств используется переменный ток частотой 50 Гц. В некоторых странах (США, Япония) электроэнергия передается при частоте 60 Гц.

токе действуют также подводные передачи, доставляющие электроэнергию на острова. Мы начнем с практически господствующих передач переменного тока.

**Замкнутая цепь.** На рис. 19, а показана простейшая замкнутая цепь для передачи электроэнергии, состоящая из источника переменного тока низкой частоты (электро-механический генератор), проводов и приемника в виде ламп накаливания. Электроэнергия передается вдоль проводов от источника к лампам; часть теряется на нагревание проводов. На всех участках рассматриваемой цепи проходит ток проводимости. Между проводами существует еще ток смещения, но столь малой величины, что его можно не принимать во внимание.

Самое большое напряжение в цепи — на зажимах источника энергии. Напряжение на лампах получается меньше вследствие падения напряжения в проводах. Ток имеет одинаковую величину во всех точках цепи. Такую цепь называют *последовательной*, а об ее элементах говорят, что они соединяются между собой *последовательно*.

Возможен и другой способ соединения электрической цепи — *параллельное* соединение. В этом случае на ее элементах будет одно и то же напряжение, но токи в них могут быть разной величины. На рис. 19, б параллельно соединены лампы накаливания, как это обычно и бывает. Если мощности ламп различны, то через них проходят токи разной величины. Группа ламп, провода

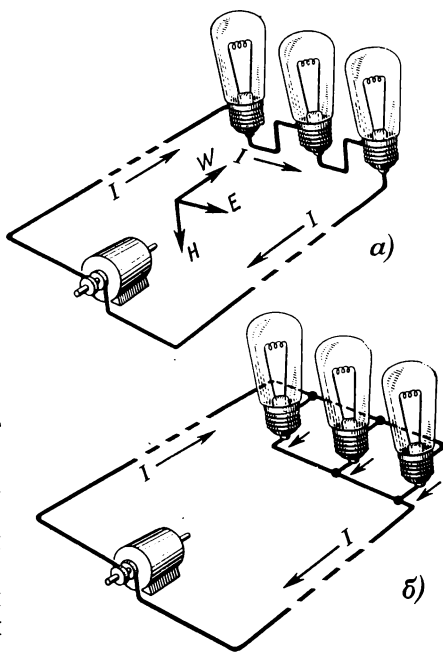


Рис. 19. Замкнутые цепи для передачи электроэнергии.

а — простейшая цепь — последовательное соединение; б — параллельное соединение.



и источник энергии на рис. 19,б соединены между собой последовательно, так же как на рис. 19,а. При разрыве одного из проводов лампы гаснут. Значит ли это, что ток прекращается? Нет, ток будет, но столь малой величины, что его невозможно измерить даже очень чувствительным прибором. На тех участках электрической цепи, где имеются металлические проводники (витки обмоток генератора, провода, нити ламп), проходит малый ток проводимости; в разрыве провода вместо тока проводимости возникает равный ему по величине ток смещения (рис. 20).

На свободных концах провода накапливаются электрические заряды и в разрыве устанавливается электрическое поле. Пусть на

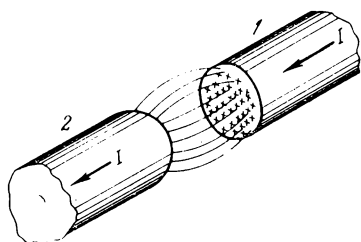


Рис. 20. Ток смещения (изменяющееся электрическое поле) в разрыве металлической цепи.

конце 1 находятся в рассматриваемый момент времени положительные заряды (+), тогда поле будет направлено от 1 к 2. Ток проводимости  $I$  увеличивает заряд на конце 1. При этом увеличивается напряженность электрического поля в разрыве, что соответствует току смещения от конца 1 к концу 2.

Электрический ток продолжается в изолирующей среде (воздухе) в форме тока смещения и далее проходит в проводе от отрицательно заряженного конца 2 снова в форме тока проводимости. Цепь электрического тока замкнута.

Под действием переменной э. д. с. источника положительные и отрицательные заряды на свободных концах провода возрастают и убывают, меняются местами. Соответственно изменяется электрическое поле, и в лампах проходит переменный ток, правда, столь малой величины, что нити не накаливаются. *Понятие о замкнутой электрической цепи шире, чем понятие о замкнутой металлической цепи.*

Обычно электроэнергия передается по замкнутым металлическим цепям. Однако бывают случаи, когда в цепь вводится непроводящее звено в виде специального ап-

парата — конденсатора, способного провести достаточно большой ток смещения. Зачем это требуется и как устроен конденсатор, рассматривается в гл. 6 и 8.

**Провода.** Транспорт электрической энергии по металлическим проводам сопровождается выделением в них тепла — бесполезной тратой энергии по дороге к месту назначения. Эти потери пропорциональны квадрату величины тока и электрическому сопротивлению проводов. Ток в линии зависит от количества и мощности включенных электродвигателей, ламп и других приемников, т. е. определяется фактической потребностью в электроэнергии. Сопротивление тем меньше, чем выше электропроводность металла, из которого изготовлены провода. Наибольшее распространение получили алюминиевые и медные провода. Сопротивление зависит также от длины и поперечного сечения провода, уменьшаясь с увеличением сечения.

При передаче электроэнергии малые потери обеспечиваются применением проводов достаточно большого сечения. Но чем больше сечение, тем значительнее расходы на сооружение линии передачи. Возникает противоречие, характерное для инженерной деятельности. Чтобы выбрать сечение, наиболее подходящее для данного случая, обращаются к экономическим расчетам, учитывающим стоимость электроэнергии, теряемой за определенный период времени, зависимость стоимости линии от площади поперечного сечения проводов и некоторые другие факторы. Эта задача, в принципе простая, в действительности получается весьма трудоемкой вследствие многочисленности параметров, которые должны быть приняты во внимание. Для ее решения используются цифровые вычислительные машины.

При передаче электроэнергии на большие расстояния (сотни километров) оказывается выгодным работать с к. п. д., равным 90%; при меньших расстояниях оптимальный к. п. д. обычно бывает больше.

Нагревание проводов имеет значение не только из-за потери электроэнергии, но и само по себе, если оно приводит к заметному повышению температуры металла. В воздушных линиях увеличивается провисание проводов и это сказывается на требуемой высоте опор. В подземных линиях нагревание ускоряет старение изоляции. Сильное повышение температуры может стать причиной механического или теплового разрушения провода.

**Высокое напряжение.** Мощность первых передач составляла десятки киловатт, современных — сотни тысяч и миллионы киловатт. Увеличиваются мощности, возрастают токи в проводах и еще быстрее растут потери электроэнергии. Можно делать какие угодно экономические расчеты, но даже самый выгодный компромисс<sup>1</sup> между потерями в линии и ее стоимостью окажется неприемлемым, если мощная линия передачи будет работать при низком напряжении.

При данной мощности уменьшение тока достигается повышением напряжения. Поэтому для экономичной передачи электроэнергии по проводам требуется высокое напряжение. Это положение, ныне общеизвестное, было впервые высказано в 1880 г. нашим соотечественником Лачиновым. Теоретическое исследование Лачинова о том, на какое расстояние можно передавать электрическую энергию без больших потерь, привело к выводу, что «... можно передавать работу даже на весьма значительные расстояния, не опасаясь экономических невыгод». Для этого предлагалось с увеличением расстояния увеличивать скорость вращения генератора и число витков его обмотки, т. е., в конечном итоге, напряжение. Исследование Лачинова предопределило неуклонное повышение напряжения линий электропередачи.

В нашей стране и других странах имеются линии передачи, работающие при самом высоком напряжении — 750 000 В. Можно ожидать дальнейшего повышения напряжения передач переменного тока до 1 100 000—1 200 000 В. Чем больше мощность передачи и расстояние, тем выгоднее применять высокое напряжение. Повышение напряжения вызывает дополнительные расходы, но при больших мощностях это окупается за счет удешевления проводов. Ниже, в таблице, указаны примерные мощности и длины для линий переменного тока при различных напряжениях.

Вглядимся в эту таблицу. Она начинается двумя «квартирными» напряжениями: 127 и 220 В. Лампы, плитки и другие электроприборы выполняются именно на эти напряжения. Когда-то освещение было единственным бытовым применением электроэнергии. Мощности были малые, меньше 1 кВт, и в квартирах господствова-

---

<sup>1</sup> Компромисс — соглашение на основе взаимных уступок. Здесь — выбор сечения проводов, наиболее выгодного с государственной точки зрения.

Напряжение, В	Мощность линии передачи, тыс. кВт	Длина линии, км
127	0,002—0,01	Меньше 0,1
220	0,005—0,04	Меньше 0,2
380	0,02—0,1	Меньше 1
660	0,05—0,5	Меньше 2
3000	0,3—3	4—05
6000	2—6	8—3
10 000	3—10	15—4
20 000	6—15	30—10
35 000	10—30	50—10
110 000	20—100	120—20
154 000	60—200	250—50
220 000	120—300	300—100
330 000	300—800	400—200
500 000	600—1500	1000—400
750 000	1500—4000	2000—600
1 200 000	Больше 5000	2000—3000

ло напряжение 127 В. Теперь используется много домашних электрических приборов: утюг, холодильник, пылесос, полотер и т. п. Электроэнергию потребляют также радиоприемники и телевизоры. Приходится повышать напряжение в квартирах до 220 В, чтобы пропустить необходимое количество электроэнергии по тонким проводам. Дальнейшее повышение напряжения опасно для людей, по крайней мере при существующих способах проводки и конструкции приборов. Впрочем, и напряжение 220 В не безопасно для человека.

Возможно читатель обратил внимание на то, что в ваннных комнатах выключатели не ставят, а лампы подвешивают высоко, чтобы их нельзя было коснуться. Так делают для того, чтобы человек, находящийся в воде, не мог стать частью электрической цепи. При повышенной температуре и влажности воздуха электрическое сопротивление человеческого тела уменьшается и попадание под напряжение угрожает тяжелыми последствиями. В других условиях (не в ванной комнате, при сухой обуви и т. п.) прикосновение к токоведущим (металлическим) частям сети 220 В может окончиться сотрясением.

*Советуем запомнить: провода электрической сети таят в себе смертельную опасность!*

Напряжение 380 В используется внутри заводских помещений, где находятся важнейшие приемники энер-

гии — электродвигатели, нагревательные и сварочные электроустановки.

Последнее напряжение из группы сравнительно низких — 660 В встречается в сетях, которые обслуживают потребителей сравнительно большой мощности (до 500 кВт), разбросанных по территории предприятия.

Далее следуют высокие напряжения от 3 кв и выше. Высокие напряжения — это, так сказать, «транспортные» напряжения: они используются при передаче и распределении электроэнергии.

Отдельные приемники изготавливаются на рабочие напряжения 3, 6 или 10 кВ. Обычно это мощные электродвигатели, приводящие в движение насосы нефтяных скважин или газопроводов, компрессоры на химических заводах или прокатные станы на металлургических заводах, дымососы и другие машины на тепловых электрических станциях. В большинстве случаев предпочтительнее потреблять электроэнергию при низком напряжении: расходы получаются меньше. Кроме того, при таком напряжении проще обеспечить безопасность людей.

Высокие напряжения можно разбить на условные группы, каждая из которых имеет свою преимущественную область применения. Для напряжений 3, 6, 10, 20 и 35 кВ — это распределение электроэнергии по цехам и на территории заводов, электроснабжение населенных пунктов в сельских местностях, питание контактной сети электрических железных дорог. Следующая группа высоких напряжений (110, 154, 220 кВ) служит для передачи энергии от районных электрических станций к центрам потребления на расстояния до 300 км. Еще более высокие напряжения (330, 500, 750 кВ), представляющие собой техническое достижение последних 20 лет, имеют разнообразные назначения: транспорт электроэнергии от мощных гидростанций и тепловых станций, работающих на дешевом топливе, на большие расстояния к промышленным центрам страны; передача особенно больших потоков электроэнергии даже на короткие расстояния; соединение крупных электрических станций в энергосистемы, а систем в объединения и, наконец, в единую энергосистему страны — ЕЭС (см. гл. 9).

Таблица напряжений, мощностей и длин линий передачи — своеобразный обзор достижений в транспорте электроэнергии. В конце таблицы упоминается напряжение 1200 кВ, мощность более 5 млн. кВт на одну линию

передачи и расстояние 2—3 тыс. км. Таких передач переменного тока пока еще нигде нет; но, в принципе, они возможны. Транспорт электроэнергии по проводам ограничивается не техническими, а экономическими факторами: стоимостью сооружения передачи и потерями в ней.

Строить линию передачи или производить электроэнергию на месте потребления из топлива, доставленного по железной дороге или трубопроводу? Ответ на вопрос дается экономическим сравнением различных вариантов электроснабжения. Электроэнергетики работают над уменьшением стоимости передачи. Их верным союзником является высокое напряжение.

**Изоляция.** Если бы можно было укладывать неизолированные провода прямо на землю, то транспорту электроэнергии было бы легче соперничать с транспортом угля или нефтяного газа: линии передачи стоили бы дешевле. Но земля проводит электричество, хотя и не так хорошо, как металлические проводники. От провода к проводу пойдет ток, и цепь замкнется через землю, минуя потребителей. Электроэнергия будет расходоваться на нагревание земли, а потребители останутся без энергии.

Ток не должен иметь иных путей, кроме проводов линий и присоединенных к ним приемников энергии. Следовательно, провода должны быть электрически изолированы от земли и, конечно, один от другого. Соединение между собой проводов линии, так называемое «короткое замыкание», влечет за собой в квартирной сети перегорание предохранителей, а может быть и пожар; в сетях более высокого напряжения — плавление проводов и повреждение электрических аппаратов, иногда со взрывами. При коротком замыкании в цепь не входят приемники электроэнергии с их значительным по сравнению с линией передачи сопротивлением. Поэтому токи короткого замыкания превышают нормальные токи в десятки раз.

*Изоляция проводов — предмет неустанных забот и все же одно из «слабых» мест в транспорте энергии.*

Электроизолирующими свойствами обладают многие неметаллические материалы: сухая древесина и бумага, мрамор, фарфор, стекло, резина, пластические массы и др. При нормальной влажности и температуре хорошо изолирует воздух. В линиях низкого напряжения приме-

няют провода с резиновой и пластмассовой изоляцией. При напряжениях выше 1000 В используются изолирующие свойства воздуха и фарфора (воздушные линии), а также специальная бумажно-масляная изоляция (в подземных и подводных линиях).

Важное свойство изоляционных материалов — не проводить электричество — сохраняется лишь до некоторого предела. Если напряжение между проводами превысит предельное значение, произойдет пробой изоляции: через нее потечет ток. Нечто похожее происходит, когда разрывается стенка трубопровода при повышении давления и жидкость вытекает в окружающее пространство. Увидеть пробой воздушной изоляции на действующей линии передачи трудно, так как он обычно происходит неожиданно, в результате порчи изоляции или повышения напряжения. Но вообще пробой воздуха можно наблюдать во время грозы: молния — это не что иное, как нарушение электрической изоляции между заряженным облаком и землей или между двумя облаками.

Вероятность пробоя изоляции тем значительнее, чем больше напряженность электрического поля. Чтобы соизмерить прочность изоляции с величиной напряженности, приходится увеличивать с повышением напряжения толщину слоя изоляции, т. е. расстояние между проводами [см. формулу (8) в гл. 2]. Слой изоляционного материала толще — больше стоимость подземного кабеля; дальше отстоит провод от провода на воздушной линии — больше нужно стали или бетона на изготовление опор, поддерживающих провода. Повышение напряжения снижает расходы на провода (уменьшается сечение), но увеличивает стоимость их изоляции. Однако при достаточно большой мощности передачи напряжение все же выгодно повышать.

Воздушная изоляция подвержена также неполному пробоям. Под действием электрического поля в слоях воздуха, прилегающих к проводу, происходит частичный распад атомов, ионизация, с образованием заряженных частиц — свободных электронов и ионов. Распространение этого процесса в пространстве ограничивается объемным электрическим зарядом (см. гл. 2). Ионизация сопровождается характерным шипением и потрескиванием, которое иногда можно слышать вблизи воздушной линии передачи; в ночное время около провода наблюдается световой ореол — «корона».

Коронирование проводов линии представляет собой вредное явление. На ионизацию атомов затрачивается электроэнергия, и при неправильном выборе диаметра провода потери от коронирования могут превышать потери на его нагревание, особенно в сырую погоду. Кроме

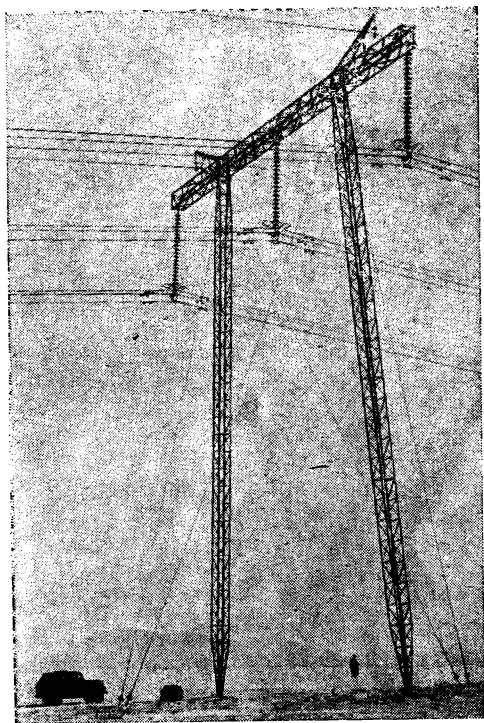


Рис. 21. «Расщепленные» провода линии передачи переменного тока 500 кВ.

того, ионизация сопровождается электромагнитным излучением высокой частоты и это превращает коронирующие провода в источник телевизионных и радиопомех. Неприятности от коронного разряда особенно проявляются при очень высоких напряжениях — 330 кВ и выше. Для уменьшения короны на таких линиях прибегают к «расщеплению» проводов на две, три или четыре нитки (рис. 21). Это значит, что каждый «провод» линии вы-



полняется в виде пучка проводов, соединенных между собой параллельно и отстоящих один от другого на несколько десятков сантиметров. Суммарная площадь поперечного сечения пучка равна площади одиночного провода, который был бы установлен, если бы этому не препятствовало явление коронного разряда. «Расщепленные» провода создают меньшую напряженность поля в воздухе и коронируют слабее, чем одиночный провод. Заметим, что «расщепление» проводов целесообразно еще и по другой причине, о чем будет речь в гл. 6.

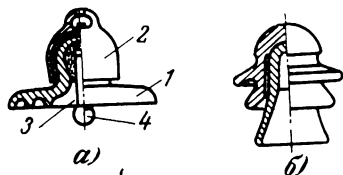


Рис. 22. Изоляторы.

*а* — один элемент («тарелка») гирлянды подвесных изоляторов; *б* — штыревой изолятор; 1 — фарфоровый изолятор; 2 — металлическая арматура; 3 — металлический стержень; 4 — головка стержня.

Читатель, вероятно, видел гирлянды фарфоровых изоляторов, висящие на опорах воздушных линий высокого напряжения; к нижнему концу гирлянды прикреплен провод. Число изоляторов в гирлянде тем больше, чем выше напряжение. Если имеются 2—3 изолятора, то передача работает при напряжении 35 кВ; если 6—7, то перед нами передача с напряжением 110 кВ; 13—14 изоляторов устанавливаются на линии 220 кВ; 20—21 — на линии 500 кВ. На линии 750 кВ гирлянда состоит из 32 изоляторов и имеет длину 6 м. Один изолятор гирлянды показан схематически на рис. 22, а. В фарфоровое тело изолятора 1 заделан металлический стержень 3, имеющий на конце головку 4, которая входит в арматуру 2 нижнего изолятора. Для прочности соединения в головку вставляется защелка.

Для напряжений ниже 35 кВ применяются штыревые изоляторы (рис. 22, б). Провод укрепляется на головке изолятора, изготовленного из фарфора или стекла.

**Опоры.** Провода воздушных линий подвешиваются на опорах, высоко над землей. Опоры должны быть рассчитаны на вес проводов и изоляторов. Кроме того, они должны выдерживать давление ветра, которое может быть значительным, вес льда, иногда образующегося на проводах, и тяжение проводов при частичном их обрыве.

Как лучше подвешивать провода: с большим натяжением или с малым? Малое натяжение увеличивает запас прочности по отношению к дополнительной механической

нагрузке от ветра и гололеда. С другой стороны, чем слабее натянут провод, тем больше он провисает или, как говорят инженеры, тем больше «стрела» провеса. Линия высокого напряжения не должна быть опасной ни для пешеходов, ни для транспорта. Поэтому низшая точка провисающего провода должна быть достаточно удалена от земли. Так, например, при напряжении 220 кВ за безопасное принимается расстояние в 7—8 м.

Высота опоры определяется тремя величинами: безопасным расстоянием от провода до земли, стрелой провеса и длиной гирлянды изоляторов. Если принять для медного провода сечением 95 мм<sup>2</sup> натяжение в 5 кгс/мм<sup>2</sup>, то при температуре +40 °С и расстоянии между опорами 200 м стрела провеса достигла бы 17,8 м, а высота опоры была бы не меньше  $7 + 17,8 + 1,5 = 26,3$  м (при длине гирлянды 1,5 м). Опора получилась бы слишком высокой и, следовательно, дорогой для линии 220 кВ. Стрелу провеса можно уменьшить, сокращая расстояние между опорами, но тогда увеличится число опор, что также удорожает передачу. Поэтому провод стараются натянуть достаточно сильно: обычно доходят до половины предельного натяжения, при котором он рвется, т. е. в случае медного провода до 20—25 кгс/мм<sup>2</sup>. Это уменьшает стрелу провеса в рассмотренном примере до 4,5—3,5 м. На ответственных участках трассы линии, при переходах через шоссе, железную дорогу и в населенных пунктах натяжение провода несколько уменьшают, что влечет за собой сближение опор.

Для повышения прочности проводов и увеличения гибкости их делают не сплошными, а витыми из многих тонких проволок, называемых жилами. Широкое распространение получили сталеалюминиевые провода: в середине провода размещаются стальные жилы, а вокруг них — алюминиевые. Такой провод сочетает большую механическую прочность стальных жил с малым электрическим сопротивлением алюминиевых.

Материалом для опор линий передачи служат сталь, дерево и железобетон. Стальные опоры, более дорогие, применяются в мощных передачах 110 кВ и выше. На деревянных опорах прокладываются линии 6—35 кВ и не очень ответственные передачи более высокого напряжения. Железобетонные опоры, получившие распространение в беслесных районах, применяются для линий 6—110 кВ. В последнее время делаются успешные попыт-

кий изготовления некоторых частей опор линий 6—10 кВ из пластических масс, обладающих изолирующими свойствами. Эти части используются одновременно как опорные и изолирующие, что дает возможность устранить такие традиционные элементы воздушной линии передачи, как фарфоровые изоляторы. Применение подобных конструкций на линиях высокого напряжения может способствовать уменьшению затрат на передачу энергии.

**Подземные линии.** Существуют линии электропередачи без опор: они прокладываются в земле. Провода для таких линий изолируют бумажной лентой, пропитанной специальной мастикой. На бумажную изоляцию накладываются свинцовая или алюминиевая оболочка и оплетка из волокнистого материала, пропитанного минеральной смолой. Сверху навивается броня из стальной ленты, защищающая кабель от механических повреждений. При напряжениях 110 кВ и выше провода подземных линий изолируют также минеральным маслом или инертными газами при повышенном давлении.

Кабельные (подземные) линии не занимают места на поверхности земли и потому удобны в больших городах и на заводах, где земля нужна для строений, транспорта и пешеходов. Они хороши также для преодоления водных пространств (широкие реки, проливы, моря). Но стоимость 1 км кабельной линии во много раз превышает стоимость 1 км воздушной линии той же мощности. Поэтому транспорт электроэнергии на значительные расстояния осуществляется главным образом по воздушным линиям.

Положение может измениться, когда удастся использовать для передачи электроэнергии металлы или иные материалы в состоянии сверхпроводимости. В кабельных линиях такого типа ожидаются весьма малые потери, вследствие чего по ним можно будет передавать потоки энергии во много раз больше, чем можно передать по существующим кабельным линиям (при одинаковом рабочем напряжении). Это обстоятельство может оказаться решающим при создании линий передачи переменного тока мощностью 10—15 млн. кВт и более.

**Выключатели.** Трассы линий передачи пролегают по разным местам страны. Ажурные металлические или гладкие железобетонные опоры можно видеть на лесной просеке, на подъезде к большому городу и вблизи ма-

ленького поселка, в задымленном заводском районе и в степи, на берегу моря и в горах.

Воздушная линия передачи не безразлична к окружающим условиям, так как внешняя среда может нарушить изоляцию проводов. Ветка разросшегося дерева или воздушный змей, запущенный играющими детьми, перемикают провода, и возникает короткое замыкание. На изоляторах осаждается степная пыль или зола, вылетающая из дымовых труб — может произойти электрический разряд провода на опору по поверхности гирлянды. В некоторых районах бывают сильные ветры, раскачивающие провода до того, что они схлестываются, — это тоже короткое замыкание. Во время оттепели на проводах иногда нарастает такой слой льда, что они рвутся под его тяжестью и, падая, соединяются с землей. Ветер с моря осаждает на изоляторах электропроводящие соли, нарушающие изоляцию от опоры. Наконец, давний враг воздушных линий электропередачи — грозовые явления. При попадании молнии в линию передачи возникают столь большие напряжения, что изоляция провода пробивается. Образуется короткое замыкание через электрическую дугу, горящую в ионизированном воздухе.

Подземные линии менее подвержены влиянию окружающей среды, но их изоляция также нарушается по тем или иным причинам. Например, свойства бумажной изоляции могут ухудшиться вследствие длительной тепловой перегрузки кабеля и тогда изоляция пробьется даже при рабочем напряжении. Может произойти механическое повреждение изоляции при производстве земляных работ вблизи трассы подземной линии и др.

Короткое замыкание — опасное явление: в сети возникают токи большой величины, а напряжение вблизи места аварии снижается в несколько раз. Нормальная работа электрических установок нарушается. Создается угроза недопустимого нагрева обмоток генератора, проводов линий и установленных на них аппаратов токами короткого замыкания. Поврежденный участок передачи как можно скорее должен быть отключен от источников электроэнергии. Никто не знает заранее, когда и где случится короткое замыкание. Поэтому отключение производится автоматически, а выключатели устанавливаются на всех линиях передачи.

Легко ли выполнить отключение, т. е. разорвать электрическую цепь? Вопрос относится к нарушению замкну-

той цепи тока проводимости, так как ток смещения в разрыве цепи, о котором говорилось выше, мал и не имеет практического значения при рабочей частоте 50 Гц.

В электрической цепи низкого напряжения короткозамкнутый участок можно отключить предохранителем с плавкой вставкой, который действует следующим образом. При прохождении большего тока короткого замыкания плавкая вставка предохранителя, представляющая собой одну или несколько тонких проволонок, сгорит. Пространство, где была проволока, заполняется парами металла и его химических соединений с воздухом. Вследствие высокой температуры эта среда ионизирована и является проводящей. В течение короткого промежутка времени, измеряемого тысячными долями секунды, по мере охлаждения и рассасывания продуктов горения электрическое сопротивление предохранителя возрастает и, наконец, становится настолько большим, что ток прекращается. С этого момента все напряжение цепи приложено к зажимам предохранителя. Очевидно, что предохранитель должен выдержать это напряжение без пробоя, чтобы процесс разрыва цепи завершился.

Предохранители с плавкой вставкой применяются и в линиях высокого напряжения — до 35 кВ. При более высоком напряжении трудно разорвать короткозамкнутую цепь предохранителем. После сгорания вставки ионизированный промежуток внутри предохранителя пробивается и устанавливается мощная электрическая дуга, электропроводность которой поддерживается непрерывным выделением тепла. Такая дуга сама по себе не гаснет и нужно искусственно создать условия, необходимые для ее гашения. Эти условия создаются в гасительных камерах выключателей — специальных аппаратов, используемых для прекращения тока в цепи.

Конечно, не всякий выключатель снабжается гасительной камерой. В частности, квартирный выключатель, предназначенный для отключения малых токов (несколько ампер) при низких напряжениях (127—220 В) делают без камеры. Но уже при токах в несколько десятков ампер или при напряжениях более 380 В выключатель должен быть с каким-нибудь гасительным устройством. В противном случае искра, возникающая при электрическом пробое промежутка между расходящимися контактами, может превратиться в устойчивую дугу и отключение не произойдет.

Надежные выключатели нужны не только на случай короткого замыкания, но и для нормального эксплуатационного включения и отключения мощных линий передачи. Выключатели способны к многократному автоматическому действию и этим также выгодно отличаются от предохранителей, в которых замена плавкой вставки производится персоналом.

Существует одно обстоятельство, облегчающее гашение дуги в цепи переменного тока: 2 раза за период ток принимает нулевое значение. В эти моменты дуга гаснет на очень короткое время. Потом она может снова загореться, если будет пробит ионизированный промежуток между контактами, но каждое погасание дуги в нуле тока дает надежду на окончательное отключение в ближайшем полупериоде. Чтобы разорвать цепь без повторных зажигания дуги, нужно очень быстро деионизировать промежуток между контактами, восстановить его электрическую прочность.

Для линий высокого напряжения изготавливают выключатели двух основных типов: масляные и воздушные. В масляных выключателях гашение дуги производится минеральным маслом, а в воздушных — потоком сжатого воздуха. При конструировании выключателей обоих типов принимают меры, обеспечивающие быстрое расхождение контактов при отключении. В выключателях, способных отключать очень большие токи, подвижной контакт перемещается со скоростью 3—4 м/с.

Выключатели для линий очень высокого напряжения имеют несколько пар контактов, соединенных последовательно: разрыв цепи осуществляется в нескольких промежутках. Дуга, возникающая при отключении, разделяется на более короткие дуги, которые легче гасить, чем дугу в одном промежутке.

Каждый выключатель рассчитывается на определенные условия работы. Его отключающая способность характеризуется условной мощностью, равной произведению наибольшего тока, который в состоянии отключать выключатель, на номинальное напряжение линии. В Советском Союзе изготавливают масляные выключатели 220 кВ с условной мощностью отключения 8—10 млн. кВ·А и воздушные выключатели 500 кВ мощностью 30—50 млн. кВ·А. Для линий 750 кВ разработаны выключатели мощностью 85 млн. кВ·А. В этих аппаратах мощность сочетается с быстродействием: отклю-

чение производится за два-три периода переменного тока.

Выключатель — необходимое звено в цепи, по которой передается электроэнергия. Он всегда готов замкнуть и разомкнуть цепь или отсоединить поврежденный участок. Что приводит его в действие?

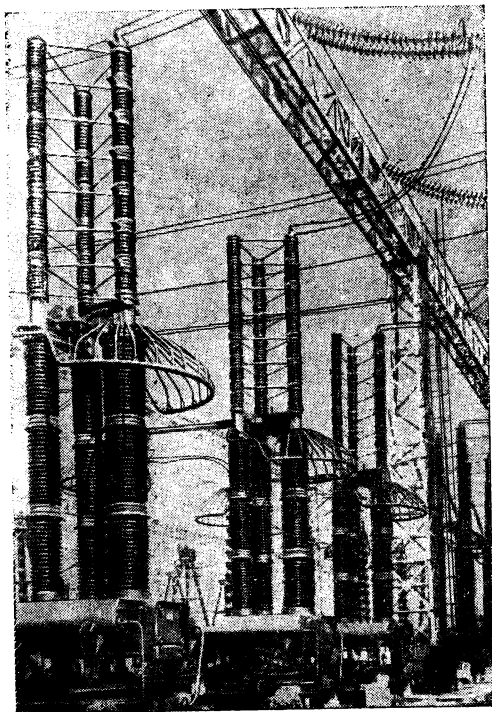


Рис. 23. Воздушные выключатели 500 кВ.

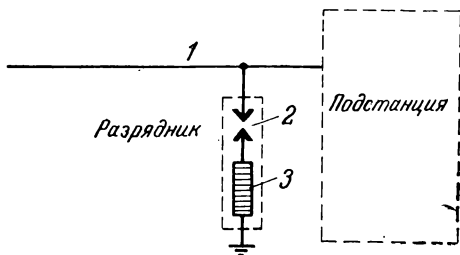
**Защита.** Передачи электроэнергии нужно защищать от разрыва цепи и от пробоя изоляции. Полностью предотвратить эти нарушения не удастся. Рано или поздно, тут или там повреждение происходит, и следует заботиться о том, чтобы последствия принесли наименьший вред. На помощь приходит релейная защита, контролирующая состояние каждой линии передачи. Прервался ли ток, появилось соединение с землей, случилось корот-

кое замыкание — первым это обнаружит реле и, если надо, подаст сигнал действия на выключатель.

Если повредилась изоляция подземной линии, то почти наверняка нужно высылать ремонтную бригаду на место повреждения. На воздушных линиях короткое замыкание часто бывает нестойким: после отключения линии ионизированный столб, в котором горела дуга, охлаждается и рассасывается в чистом воздухе. Через некоторое время (0,3—0,6 с) линию можно снова поставить под напряжение и продолжать передачу энергии, как будто ничего не случилось. Повторное включение выполняется автоматически, с необходимой выдержкой времени; если короткое замыкание остается, то линия отключается окончательно. В Советском Союзе многие линии высокого напряжения оснащены устройствами автоматического повторного включения (АПВ).

Рис. 24. Схема включения разрядника.

1 — линия передачи; 2 — искровой промежуток; 3 — токоограничивающее сопротивление.



Кроме реле, приводящих в действие выключатели, применяются и другие защитные устройства, называемые так, пожалуй, с еще большим основанием, чем реле. К их числу относится, например, разрядник, защищающий передачи от повышенного напряжения. Разрядник присоединяется к линии 1, как показано на рис. 24. Когда напряжение на линии превышает некоторое установленное значение, пробивается слой воздуха в искровом промежутке 2 разрядника. Вследствие этого напряжение на линии уменьшается, что предотвращает пробой изоляции самой линии и присоединенных к ней аппаратов. Действие разрядника подобно действию предохранительного клапана на паровой магистрали, устраняющего избыточное давление. Чтобы облегчить гашение дуги в искровом промежутке разрядника, последовательно с промежутком включается токоограничивающее сопротивление 3. Поэтому пробой в разряднике не превраща-



ётся в короткое замыкание на передаче. Релейная защита обычно не реагирует на действие разрядника.

Разрядники активно защищают передачи от опасного повышения напряжения, но предотвратить такое повышение они не могут. Металлические тросы, протянутые над проводами линий и соединенные с опорами, способны предотвратить один из видов перенапряжения, возникающего при грозе: трос привлекает молнию на себя и электрический заряд облака стекает по опорам в землю минуя провода линии. Эффективность защитного действия троса зависит от электрического сопротивления между опорой линии и землей. Для уменьшения этого сопротивления в землю закладывают металлические стержни или полосы. Заслуживает внимание предложение об изготовлении фундаментов опор из электропроводящего бетона, разработанного в Советском Союзе.

Надежное заземление опоры требуется не только для успешного действия тросов, оно обеспечивает также безопасность людей и животных, оказавшихся вблизи опоры во время удара молнии. Так переплетаются между собой защита линий от грозových перенапряжений и людей от опасности поражения электрическим разрядом.

**Распределительные устройства.** На рис. 25 показано открытое распределительное устройство 500 кВ при гидроэлектростанции. На снимке видны опоры, металлические фермы, провода, разрядники, выключатели и измерительные трансформаторы. Здесь присоединяются линии передачи, отходящие от электростанции в разные стороны. Здесь же установлены различные аппараты, необходимые для управления потоком электроэнергии.

Сборные шины, провода, соединяющие их с линией (спуски), выключатели, разъединители, разрядники, измерительные трансформаторы, пропорционально преобразующие высокое напряжение в низкое и большой ток в малый, чтобы питать измерительные приборы и защитные реле, — все это составляет в совокупности распределительное устройство. Назначение его понятно: распределить электроэнергию по нескольким направлениям, создать условия для правильного действия защитных и измерительных аппаратов, обеспечить безопасность обслуживающего персонала.

Площадь распределительного устройства зависит от величины рабочего напряжения, так как должны быть выдержаны изоляционные промежутки между проводами

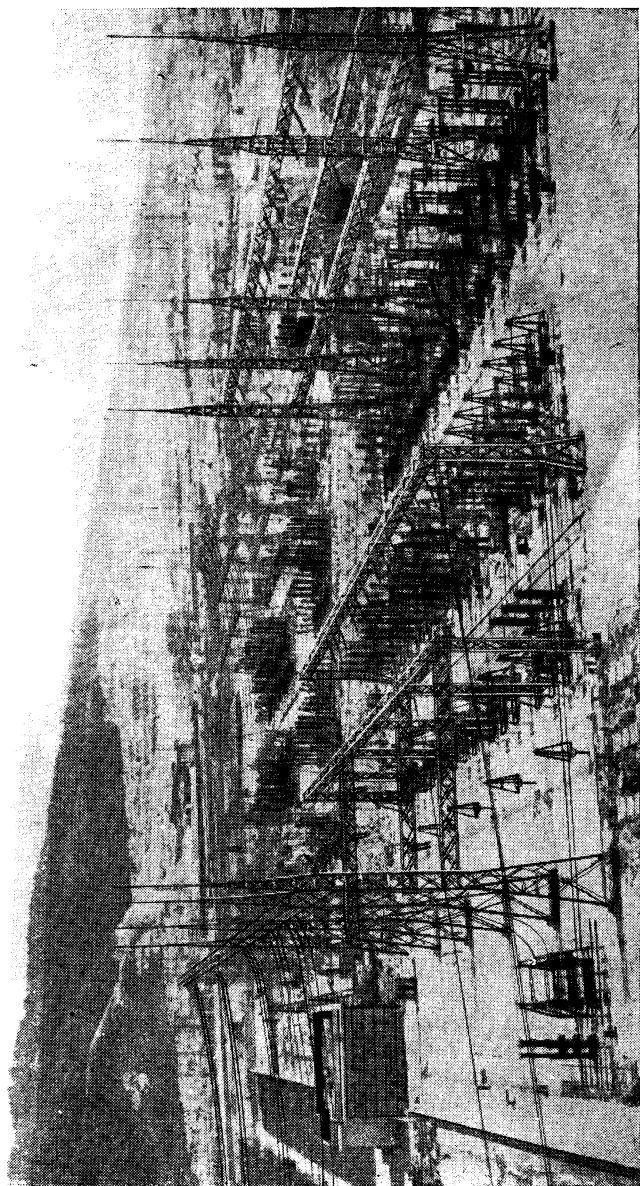


Рис. 25. Распределительное устройство 500 кВ при гидроэлектростанции.

и относительно опорных конструкций. Распределительные устройства меньшего напряжения занимают меньшую, но все же значительную площадь. Обслуживание таких гигантских установок затруднительно. Кроме того, занятая ими земля, часто пахотная, могла бы быть использована более целесообразно. Территория Советского Союза огромна, но если думать о будущем, нельзя уже сейчас не экономить его природные богатства и землю в том числе. По этой и по другим причинам, которых мы здесь касаться не будем, в последние годы начали применять полностью или частично закрытые распределительные устройства, заполненные специально подобранным газом под повышенным давлением. Лучшие изолирующие свойства такого газа по сравнению с воздухом и малая их зависимость от атмосферных условий дают возможность во много раз уменьшить размеры распределительного устройства.

Обслуживание установки высокого напряжения требует большой осторожности. По внешнему виду проводов и аппаратов нельзя судить, находятся они под напряжением или нет. Поэтому при ремонте линии передачи, выключателей и других аппаратов высокого напряжения принимаются меры предосторожности: отключаются разъединители, а провода линии соединяются накоротко между собой и с землей.

Разъединитель состоит из поворотного металлического стержня, ось вращения которого закреплена на опорном фарфоровом изоляторе, и гнезда, установленного на другом изоляторе. Когда стержень лежит в гнезде, образуется замкнутая металлическая цепь. Если стержень вынут из гнезда, то цепь рвется зримо. Это важно для ремонтных рабочих. С помощью разъединителей производят также необходимые повседневные изменения в схеме распределительного устройства: одни линии присоединяются к сборным шинам, другие отключаются, например для ремонта. Переключение разъединителем выполняется в полностью обесточенной цепи или при очень малом токе, так как в отличие от выключателя этот аппарат не имеет гасительной камеры и его контактный стержень перемещается медленно. Цепь с большим током в состоянии разорвать только выключатель. Разъединители включают и отключают с места или на расстоянии с помощью вспомогательных двигателей. Управление выключателями, как правило, производится

на расстоянии, из специальных помещений, где находятся так называемые щиты управления.

**Подстанции.** Крупная подстанция, кроме распределительного устройства, содержит помещение для обслуживающего персонала, щит управления, узел служебной связи, необходимые для обеспечения бесперебойной подачи электроэнергии потребителям. Щит управления обычно расположен в большой светлой комнате. На щите — измерительные приборы, наглядная схема сети, в которую встроены ключи для управления выключателями и разъединителями, сигнализация о состоянии оборудования подстанции. Рядом со щитом — стойки с защитными реле и приборами автоматики и связи, необходимыми для управления транспортом энергии.

Светятся сигнальные огни на щите управления: зеленый — аппарат включен в работу, красный — аппарат отключен<sup>1</sup>. В помещении щита управления дежурит специалист, наблюдающий за состоянием оборудования и режимом линий передачи по приборам и указателям. По распоряжению вышестоящего оперативного персонала или по собственному усмотрению, но с разрешения диспетчера энергосистемы, дежурный приводит в действие выключатели и разъединители, принимает меры для регулирования напряжения на линиях, дает указания ремонтным бригадам и допускает их к работам в распределительном устройстве, словом, направляет и руководит. Он знает обо всем, что делается на подстанции, и без него ничто не начинается. Этого требуют, и не случайно, правила технической эксплуатации, вобравшие в себя знания и опыт поколений специалистов.

На подстанции царят тишина и спокойствие. Но за неторопливыми действиями дежурного ощущается напряженное внимание, каждый шаг делается с оглядкой. Ошибочный поворот ключа может привести к короткому замыканию, и район или несколько районов на время лишатся электроэнергии.

В любую погоду, в жару и холод, под дождем и в снегопад в распределительных устройствах и на линиях ведутся ремонтные работы. Случилась авария — ночь становится рабочим днем. Правда, аварии, требующие немедленной посылки ремонтной бригады, бывают не часто. Зато осмотр, проверка и профилактический ремонт

---

<sup>1</sup> Цвета указаны условно.

ведутся изо дня в день. Выявляются и заменяются поврежденные изоляторы в гирляндах. Проверяются и поддерживаются в должном состоянии многочисленные контактные соединения в аппаратах и на линиях. Производятся ревизия и ремонт движущихся частей разъединителей и выключателей. Окрашиваются опоры и фермы, чтобы предохранить их от ржавления. Проверяется действие защитных реле, устройств автоматики и связи и выполняется множество других работ.

Существуют подстанции без дежурного персонала, запертые на замок. Обычно это подстанции низкого напряжения или не очень крупные подстанции высокого напряжения. Необходимые переключения выполняются на них путем передачи команды по проводам из центрального пункта. На расстоянии управляются не только подстанции, но и некоторые гидроэлектрические станции со всем их сложным оборудованием. Число таких станций и подстанций будет увеличиваться; когда-нибудь и тепловые станции будут эксплуатироваться без дежурного персонала. Но в определенное время двери этих установок откроются, чтобы впустить специалистов, наблюдающих за их работой. Люди создают машины и аппараты, и люди поддерживают их в действии.

Современная техника передачи и распределения электроэнергии представляет собой результат усилий многих ученых, инженеров и рабочих, разработавших и строивших линии передачи и подстанции. Отдавая им должное, не забудем о тех, кто эксплуатирует опасные установки высокого напряжения и своим трудом обеспечивает непрерывное поступление электроэнергии в города и села.

### *Глава пятая*

## **ПОЧЕМУ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК?**

Потребители электроэнергии бывают разные: одни могут работать и на постоянном и на переменном токе, другие — только на постоянном, третьи — только на переменном токе. К первым относятся, например, лампы накаливания и другие приборы, использующие тепловое действие тока. Из числа промышленных приемников безразличны к роду тока сушильные электрические печи и т. п. Электрохимические установки, такие как ванны для получения алюминия, магния и другие, не работают на

переменном токе. Не годится переменный ток и для зарядки аккумуляторов.

Важнейшие потребители электроэнергии — электродвигатели — бывают как постоянного, так и переменного тока. Двигатель переменного тока устроен так, что в нем, как и в двигателе постоянного тока, создается неизменный (на протяжении периода) крутящий момент, как это требуется для приведения в действие рабочих машин. При этом двигатели переменного тока дешевле и надежнее двигателей постоянного тока. Однако для некоторых применений, например на электровозах, постоянный ток предпочтительнее, так как обеспечивает более подходящие технические характеристики двигателя.

Оба рода тока, постоянный и переменный, нужны в народном хозяйстве и, рассматривая вопрос только с точки зрения использования электроэнергии, трудно было бы выбрать один из них для транспорта, тем более что переменный ток можно на месте преобразовывать в постоянный и наоборот. Выбор определился по совокупности преимуществ и недостатков того и другого рода тока при генерации, передаче, распределении и, конечно, потреблении электроэнергии. Рассмотрим важнейшие преимущества переменного тока, принесшие ему победу в соревновании с постоянным током.

**Трансформатор.** Передача электроэнергии должна происходить при достаточно высоком напряжении, а потребление — при низком (см. гл. 4). Существующие генераторы электромеханического типа малой и средней мощности обычно строятся на напряжение до 6000 В, большой мощности — до 22 000 В. Имеются основания ожидать, что напряжение генераторов переменного тока удастся повысить до 35 000 В, но и этого мало. При таких напряжениях нельзя передать требуемое количество электроэнергии на значительное расстояние. Приходится повышать напряжение источника электроэнергии, а на противоположном конце передачи, у приемников, понижать его до необходимой величины. Так возникает проблема трансформации напряжения, т. е. его повышения и понижения. Для переменного тока она была блестяще решена изобретением трансформатора (Яблочков, 1876 г.).

Трансформация напряжения основана на явлении электромагнитной индукции (см. гл. 2). Простейший трансформатор образуется двумя расположенными рядом

обмотками с разным числом витков. Но такое устройство так же мало похоже на современный трансформатор, как фейерверочная шутиха на космическую ракету. Трансформатор большой мощности и высокого напряжения представляет собой сложный аппарат, масса которого достигает сотен тонн (рис. 26).

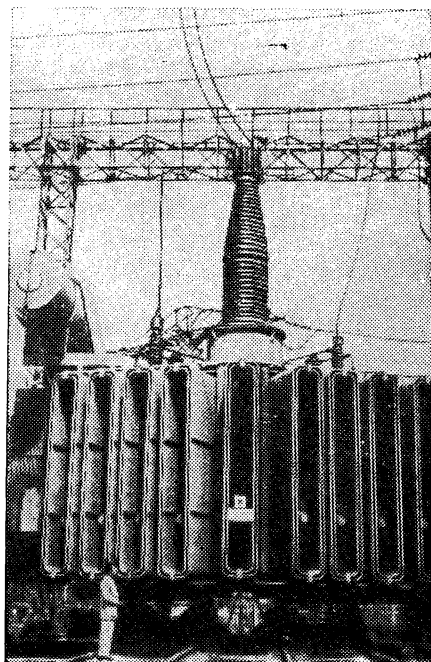


Рис. 26. Трансформатор мощностью 90 тыс. кВт·А. Высшее напряжение 500 кВ.

Магнитопровод трансформатора, его стеновой хребет, делается из кремнистой стали. По внешнему виду он напоминает прямоугольную раму, поставленную вертикально. На боковых сторонах находятся цилиндрические обмотки из медной изолированной проволоки, по две или три обмотки, расположенные концентрично. Между обмотками, между магнитопроводом и ближайшей к нему обмоткой — толстостенные изолирующие цилиндры.

Магнитопровод с обмотками помещен в металлический бак и все залито минеральным маслом для лучшей изоляции и отвода топлива. На крышке бака расположены фарфоровые изоляторы, через которые проходят металлические стержни, соединяющие обмотки с внешней электрической цепью. На стенках бака укреплены трубчатые радиаторы для увеличения поверхности охлаждения. Трансформаторы очень большой мощности изготавливаются также с принудительной циркуляцией масла, охлаждаемого в отдельно стоящих маслоохладителях.

Трансформаторы размещаются на подстанции, вблизи распределительного устройства, где находятся прочие аппараты, необходимые для передачи электроэнергии.

Одна из обмоток трансформатора присоединена к генератору переменного тока. Эту обмотку будем называть первичной, а другие обмотки — вторичными. В первичной обмотке проходит переменный ток, создающий переменное магнитное поле в стальном магнитопроводе. Вне магнитопровода магнитная индукция будет в десятки раз меньше, так как сталь относится к ферромагнитным материалам, обладающим свойством усиливать магнитное поле. Трансформатор с неферромагнитным магнитопроводом, например из пластической массы, нельзя было бы использовать для передачи электроэнергии<sup>1</sup>.

В переменном магнитном поле образуется переменное электрическое поле: в каждом витке обмотки, охватывающем магнитопровод, возникает э. д. с. В двух витках, соединенных последовательно, э. д. с. будет в 2 раза больше, чем в одном, и т. д. Чем больше витков в обмотке, тем больше наводимая в ней э. д. с. Число витков первичной обмотки выбирается исходя из величины напряжения генератора и размеров магнитопровода. Числа витков вторичных обмоток подбираются так, чтобы получилась э. д. с. нужной величины. Если, например, в одном витке наводится э. д. с., равная 40 В, то для получения напряжения 20 000 В нужно иметь вторичную обмотку из 500 витков. При напряжении генератора, равном 3800 В, в первичной обмотке будет 95 витков. Коэффициент трансформации, равный отношению чисел витков, составит 5,26. Если имеется несколько вторичных обмоток, то они могут иметь разное число витков.

---

<sup>1</sup> Такие трансформаторы находят применение в других областях техники.



Присоединим вторичную обмотку к линии передачи. В обмотке будет проходить переменный ток, переносящий электроэнергию от трансформатора к потребителям. Как передается электроэнергия от первичной обмотки ко вторичной? Между обмотками нет металлической связи, и казалось бы, ток в одной обмотке не зависит от тока в другой. Однако в первичной обмотке тоже наводится э. д. с., направленная в соответствии с правилом Ленца (см. гл. 2) навстречу приложенному напряжению. Ток этой обмотки определяется разностью между напряжением генератора и наведенной э. д. с. Это же правило подсказывает нам, что направление магнитного поля, создаваемого током вторичной обмотки, противоположно направлению магнитного поля, создаваемого током первичной обмотки. Увеличение вторичного тока влечет за собой ослабление магнитного поля в магнитопроводе и, следовательно, уменьшение э. д. с., наводимой в первичной обмотке. Поскольку напряжение генератора сохраняет свою величину, разность увеличится и первичный ток возрастет. При этом в магнитопроводе восстановится почти такое же поле, какое было до замыкания вторичной цепи. Таким образом, по мере увеличения тока во вторичной обмотке будет увеличиваться ток и в первичной обмотке. Мощность первичной цепи также будет расти, оставаясь всегда больше мощности вторичной цепи на величину тепловых потерь в обмотках и магнитопроводе (закон сохранения энергии). Так реализуется передача электроэнергии от одной обмотки трансформатора к другой.

Мы назвали первичной обмотку, присоединенную к генератору, т. е. к источнику электроэнергии. Это могла быть обмотка с меньшим или большим числом витков. Следовательно, трансформатор обратим: его можно использовать как для повышения, так и для понижения напряжения.

На пути от источников к приемникам электроэнергия несколько раз проходит через трансформаторы, сперва повысительные, а затем понизительные. Сумма номинальных мощностей этих аппаратов в сети переменного тока бывает в 8—10 раз больше, чем сумма номинальных мощностей генераторов, присоединенных к данной сети.

**Три фазы и ноль.** Синусоидальные кривые (рис. 27,а) обладают важным свойством: алгебраическая сумма их ординат, соответствующих одной общей абсциссе, равна

нулю. Иначе, сумма трех одинаковых синусоид, сдвинутых одна относительно другой на  $120^\circ$ , равна нулю.

Перекинем теперь мостик от тригонометрии к электротехнике. Переменный ток изменяется во времени по синусоидальному закону. Значит, ординаты синусоиды могут представлять мгновенные значения тока, абсциссы— время, отсчитанное от выбранного начала. Поэтому три

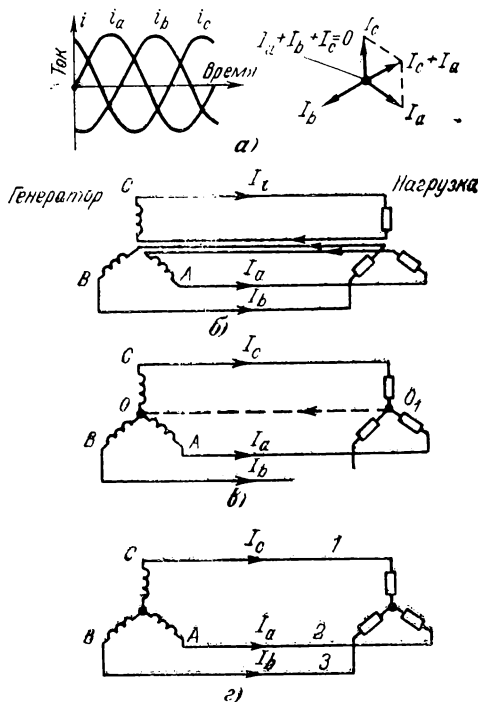


Рис. 27. Трехфазный ток.

кривых на рис. 27,а могут изображать три переменных тока ( $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ), проходящих в трех различных замкнутых цепях. Эти токи одинаковы по величине, но сдвинуты по фазе на  $120^\circ$ . Они вырабатываются тремя отдельными генераторами или одним трехфазным генератором, имеющим три самостоятельных обмотки А, В и С (рис. 27,б).

Три цепи (рис. 27,б) можно объединить в одну трехфазную цепь, содержащую не шесть проводов, а четыре (рис. 27,в), так как в точках О и О<sub>1</sub> токи стекаются

вместе и суммируются. Но если они имеют одинаковую величину, то их сумма в каждый момент времени равна нулю, как показано на рис. 27,а, и в проводе, соединяющем точки  $0$  и  $0_1$ , тока не будет. Провод  $0-0_1$ , показанный на рис. 27,в штриховой линией, лишний, его можно отбросить, и тогда получится трехфазная трехпроводная цепь, изображенная на рис. 27,г.

Замкнутая металлическая цепь образуется с помощью двух проводов, соединяющих источник электроэнергии с приемником. Так рисовалась электрическая цепь в гл. 4. Здесь она образована тремя проводами, и полезно выяснить роль каждого из них. В одни моменты времени ток в проводе 1 проходит от источника к приемнику, а в проводах 2 и 3 — в обратном направлении, от приемника к источнику. В другие моменты времени цепь тока образуется проводом 2 в прямом направлении и проводами 1 и 3 — в обратном. Наконец, в прямом направлении ток проходит по проводу 3 и обратно — через провода 1 и 2. Из рис. 27,а видно, что в определенные моменты времени ток в каждом проводе меняет свое направление, но всегда есть два провода с одинаковым направлением тока, а в третьем ток проходит в противоположном направлении.

Участок трехфазной цепи, на котором действует э. д. с. с данной начальной фазой ( $0$ ,  $120$  или  $240^\circ$ ), электротехники называют «фазой». Они говорят о проводах, принадлежащих той или иной «фазе» (красной, желтой и зеленой, как раскрашиваются шины распределительных устройств), о «фазах» выключателей и трансформаторов, о «фазах» обмотки генератора, о «трехфазных» линиях для передачи электроэнергии. Многозначное использование одного и того же слова иногда встречается в русском языке. Так и слово «фаза», означающее определенное мгновение некоторого периодического процесса, применяется в электроэнергетике в двух значениях: в прямом значении (применительно к переменным токам) и в более широком смысле как название основных участков трехфазной цепи.

Объединение трех однофазных цепей в одну трехфазную дает возможность передать одно и то же количество энергии по трем проводам вместо шести. При этом в 2 раза сокращается расход металла на провода. значительно удешевляются опоры. Кроме того, один трехфазный трансформатор или генератор имеет меньшие

размеры и массу, чем три однофазных такой же суммарной мощности. Современные передачи переменного тока всех напряжений выполняются преимущественно трехфазными. Три провода, поддерживаемые тремя гирляндами изоляторов на каждой опоре, — это трехфазная линия передачи. Если читатель где-нибудь увидит шесть гирлянд с шестью проводами на одной опоре, он может быть уверен, что перед ним две трехфазные линии. Три токоведущих жилы имеют электрические кабели, проложенные под улицами города. Три провода подведены к электрическому двигателю, три ножа имеют рубильник на распределительном щите и т. д. Три — популярное число в технике переменных токов.

Впрочем, линии переменного тока бывают и двухпроводные и четырехпроводные. По двухпроводным линиям электроэнергия доставляется главным образом к приемникам малой мощности и на очень малые расстояния, например в пределах квартиры. Четырехпроводные линии можно видеть в лестничных клетках старинных жилых домов и на улицах небольших городов и поселков. Это трехфазные линии, но с добавлением «нулевого» провода. Нулевым называют провод, соединяющий нулевую точку (нейтраль) источника питания  $O$  с нулевой точкой (нейтралью) приемника  $O_1$  (рис. 27, в). При одинаковых токах в фазах в нулевом проводе тока не будет. Если же фазные токи имеют разную величину, то в нулевом проводе появится небольшой ток. На этот случай и требуется нулевой провод. Если его не будет, то напряжения между проводами трехфазной линии (с разными токами в фазах) и нейтралью  $O_1$  станут неодинаковыми. Одни приемники окажутся включенными на повышенное напряжение, другие — на пониженное. И то и другое плохо. Обычно стремятся напружать все фазы одинаково, но если нельзя гарантировать одинаковые токи в фазах, применяют четырехпроводную систему передачи.

При напряжении 110 кВ и выше нулевые точки линии электропередачи (соответствующих обмоток трансформаторов) присоединяют к земле через специальные заземлители — металлические стержни или полосы, закопанные в грунт. Заземление нейтрали уменьшает перенапряжения, возникающие при авариях, и изоляция передачи получается более дешевой. Однако в такой линии каждое случайное соединение фазы с землей, например через металлическую опору, превращается в короткое замыка-

ние. Линии передачи более низкого напряжения, стоимость изоляции которых относительно невелика, часто эксплуатируют с изолированными от земли нулевыми точками.

**Асинхронный двигатель.** Магнитное поле электрического тока характеризуется величиной и направлением в пространстве. Если ток постоянный, то магнитное поле тоже постоянно. Если ток переменный, то напряженность поля периодически изменяется от некоторого максимального значения до нуля, а затем снова до максимального

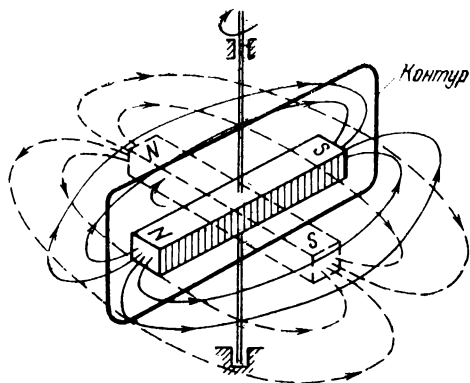


Рис. 28. Магнитное поле вращающегося постоянного магнита.

значения, но в противоположном направлении. В каждой точке пространства, где имеется такое поле, напряженность изменяется, но отношение напряженностей в разных точках во все моменты времени остается одним и тем же. Магнитное поле однофазного переменного тока изменяется как одно целое. Аналогично изменяется, например, световое поле в зале театра, когда перед началом представления постепенно гасится свет. Представьте себе, что освещенность зала периодически увеличивается и уменьшается, и Вы получите зримое представление о поле однофазного тока.

Магнитное поле трехфазного тока изменяется по более сложному закону так, что отношение напряженностей в разных точках пространства зависит от времени. Картина поля в один момент времени отличается от картины поля в другой момент не только величинами напряженности поля, но их распределением. Аналогичное световое поле получится, если периодически изменять яркость

источника света и одновременно перемещать его в пространстве.

Из магнитных полей указанного типа наибольшее практическое значение приобрело вращающееся поле. В простейшем случае вращающееся поле создается равномерным вращением постоянного магнита вокруг его оси, как показано на рис. 28. В каждый момент времени наибольшая напряженность поля получается вдоль наибольшего размера магнита, т. е. в направлении его намагничивания. На протяжении одного оборота наиболь-

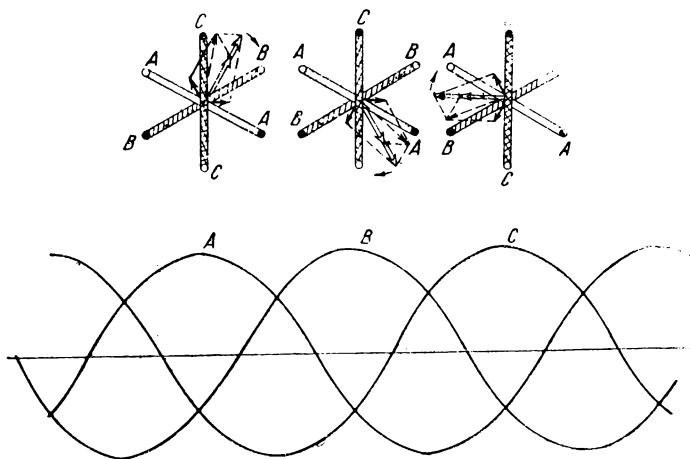


Рис. 29. Вращающееся магнитное поле трехфазного тока.

шая напряженность поля поочередно создается по всем возможным направлениям в плоскости вращения. Абсолютная величина наибольшей напряженности поля остается при этом без изменения. Магнитное поле «вращается» вместе с магнитом.

Вращающееся магнитное поле создает переменное электрическое поле. Поэтому в замкнутом проводящем контуре (витке), охватывающем вращающийся магнит (рис. 28), возникнет переменный ток и на контур будет действовать механический крутящий момент. Если контур способен вращаться, то он двинется вслед за магнитным полем. Вращение магнита передается контуру через электромагнитное поле, без механических связей.

Применение трехфазного переменного тока дает возможность создать вращающееся магнитное поле без

каких-либо движущихся частей. Действительно, в поле каждой из неподвижных обмоток, *А*, *В*, и *С*, питаемых трехфазным переменным током (рис. 29), максимум индукции наступает не одновременно, а со сдвигом во времени. Благодаря этому магнитное поле вращается в пространстве с частотой, зависящей от частоты переменного тока, и будет увлекать за собой всякий замкнутый проводящий контур, расположенный в этом поле. Электроэнергия, поступающая по трехфазной цепи, преобразуется таким простым способом в механическую энергию вращательного движения, в которой нуждаются многие рабочие и транспортные машины.

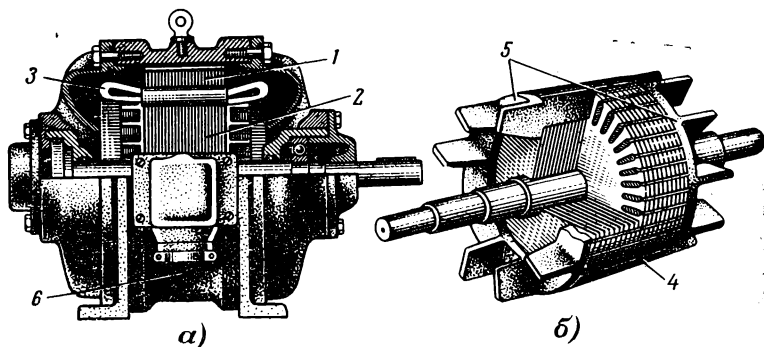


Рис. 30. Асинхронный двигатель.

*а* — общий вид; *б* — ротор.

Вращающееся магнитное поле — основа действия подавляющего большинства электродвигателей переменного тока, так называемых асинхронных двигателей. В наши дни, когда половина всей вырабатываемой электроэнергии преобразуется в механическую с помощью асинхронных двигателей, нетрудно оценить их значение. Труднее это было сделать в 1888 г., когда югославский электротехник Тесла и итальянский физик Феррарис почти одновременно сообщили об открытии явления вращающегося магнитного поля. И все же нашелся человек, который в том же 1888 г. оценил по достоинству выдающееся практическое значение открытия Тесла — Феррариса. Этим человеком оказался русский инженер Доливо-Добровольский.

В короткий срок он разработал систему передачи электроэнергии трехфазным переменным током, теорети-

чески обосновал преимущества этой системы при транспорте электроэнергии и преобразовании ее в механическую. Под руководством Доливо-Добровольского была сооружена первая трехфазная линия передачи, которая несла энергию асинхронному двигателю. С именем Доливо-Добровольского связаны первые успехи переменного тока, принесшие победу над постоянным током.

Как устроен асинхронный двигатель — самый дешевый и надежный из всех электродвигателей? Подобно трансформатору двигатель (рис. 30) имеет стальной магнитопровод, усиливающий магнитное поле. Магнитопровод состоит из двух частей: неподвижного статора 1, похожего на кусок толстостенной трубы, и вращающегося ротора 2, вставленного внутрь статора. Обе части магнитопровода набираются из тонких изолированных пластин кремнистой стали, чтобы уменьшить потери электроэнергии в магнитопроводе. На внутренней поверхности статора размещаются в пазах три обмотки 3, присоединяемые к трехфазному источнику питания. Обмотки выполнены так, что внутри статора возникает вращающееся магнитное поле. На внешней поверхности цилиндрического ротора 4 находится короткозамкнутая обмотка 5, похожая на «беличье колесо». В ней наводятся токи, в результате взаимодействия которых с полем статора создается крутящий момент, увлекающий ротор вслед за вращающимся полем. Вал ротора соединяется непосредственно или через соответствующую передачу с валом рабочей машины.

Если бы ротор двигателя имел частоту вращения магнитного поля, то его обмотка оказалась бы неподвижной относительно поля статора и в ней не наводилась бы э. д. с., не проходил бы ток и не происходило бы преобразование электрической энергии в механическую. Принцип действия асинхронного двигателя предполагает отставание ротора от поля, более медленное его вращение. Различие в частотах вращения, зависящее от нагрузки на валу двигателя, обычно составляет несколько процентов. Название «асинхронный двигатель» отражает отмеченную характерную особенность.

По закону равенства действия и противодействия к статору приложен такой же крутящий момент, как к ротору. Чтобы статор не вращался, его закрепляют в чугунной станине 6, в свою очередь закрепленной на фундаменте.



Между цепями статора и ротора нет электрических соединений, так что асинхронный двигатель с короткозамкнутой обмоткой на роторе не имеет подвижных (трущихся) контактов, причиняющих много хлопот при эксплуатации двигателей постоянного тока. Для работы асинхронного двигателя требуется только один источник питания — трехфазная сеть переменного тока. Другие двигатели переменного тока (синхронные) нуждаются еще во вспомогательном источнике постоянного тока.

Неприхотливый и компактный асинхронный двигатель занял исключительное положение в промышленности и сельском хозяйстве.

Трансформатор, трехфазная передача и асинхронный двигатель — таковы три столпа, которыми держится переменный ток. Поистине три есть «счастлиное» число современной электроэнергетики.

### *Глава шестая*

## **ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ**

Одни линии передачи эксплуатируются с мало изменяющейся нагрузкой, т. е. поток электроэнергии в них сохраняет свою величину. Другие работают днем при полной проектной мощности, а ночью их нагрузка уменьшается в несколько раз. По каким-то линиям электроэнергия передается только в одном направлении. В каких-то других направление потока электроэнергии со временем меняется на обратное: то электростанции района *А* отдают свою энергию району *Б*, то электростанции района *Б* помогают району *А*.

В период паводка гидроэлектростанции на равнинных реках работают на полную мощность, так как водохранилище не может вместить весенние воды. Электроэнергию не умсют накапливать в большом количестве, поэтому все, что выработано на электростанции, нужно немедленно отдать потребителям. Летом картина иная: воду нужно беречь, чтобы река оставалась судоходной как ниже, так и выше плотины. На гидроэлектростанции наступает затишье: останавливают часть турбин, поток электроэнергии в линии уменьшается.

Все эти обстоятельства и еще многое другое принимают во внимание при выборе проектной мощности

линии электропередачи. Но вот линия построена и введена в эксплуатацию. Проходит 5 или 10 лет и выясняется, что мощность электропередачи надо увеличивать. Нет, это не ошибка проектировщиков. Просто в районе нашли богатые залежи бокситов и построили завод для производства алюминия, нуждающийся в большом количестве электроэнергии. Могло быть и так, что численность населения в этом районе возросла быстрее, чем предполагалось. Как бы то ни было, но существующие линии уже не обеспечивают того количества электроэнергии, в котором нуждается район. Нужно строить новые линии или увеличить нагрузку действующих.

**Мощность передачи ограничена.** Увеличить нагрузку существующей линии значительно дешевле, чем построить новую, но можно ли это сделать? Существует ли технический предел для мощности данной линии электропередачи?

Такой вопрос впервые возникает не в ходе времени. Он появляется и требует ответа уже в начале проектирования, когда нужно выбрать рабочее напряжение передачи. От величины напряжения зависят экономические показатели транспорта электроэнергии (см. гл. 4), но вместе с тем и техническая возможность передать требуемую мощность на заданное расстояние. Другая постановка того же вопроса: два пункта намечено связать между собой несколькими линиями; при аварии на одной из них можно ли, хотя бы кратковременно, передать полное количество энергии по линиям, оставшимся в работе?

Мощность данной линии переменного тока ограничивается одним из двух технических факторов: нагревом проводов или устойчивостью передачи. Первое ограничение почти очевидно. Для каждого типа провода известна предельная величина тока, допустимая по нагреву. Произведение предельного тока на напряжение линии передачи определяет ее предельную мощность или, как говорят, пропускную способность. Пропускная способность редко ограничивается нагревом, разве только для очень коротких линий. Гораздо чаще технический предел устанавливается по условиям устойчивости. Чтобы разобраться в смысле второго ограничения, понадобится небольшое отступление.

**Устойчивость равновесия.** Попробуйте поставить на острие отточенный карандаш или другое тело конической

формы. Такая попытка никогда не удастся. Равновесие как-будто возможно, если точка опоры  $A$  и центр тяжести  $B$  тела находятся на одной вертикали. Но, постояв недолго, оно падает, казалось бы без причины. На самом деле причиной являются различные малые возмущения (силы), отклоняющие тело от положения равновесия (движение человека, случайное движение воздуха, сотрясение стола и т. п.).

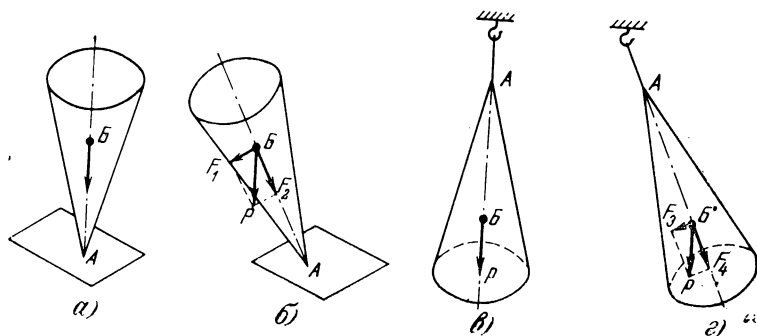


Рис. 31. Положения равновесия.  
а, б — неустойчивое; в, г — устойчивое.

На рис. 31,а изображен конус, центр тяжести которого находится точно на вертикали, проведенной через точку опоры. Масса конуса уравнивается давлением стола на острие. Что произойдет, если случайная сила отклонит конус и центр тяжести сместится с вертикали? Разложение силы тяжести  $P$  на составляющие  $F_1$  и  $F_2$  (рис. 31,б) показывает, что составляющая  $F_1$  будет поворачивать конус вокруг точки опоры. Конус все дальше отклонится от положения равновесия и, в конце концов, упадет. Он находится в положении неустойчивого равновесия.

Рассмотрим теперь устойчивое равновесие — подвешенный конус. Равновесное состояние получится, когда центр тяжести конуса находится на вертикали, проведенной через точку подвеса (рис. 31,в). Масса конуса уравнивается тяжением нити. Если конус сместится, то возникает составляющая  $F_3$  силы тяжести (рис. 31,г), возвращающая его в положение равновесия. В этом суть вопроса об устойчивости по отношению к малым, весьма малым, сколь угодно малым возмущениям (заметьте,

что величина возмущения не фигурировала в приведенных выше рассуждениях). Изучается ли устойчивость равновесия неподвижного тела, как в примере с конусом, или устойчивость равномерного движения, например вращения вала генератора, принципы исследования остаются одни и те же: нужно мысленно вывести тело из состояния равновесия или равномерного движения и выяснить, какие при этом возникнут силы. Если они будут возвращать тело в исходное состояние, то это состояние является устойчивым, точнее устойчивым в «малом».

Подвешенный конус представляет собой механическую систему, устойчивость равновесия которой не зависит от величины начального возмущения. Как ни отклонить его от вертикали, исходное равновесное состояние в конце концов восстановится. О таких системах говорят, что они устойчивы и в «малом» и в «большем». Тот же конус, поставленный на основание, устойчив в «малом», но может быть не устойчив в «большем», так как возврат к первоначальному состоянию зависит в этом случае от величины угла наклона оси конуса. Предоставляем читателю самому определить критический угол наклона, с превышением которого конус займет новое положение.

Передачи электроэнергии относятся к этой последней категории систем, которые могут быть устойчивы при малых возмущениях (по терминологии энергетиков — обладают статической устойчивостью) и неустойчивы при достаточно больших возмущениях (нарушение динамической устойчивости).

Пропускная способность линии передачи переменного тока выбирается так, чтобы была обеспечена, с определенным запасом, устойчивость в «малом». Что касается устойчивости в «большем», то приходится довольствоваться тем, что ее удастся сохранить при некоторых, наиболее частых, возмущениях.

**Равновесие на валу генератора.** При передаче электроэнергии по линии переменного тока возникает проблема устойчивости движения ротора электромеханического генератора, вращаемого паровой или водяной турбиной. В положении равновесия вращающий момент турбины равен тормозящему моменту генератора и ротор движется с неизменной скоростью. Случайное воздействие может изменить величину вращающего или тор-

мозающего момента и тем нарушить равновесие подобно тому, как движение воздуха нарушает равновесное состояние конуса (рис. 31).

Предположим, что вращающий момент турбины стал больше тормозящего момента генератора и частота вращения ротора увеличивается. Если генератор не имеет электрической связи с другими генераторами, то обязательно установится новое положение равновесия, характеризующееся большей отдаваемой мощностью и повышенной частотой тока. Так происходило во времена Доливо-Добровольского. В наше время электропередачи не обособлены: множество генераторов работает на общую электрическую сеть, от которой питается множество потребителей. Только передвижные электростанции или отживающие свой век электростанции очень малой мощности работают каждая сама по себе. При наличии ряда генераторов, соединенных между собой линиями передачи, равновесие на валу генератора может оказаться неустойчивым. Происходит это следующим образом.

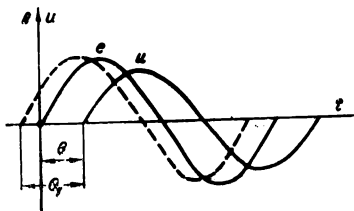


Рис. 32. Изменение во времени э. д. с. генератора и напряжения сети.

$\theta$  — угол сдвига фаз.

Мощность в цепи генератора переменного тока, работающего на сеть, пропорциональна его э. д. с.  $E$ , напряжению  $U$  в точке присоединения линии передачи к сети и синусу угла сдвига фаз  $\theta$  между э. д. с. и напряжением. На рис. 32 показано изменение во времени э. д. с. и напряжения и обозначен сдвиг фаз  $\theta$ , измеряемый в угловых градусах (период синусоиды, равный

0,02 с, соответствует  $360^\circ$ ). Сдвиг фаз может в принципе принимать любые значения в пределах  $0—360^\circ$ . Соответствующая этим значениям электрическая мощность  $P$  при неизменных э. д. с. генератора и напряжении сети будет изменяться по синусоидальному закону, как показано на рис. 33 (в отличие от рис. 32 здесь по горизонтальной оси отложено не время, а угол сдвига фаз).

Если сдвига фаз нет, электрическая мощность равна нулю и в генераторе не возникает тормозящий момент: механическая энергия турбины не преобразуется в электрическую. Наибольшая мощность достигается при сдвиге

фаз в  $90^\circ$ . Таким образом, мощность каждой данной передачи переменного тока, состоящей из генератора, повысительного трансформатора, линии и понизительного трансформатора, ограничена некоторым предельным значением, которое не возможно превысить без изменения э. д. с. генератора или напряжения в сети, принимающей электроэнергию. Из рис. 33 видно также, что при сдвиге фаз более  $180^\circ$  мощность становится отрицательной. Это значит, что поток электроэнергии меняет на-

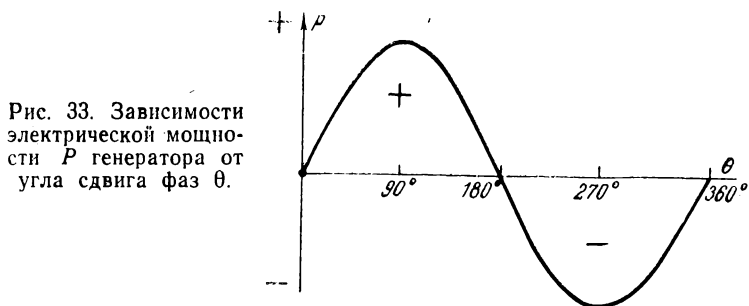


Рис. 33. Зависимости электрической мощности  $P$  генератора от угла сдвига фаз  $\theta$ .

правление и генератор будет потреблять энергию, вместо того, чтобы ее генерировать, т. е. окажется в режиме электродвигателя. Такой ненормальный режим, конечно, не может быть допущен при эксплуатации энергосистемы. После этих предварительных замечаний вернемся к проблеме устойчивости.

Как уже отмечалось, при передаче электроэнергии имеет место сдвиг фаз между э. д. с. генератора и напряжением сети. Произошло незначительное случайное увеличение вращающего момента первичного двигателя (турбины). Равновесие между вращающим моментом турбины и тормозящим моментом генератора (пропорциональным электрической мощности  $P$ ) нарушится, и ротор генератора начнет ускоряться. В других генераторах энергосистемы в это время вращающие моменты уравновешены, и их роторы продолжают вращаться с неизменной частотой, определяющей частоту тока в системе. Вследствие этого начнет увеличиваться сдвиг фаз между э. д. с. ускоряемого генератора и напряжением сети, т. е. синусоида  $e$  на рис. 32 сдвинется влево (штриховая линия). Увеличение угла ( $\theta_1 > \theta$ ) вызовет изменение электрической мощности и соответственно тор-

мозящего момента генератора. От того, как изменится мощность, зависит устойчивость передачи.

Если электрическая мощность увеличится, то небаланс вращающих моментов на валу генератора уменьшится и через некоторое время наступит новое равновесное состояние, характеризующееся несколько большим значением угла  $\theta$  для рассматриваемого генератора при одинаковой скорости вращения всех генераторов системы. Новое значение угла близко к исходному, так как, по предположению, вращающий момент турбины увеличился незначительно. При восстановлении величины вращающего момента турбины снова возникнет небаланс моментов на валу генератора, на этот раз противоположного знака: тормозящий момент будет больше вращающего. Ротор генератора начнет тормозиться, а сдвиг фаз — уменьшаться до тех пор, пока не восстановится исходное положение равновесия. Передача электроэнергии будет устойчивой (в «малом»).

Описанный процесс изменения угла сдвига фаз аналогичен процессу отклонения маятника из устойчивого положения равновесия под влиянием внешней силы и возвращения его в это положение после снятия силы.

Если же с увеличением угла электрическая мощность не увеличивается, а, наоборот, уменьшается, то процессы в передаче пойдут совсем иначе. Случайное увеличение вращающего момента турбины приведет к возрастанию сдвига фаз, за этим следует уменьшение тормозящего момента, дальнейшее нарастание небаланса и т. д. Малое возмущение вызовет большое отклонение от исходного положения равновесия, произойдет лавинообразное ускорение ротора генератора, и генератор «выпадет из синхронизма». Нормальная работа генератора станет невозможной, так как в соответствии с колебаниями угла  $\theta$  он будет работать то в режиме генерации, то в режиме потребления электроэнергии. Передача электроэнергии в этом случае неустойчива, как неустойчив конус, поставленный на свою вершину основанием вверх.

Из рис. 33 видно, что восходящая часть синусоиды в зоне углов  $\theta$  от 0 до  $90^\circ$  соответствует устойчивым режимам передачи, а нисходящая часть, при  $\theta \geq 90^\circ$  — неустойчивым, в которых генератор работать не может. В современных передачах переменного тока допускают сдвиг фаз между э. д. с. генератора и напряжением сети,

принимавшей электроэнергию, до  $70-80^\circ$  при условии, что на генераторе установлен специальный автоматический регулятор возбуждения.

Связь между мощностью электрической передачи, углом сдвига фаз и устойчивостью равновесия наглядно представляется механической моделью, изображенной на рис. 34. Подвижные стержни 1 и 2 имитируют э. д. с. генератора и напряжение приемного конца передачи, а угол между стержнями — сдвиг фаз между э. д. с. и напряжением. Груз 4 соответствует мощности передачи. Пружина 3 отображает основные электромагнитные свойства линии. Нить, на которой подвешен груз 4, прикреплена к стержням 1 и 2.

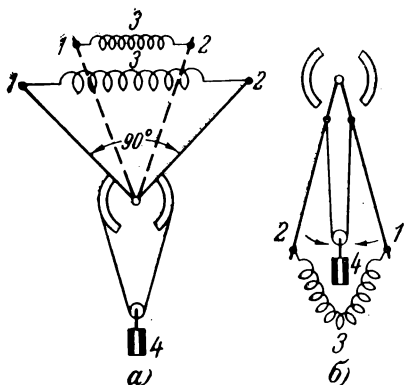


Рис. 34. Механическая модель передачи электроэнергии переменным током.

а — угол сдвига фаз меньше  $90^\circ$ ; б — угол превысил  $90^\circ$ , устойчивость нарушилась.

В исходном состоянии (рис. 34,а) модель находится в равновесии: груз 4 уравнивается натяжением пружины 3 при определенном значении угла между стержнями. Увеличим массу груза. Стержни раздвинутся и установится новое состояние равновесия при большем угле. Но когда угол между стержнями достигнет  $90^\circ$ , дальнейшее увеличение груза нарушит устойчивость: угол будет возрастать самопроизвольно и стержни займут крайнее нижнее положение (рис. 34,б).

Чем меньше сдвиг фаз (угол между стержнями) в исходном режиме, тем дальше отстоит этот режим от критического, при котором нарушается устойчивость, тем больше «запас» устойчивости.

**Пропускную способность передачи можно увеличить.** Сдвиг фаз между э. д. с. генератора и напряжением на приемном конце передачи зависит, кроме э. д. с., еще от четырех величин: мощности передачи, длины линии, величины напряжения и от индуктивного сопротивления передачи.



С увеличением мощности при неизменных э. д. с. и напряжении возрастает сдвиг фаз и режим приближается к предельному по устойчивости, который наступает при угле  $\theta=90^\circ$ . Аналогично влияет увеличение длины линии и ее индуктивного сопротивления, а также индуктивных сопротивлений генератора и трансформаторов. Наоборот, увеличение э. д. с. генератора и напряжения на приемном конце повышает устойчивость передачи энергии по данной линии.

Каждая из влияющих величин отображается в механической модели. Мощности соответствует масса груза, длине линии — длина пружины, величине э. д. с. и напряжения — длина стержней, индуктивному сопротивлению передачи — податливость пружины<sup>1</sup>.

При заданном «запасе» устойчивости, т. е. при работе с определенным сдвигом фаз, мощность существующей линии передачи ограничена. Чтобы перейти этот предел, нужно повысить напряжение (удлинить стержень) или уменьшить сопротивление передачи (поставить в модель более жесткую пружину). Хорошо было бы уменьшить длину линии (длину пружины), но это невозможно.

Одним из эффективных способов увеличения пропускной способности является уменьшение индуктивного сопротивления линии. Что такое индуктивное сопротивление?

Для постоянного тока существует только одно сопротивление — электрическое сопротивление проводника, определяющее преобразование электрической энергии в тепловую. Такое сопротивление свойственно и переменному току, для которого оно известно как активное сопротивление. Но цепь переменного тока характеризуется еще индуктивным сопротивлением, причем для мощных линий электропередачи это сопротивление оказывается во много раз больше, чем активное.

Индуктивное сопротивление есть прямое следствие электромагнитной индукции. Представим себе цепь с очень малым электрическим сопротивлением. Если подключить такую цепь к источнику с постоянной э. д. с., то в ней установится большой ток. В случае источника с переменной э. д. с. ток в цепи получится значительно меньше, так как он будет ограничен не только электрическим (активным) сопротивлением, но и противодейст-

---

<sup>1</sup> Величина ее растяжения под действием единицы силы.

вующей э. д. с., которая наводится переменным магнитным потоком<sup>1</sup>. Отношение напряжения на зажимах цепи с нулевым активным сопротивлением к току в этой цепи называется ее индуктивным сопротивлением. Это сопротивление зависит от частоты тока, от пространственного расположения и размеров проводников цепи. Оно мало зависит от площади поперечного сечения проводников, за исключением тех редких случаев, когда проводником служит ферромагнитный материал, усиливающий магнитное поле.

Индуктивным сопротивлением обладают все звенья передачи переменного тока: генератор, трансформаторы и линия. При длине передачи в несколько сот километров и более преобладает индуктивное сопротивление линии. Индуктивное сопротивление не только создает потерю напряжения на пути от источника электроэнергии к приемнику, но и вызывает сдвиг фаз между напряжениями в различных частях цепи. Объясняется это тем, что напряжение на индуктивном сопротивлении сдвинуто по фазе на  $+90^\circ$  относительно тока, в то время как напряжение и ток в активном сопротивлении совпадают по фазе (рис. 35). Сдвиг фаз между э. д. с. генератора и напряжением на приемном конце передачи возникает именно потому, что существует индуктивное сопротивление.

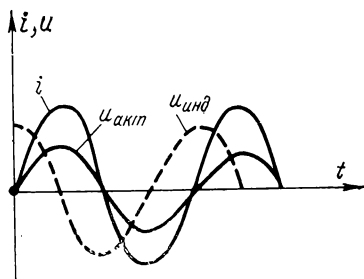


Рис. 35. Изменение во времени тока  $i$ , напряжений на активном сопротивлении  $u_{акт}$  и на индуктивном сопротивлении  $u_{инд}$  при последовательном соединении.

В гл. 2 отмечалось формальное сходство между явлением электрического тока в проводниках и течением жидкости в трубах. В этой связи активное сопротивление электрической цепи соответствует сопротивлению трения в жидкости. Аналогом индуктивного сопротивления можно считать инерционное сопротивление движущейся массы жидкости, которое проявляется при периодическом изменении напора. Так же как в электри-

<sup>1</sup> Электродвижущая сила будет противодействующей в соответствии с правилом Ленца.

ческой цепи, изменение расхода жидкости будет отставать по фазе от изменения напора.

Индуктивное сопротивление линии передачи уменьшают применением расщепленных проводов. Напомним, что расщепление проводов способствует также уменьшению потерь электроэнергии на коронирование (см. гл. 4). Разделить один большой ток на несколько меньших, разнесенных в пространстве, это значит ослабить магнитное поле вблизи проводов и, следовательно, уменьшить их индуктивность. В линиях передачи 500 кВ,

построенных в Советском Союзе, каждая фаза состоит из трех проводов (см. рис. 21). Таким способом индуктивное сопротивление линии было уменьшено на 27%. Для линий 750 кВ принято расщепление на четыре провода.

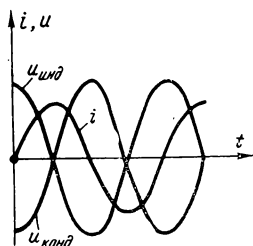


Рис. 36. Изменение во времени тока  $i$ , напряжения на индуктивном сопротивлении  $u_{\text{инд}}$  и на конденсаторе  $u_{\text{конд}}$  при последовательном соединении.

Другая возможность состоит в последовательном включении в передачу электрических конденсаторов. Внутри конденсатора металлическая цепь обрывается—через него проходит только ток смещения. Поскольку конденсаторы включаются последовательно, ток смещения будет равен по величине току проводимости в

проводах, присоединенных к их зажимам. Напряжение на конденсаторе сдвинуто по фазе на  $-90^\circ$  относительно проходящего через него тока. Следовательно, напряжение  $u_{\text{конд}}$  сдвинуто по фазе на  $180^\circ$  относительно напряжения  $u_{\text{инд}}$  на индуктивном сопротивлении (рис. 36). Напряжение на конденсаторе «компенсирует» индуктивное падение напряжения, так как в каждый момент времени действует в противоположном направлении. Последовательное включение конденсатора уменьшает эквивалентное сопротивление передачи, обеспечивая тем самым увеличение ее пропускной способности.

Как устроен конденсатор, способный пропускать ток смещения большой величины?

Ток смещения между двумя металлическими электродами возрастает с увеличением их поверхности и напряженности электрического поля в изолирующей среде,

разделяющей электроды, причем большое значение имеют свойства среды. Так, например, ток смещения в минеральном масле, при прочих равных условиях, будет в несколько раз больше, чем в воздухе.

Напряженность поля не должна быть больше некоторого, определенного для данной среды, значения; иначе нарушится внутренняя изоляция конденсатора и произойдет пробой между электродами. Способность пропускать большие токи в конденсаторах низкой частоты обеспечивается, в основном, за счет увеличения площади электродов.

Для включения в линию передачи используют конденсаторы с бумажно-масляной изоляцией. Электродами служат ленты из алюминиевой фольги. Две металлические ленты перекладываются бумажной лентой и сворачиваются в рулон, образующий одну секцию конденсатора. Секции соединяются между собой параллельно. Набор секций размещается в закрытом металлическом баке и заливается хорошо очищенным минеральным маслом или другой подходящей жидкостью. Присоединение металлических лент к внешней цепи осуществляется через герметические выводы, изолированные от бака фарфоровыми втулками.

В линиях передачи ток бывает настолько значительным, что редко удастся пропустить его через один конденсатор, и тогда применяют батарею, составленную из многих конденсаторов, соединенных между собой **параллельно**.

Последовательное включение конденсаторов использовано, например, на передаче Волжская ГЭС имени В. И. Ленина — Москва. Конденсаторная установка повысила пропускную способность передачи на 20%.

Для повышения пропускной способности передачи переменного тока используется также автоматическое регулирование генератора. При случайном нарушении равновесия на его валу специальный автомат — регулятор возбуждения — быстро изменяет э. д. с. генератора, чтобы восстановилось равенство вращающего и тормозящего моментов. С помощью таких автоматов обеспечивается передача электроэнергии даже при сдвиге фаз между э. д. с. генератора и напряжением сети более чем  $90^\circ$ .

Если электроэнергия передается по нескольким, например двум, линиям, трассы которых совпадают, то целесообразно соединить эти линии между собой не только

по концам передачи, но и в нескольких промежуточных точках. Этой цели служат переключательные пункты, к сборным шинам которых через выключатели присоединяются провода линий. Переключательные пункты обычно совмещают с промежуточными подстанциями передачи. При повреждении линии на одном из участков производится отключение только неисправного участка на ближайших переключательных пунктах. Индуктивное сопротивление передачи увеличивается вследствие отключения участка, но в меньшей степени, чем было бы при отключении всей линии. Таким путем удастся избежать существенного снижения пропускной способности передачи в послеаварийном режиме. Переключательные пункты устраиваются при большой длине линий, более 300—400 км.

Электроэнергетики стремятся повышать пропускную способность линий передачи наиболее дешевыми способами: расщеплением проводов, включением конденсаторов, автоматическим регулированием э. д. с. генераторов, устройством переключательных пунктов. Если это оказывается недостаточным, то прибегают к повышению рабочего напряжения передачи и к увеличению числа линий. Окончательный выбор того или иного технического решения поверяется экономическими расчетами.

По мере увеличения мощности и длины линий передачи переменного тока проблема устойчивости усложняется. В связи с этим вновь привлекли к себе внимание передачи постоянным током, пропускная способность которых не ограничена устойчивостью. В Советском Союзе уже много лет эксплуатируется опытная передача постоянного тока длиной 100 км и мощностью 30 000 кВт, а с 1962 г. — мощная промышленная передача постоянного тока Волжская ГЭС имени XXII съезда КПСС — Донбасс.

### *Глава седьмая*

## **НЕ ВЕРНУТЬСЯ ЛИ К ПОСТОЯННОМУ ТОКУ?**

Первые передачи электроэнергии постоянным током на расстояние, измеряемое десятками километров, были построены еще в 80-х годах прошлого века. Каждая передача состояла из нескольких последовательно включенных генераторов, линии и последовательно включенных приемников энергии. Эксплуатировать такую пере-

дачу неудобно. В самом деле: повредился один из генераторов — прекращается работа всей передачи; нужно отключить один приемник — лишаются электроэнергии все приемники. Принятая в то время схема передачи была вынужденной, так как не существовало другой возможности повысить напряжение в начале линии и подключиться к повышенному напряжению на конце линии.

В наше время электрические генераторы постоянного тока изготавливаются с напряжением несколько тысяч вольт. При таком напряжении можно доставить электроэнергию на расстояние 4—6 км при мощности 5000 кВт. Но разве это соответствует современным требованиям? Один крупный машиностроительный завод потребляет больше энергии, чем может дать вся передача. Кроме того, остается еще проблема понижения напряжения на приемном конце передачи. Простой и надежный электромагнитный трансформатор при постоянном токе не действует. Основа трансформации — периодическое изменение магнитного поля, а постоянный ток создает только постоянное поле.

**Расстояние — союзник постоянного тока.** Отсутствие простого способа повышения и понижения напряжения является коренным недостатком системы электроснабжения на постоянном токе. С другой стороны, при транспорте электроэнергии постоянным током снимается проблема устойчивости передачи. Воздушная линия постоянного тока дешевле, чем линия переменного тока с равной пропускной способностью. Для подземной или подводной линии постоянного тока можно применить кабели с более тонкой изоляцией, чем в кабелях переменного тока, так как изоляционные материалы лучше переносят воздействие постоянного электрического поля, чем переменного. Это объясняется тем, что твердые и жидкие изоляционные материалы нагреваются под действием переменного электрического поля и их электрическая прочность уменьшается. Поэтому постоянный ток очень подходит для транспорта электроэнергии по кабельным линиям через водные пространства и в горных местностях.

Чем больше расстояние, на которое нужно передать электроэнергию, тем отчетливее обрисовываются преимущества постоянного тока. Но как обойти трудности трансформации напряжений при постоянном токе? Выход состоит в том, чтобы генерацию и распределение

электроэнергии оставить за переменным током, а передачу на большое расстояние осуществить постоянным током. При таком решении возникает необходимость двукратного преобразования: на отправном конце передачи переменный ток высокого напряжения преобразуется в постоянный ток высокого напряжения, а на при-

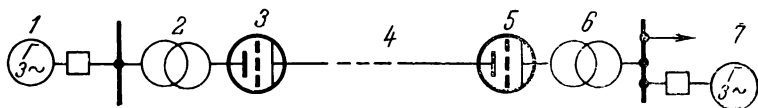


Рис. 37. Схема передачи энергии постоянным током.

1 — электрическая станция, энергия которой передается постоянным током; 2 — трансформатор; 3 — выпрямитель; 4 — линия передачи постоянного тока; 5 — инвертор; 6 — трансформатор; 7 — электрические станции в энергосистеме, принимающей энергию.

емном конце постоянный ток преобразуется в переменный. По распределительной сети электроэнергия передается переменным током и напряжение понижается с помощью электромагнитных трансформаторов (рис. 37).

Вместо проблемы устойчивости передачи возникает проблема преобразования токов.

**Преобразователь переменного тока в постоянный.** Преобразование переменного тока в постоянный осуществляется выпрямителями, а обратное преобразование — инверторами. Из большого числа разнообразных выпрямителей остановимся на ртутном выпрямителе, пока единственно применяемом для преобразования переменного тока в постоянный при передаче электроэнергии. Можно ожидать, что в указанных целях в дальнейшем будут использовать полупроводниковые кремниевые выпрямители, уже получившие широкое применение в преобразовательных установках меньшей мощности и напряжения.

Ртутный выпрямитель (рис. 38) представляет собой закрытый металлический сосуд с двумя электродами: анодом 1 из материала, почти не испускающего электронов (чистый графит), и катодом 2, который образует

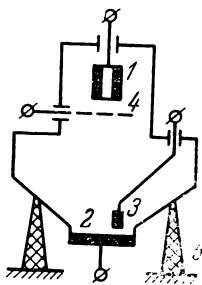


Рис. 38. Схематическое изображение ртутного выпрямителя.

1 — анод; 2 — катод; 3 — вспомогательный электрод; 4 — сетка; 5 — изолятор.

Ртутный выпрямитель (рис. 38) представляет собой закрытый металлический сосуд с двумя электродами: анодом 1 из материала, почти не испускающего электронов (чистый графит), и катодом 2, который образует

ся поверхностью ртути, налитой на дно сосуда. Из сосуда откачен воздух, так что сосуд заполнен разреженными парами ртути. Вблизи катода расположены вспомогательные электроды 3. Если зажечь электрическую дугу между вспомогательными электродами и ртутью, то поверхность последней разогреется и у основания дуги образуется «катодное пятно», испускающее электроны. Поток электронов ионизирует пары ртути в сосуде.

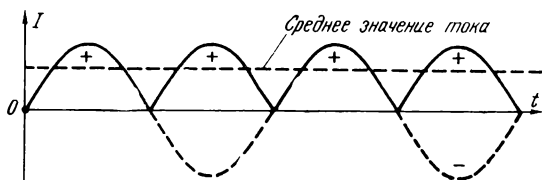


Рис. 39. Изменение тока  $I$  во времени при однополупериодном выпрямлении.

Присоединим анод и катод выпрямителя к источнику с переменной э. д. с. Внутри выпрямителя образуется электрическое поле, направленное от анода к катоду в одни полупериоды и от катода к аноду в другие. Ток через выпрямитель будет проходить только при наличии электронов, выбрасываемых из катодного пятна. В те полупериоды, когда поле направлено к катоду, электроны устремляются к аноду и возникает электрическая дуга, через которую может проходить значительный ток. Сопротивление дуги получается малым, так как ионизация паров ртути препятствует образованию объемных зарядов.

Следуя за изменением э. д. с., ток принимает нулевое значение и в этот момент дуга между анодом и катодом гаснет. В новом полупериоде электрическое поле направлено от катода к аноду и электроны, имеющие отрицательный заряд, будут отбрасываться от анода. В этом полупериоде ток через выпрямитель не проходит. Изменение тока выпрямителя со временем показано на рис. 39. Получается не постоянный ток, а пульсирующий: направление сохраняется, но величина тока периодически изменяется. При использовании трехфазного источника питания, с тремя э. д. с., сдвинутыми по фазе на  $120^\circ$ , пульсации выпрямленного тока становятся меньше.



На рис. 40 показаны две трехфазные схемы выпрямления. Обмотки высшего напряжения трансформатора  $T$  подключены к анодам 1 выпрямителя. Катод 3 трехфазного выпрямителя (рис. 40,  $a$ ) соединяется с положительным проводом цепи постоянного тока. Второй провод, отрицательный, присоединен к нулевой точке обмоток трансформатора. Выпрямленный ток, т. е. ток линии передачи, поочередно проходит по обмотке каждой фа-

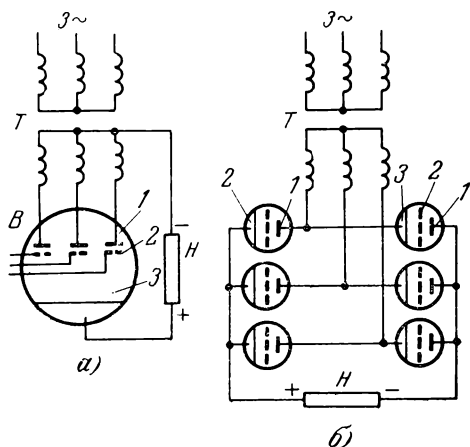
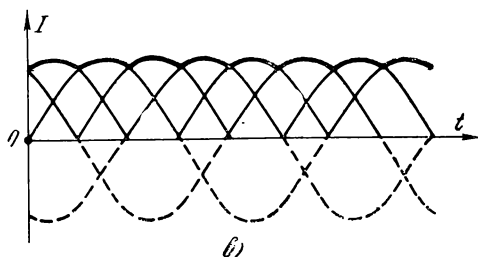


Рис. 40. Схемы преобразования переменного тока в постоянный

$a$  — трехфазная с нулевым выводом;  $b$  — трехфазная мостовая;  $в$  — изменение тока  $I$  во времени.



зы трансформатора. Погасание дуги на одном аноде и зажигание ее на другом происходит в строго определенном порядке, который задается изменением фазных э. д. с. Величина тока в линии пульсирует, но в меньшей степени, чем при однофазном выпрямлении (сравните кривые на рис. 39 и 40,  $в$ ).

Пульсации тока можно сгладить еще в большей степени, если включить последовательно с линией реактор — аппарат с большим индуктивным и малым актив-

ным сопротивлением. Такой аппарат представляет большое сопротивление для переменной составляющей тока и малое для постоянной и, следовательно, не ухудшит условий работы передачи.

При передаче электроэнергии постоянным током для выпрямления используется так называемая мостовая схема (рис. 40,б), которая обеспечивает малые пульсации выпрямленного тока. К началу каждой обмотки трехфазного трансформатора присоединяются два выпрямителя: один — анодом 1, другой — катодом 3. Всего требуется шесть выпрямителей. К положительному проводу передачи присоединяются катоды трех выпрямителей (левых), к отрицательному проводу — аноды трех других выпрямителей. Чередование работающих (горящих) анодов также определяется чередованием фазных э. д. с., как в схеме на рис. 40,а, причем левые выпрямители пропускают ток в такт с положительными полуволнами э. д. с., а правые — с отрицательными. Выпрямленное напряжение в этой схеме изменяется от 85 до 100% амплитуды переменной э. д. с. при среднем значении 95%.

**Как регулируется мощность передачи.** Выпрямители представляют собой удобное средство регулирования мощности передачи постоянного тока, осуществляемого путем изменения напряжения на отправном конце линии. С этой целью выпрямитель снабжается еще одним электродом — металлической сеткой 4 на рис. 38 или 2 на рис. 40, расположенной между катодом и анодом. К сетке присоединяется один зажим специального источника э. д. с., второй зажим этого источника соединяется с катодом. В зависимости от направления э. д. с. образуется электрическое поле с направлением от сетки к катоду или, наоборот, от катода к сетке. В последнем случае электроны, выброшенные из катодного пятна, будут отталкиваться сеткой и не попадут на анод, несмотря на благоприятное направление э. д. с., действующей в цепи анод — катод. Следовательно, с помощью сетки можно задержать или вовсе устранить зажигание дуги между анодом и катодом, т. е. уменьшить время прохождения тока через выпрямитель. Удлинение бестоковой паузы приводит к уменьшению среднего значения выпрямленного напряжения. Таким путем осуществляется регулирование напряжения и мощности на отправном конце передачи постоянного тока.

**Преобразование постоянного тока в переменный (инвертирование)**, также осуществляемое ртутными преобразователями, представляет собой более сложный процесс, правильное течение которого обеспечивается только при наличии сеточного управления преобразователем. Схема, применяемая для инвертирования, в принципе аналогична схеме на рис. 40,б. Постоянный ток из линии поступает в аноды группы из трех преобразователей; катоды другой группы соединены со вторым проводом

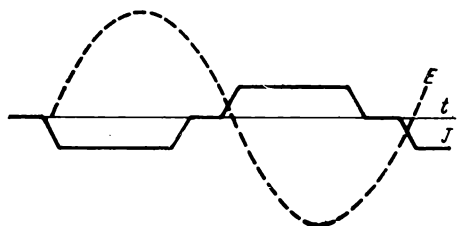


Рис. 41. Изменение тока во времени при инвертировании постоянного тока в переменный.

линии. Сеточное управление настраивается так, что часть периода ток линии проходит через обмотку трансформатора в одном направлении, другую часть периода — в обратном направлении. В обмотках получается ток, состоящий из трапецеидальных импульсов (рис. 41), которые далее поступают в сеть переменного тока через вторичные обмотки трансформатора. Для приближения формы кривой тока к синусоидальной в линию постоянного тока включается сглаживающий реактор. Регулирование величины переменного напряжения при инвертировании осуществляется также с помощью сеточного управления.

**Преимущества и недостатки передачи постоянного тока.** Передача постоянного тока связывает генераторы электростанции с энергосистемой переменного тока. Выпрямители на отправном конце передачи и инверторы на приемном обеспечивают независимость генераторов от системы: э. д. с. генераторов может быть сдвинута на любой угол относительно напряжения системы. Более того, частота э. д. с. генератора может отличаться от частоты переменного тока в энергосистеме. При передаче постоянным током не существует проблемы устойчивости равновесия на валу генератора с вытекающими из нее требованиями синхронности вращения всех генераторов (одна частота во всей энергосистеме) и ограничен-

ных по величине сдвигов фаз между э. д. с. и напряжениями.

Передачи постоянного тока не нуждаются в выключателях, если на них нет промежуточных присоединений. При коротком замыкании в линии или в сети переменного тока на сетки всех преобразователей подаются запирающие э. д. с. После первого прохождения анодного тока через нулевое значение дуга гаснет и вновь зажечься уже не может, так как преобразователь «заперт».

Важные преимущества передачи постоянным током — отсутствие предела мощности по условиям устойчивости и меньшая стоимость линии. С другой стороны, передачам постоянного тока свойственны специфические недостатки: обратные зажигания выпрямителей и «опрокидывание» инверторов. Первое явление состоит в том, что иногда возникает поток электронов из анода, что приводит к короткому замыканию трансформатора. Под «опрокидыванием» инвертора понимается такое состояние, когда в мостовой схеме одновременно горят дуги в двух преобразователях, принадлежащих одной фазе. В этом случае ток линии не попадает в трансформатор и инвертирование не происходит. Для предотвращения обратных зажиганий применяются два-три последовательно соединенных преобразователя вместо одного. Есть также способы борьбы с «опрокидыванием» инверторов.

**Перспективы постоянного тока.** Экономическое сравнение двух способов передачи электроэнергии показывает, что линия постоянного тока дешевле, но конечные подстанции постоянного тока дороже подстанций переменного тока, так как, помимо трансформаторов, на них должны быть еще преобразовательные устройства. Передача электроэнергии постоянным током по воздушным линиям становится целесообразной при больших расстояниях, когда экономия в стоимости линии перекрывает дополнительные затраты на дорогие конечные подстанции. При существующих соотношениях цен применение постоянного тока оправдано для передачи на расстояние более 1000 км. Если же требуются промежуточные отборы электроэнергии, то граница выгоды постоянного тока отодвигается за 1200—1300 км.

Несомненно целесообразно применение постоянного тока для подводных передач электроэнергии. За рубе-

жом построен ряд таких передач, например: на остров Готланд (Швеция) на расстояние 100 км при напряжении 110 кВ и мощности 100 тыс. кВт; через пролив Ла-манш для соединения электроэнергетических систем Англии и Франции, мощностью 160 тыс. кВт при напряжении 220 кВ; между островами Японии, между островами Новой Зеландии и др.

В СССР действует с 1962 г. передача постоянного тока при напряжении между проводами 800 кВ, длиной 470 км и мощностью 750 тыс. кВт. По этой линии электроэнергия передается в Донбасс в те периоды, когда имеется избыток воды на Волжской ГЭС имени XXII съезда КПСС. В периоды маловодья возможна передача электроэнергии в обратном направлении, в район Волгограда, что позволяет не уменьшать выдачу электроэнергии гидростанции на Москву.

Когда будут использованы в полной мере энергетические ресурсы европейской части СССР, туда придется перебрасывать электроэнергию из Сибири, где сосредоточена большая часть ресурсов страны. Для этого потребуются линии передачи с пропускной способностью свыше 10 млн. кВт и длиной 2000 км. Такие передачи выгоднее осуществлять на постоянном токе. В решении XXIV съезда КПСС предусмотрена подготовка к сооружению в 1975—1980 гг. линии передачи постоянного тока с напряжением между проводами 1500 кВ для передачи электроэнергии от тепловых станций Экибастуза в центральные районы страны. Пропускная способность этой передачи достигнет 6 млн. кВт.

Вопрос о том, не вернуться ли к постоянному току, — вопрос своевременный, хотя возвращение относится только к передаче на очень большое расстояние. Генерация электроэнергии и ее распределение пока остаются за переменным током.

**Немного истории.** В заключение полезно вспомнить историю развития передачи электрической энергии: первые шаги на постоянном токе и последовавшие затем успехи переменного тока, который, как казалось 25—30 лет тому назад, полностью и навсегда победил постоянный ток.

Как и другие великие достижения техники, передача электроэнергии на значительные расстояния осуществлялась не сразу, а через длинный ряд догадок, предположений и попыток. Еще в XVIII в. Ломоносов, проявляв-

ший большой интерес к электричеству, думал о возможности передать «электрическую силу на великое расстояние». Не останавливаясь на передаче на расстояние слабых электрических сигналов в телеграфии, следует упомянуть русского артиллериста Петрушкевича, который в 1869 г. успешно передал электроэнергию при мощности в несколько киловатт на расстояние 80 м для питания электрического прожектора.

В 1873 г. французский физик Фонтен осуществил передачу уже на 1 км (на выставке в Вене) от электрического генератора постоянного тока. В 1876 г. русский инженер Пироцкий передал энергию от аналогичного генератора мощностью 4,5 кВт на расстояние 1 км по рельсам железной дороги. К сожалению, Пироцкий пришел к неправильному выводу о том, что на большое расстояние можно передать лишь малую мощность.

В 1880 г. в первом номере журнала «Электричество» появилась известная статья Лачинова «Электромеханическая работа и элементарная теория электродвигателей», в которой ученый впервые обосновал возможность экономичной передачи электрической энергии на любые расстояния, указав на роль высокого напряжения. В 1881 г. к такому же выводу пришел французский электротехник Депре, которому удалось на практике подтвердить правильность этих взглядов. Стремясь повысить дальность, мощность и экономичность передачи постоянного тока, Депре построил ряд передач постоянного тока. Так, в 1882 г. для Мюнхенской выставки под его руководством была осуществлена опытная передача Мисбах — Мюнхен на расстояние 57 км. В Мисбахе находился электромеханический генератор мощностью 2,2 кВт, вращаемый паровым двигателем. Передача электроэнергии осуществлялась по стальной проволоке диаметром 4,5 мм, укрепленной на телеграфных изоляторах. Вследствие низкого напряжения передачи (1300 В) к. п. д. ее был менее 25%. Но уже в следующем, 1883 г. Депре испытал передачу напряжением 2700 В с к. п. д. 44% на расстояние 16,5 км. В том же году была осуществлена передача Визиль — Гренобль при напряжении 3000 В с к. п. д. 62% на расстояние 14 км.

Постепенно росли дальность и экономичность транспорта электроэнергии постоянным током. Однако грозный соперник — переменный ток уже начинал свое победоносное шествие.

В 1891 г. для электротехнической выставки во Франкфурте была сооружена под руководством нашего соотечественника Доливо-Добровольского первая в мире передача трехфазным переменным током Лауфен — Франкфурт длиной 150 км. На гидроэлектростанции Лауфен были установлены генераторы переменного тока, напряжение которых повышалось с помощью трансформаторов с 90 до 15 200 В, а во Франкфурте напряжение снижалось до 112 В. Передавалась электроэнергия при мощности 220 кВт с к. п. д. 79%. Это был огромный успех: длина, мощность и к. п. д. новой передачи были в то время рекордными. Интересно отметить, что во Франкфурте эта энергия приводила в движение трехфазный асинхронный двигатель — тоже изобретение Доливо-Добровольского.

Несмотря на многочисленные попытки сторонников постоянного тока усовершенствовать свои установки, победа оказалась на стороне переменного тока. До 1927 г. еще сохранялась мощная передача постоянного тока Мутье — Лион, построенная в 1906 г. Однако начавшийся с 1891 г. период интенсивного развития техники переменного тока завершился к середине XX столетия повсеместным его использованием для генерации, передачи и распределения электроэнергии, причем с ростом дальности и передаваемой мощности непрерывно повышался уровень напряжения.

Развитие электрических передач в нашей стране шло по тому же пути. До революции, в 1915 г., была построена первая передача 70 кВ длиной 70 км от торфяной электростанции вблизи Москвы. Еще при жизни В. И. Ленина, в 1922 г., была сооружена первая передача 110 кВ (Каширская электростанция — Москва) длиной 120 км. Первая передача 154 кВ от Днепровской ГЭС была построена в 1932 г., а первая передача 220 кВ от Свирской ГЭС до Ленинграда — в 1933 г. Длина этой передачи составила около 240 км. В 1956 г. завершено сооружение двухцепной передачи Волжская — ГЭС имени В. И. Ленина — Москва длиной 850 км с напряжением 400 кВ (впоследствии повышено до 500 кВ) и мощностью 1150 тыс. кВт (в настоящее время 1350 тыс. кВт). Наконец, в 1959 г. была введена в строй дальняя передача Волжская ГЭС имени XXII съезда КПСС — Москва, работающая при напряжении

500 кВ. Длина этой передачи около 1000 км, мощность (по двум линиям) — 1500 тыс. кВт.

К настоящему времени общая протяженность линий 500 кВ в Советском Союзе превышает 15 тыс. км; такое напряжение и впредь будет широко применяться при передаче и распределении больших потоков электроэнергии. Дальнейшее развитие энергетики нашей страны, с ее большими расстояниями и ожидаемыми гигантскими потоками электроэнергии, требует еще более высоких напряжений для передач переменного тока. Уже несколько лет эксплуатируется опытно-промышленная линия 750 кВ Конаково — Москва. В текущем пятилетии будет построена и введена в эксплуатацию линия 750 кВ на Украине, которая наложится на существующую там сеть 330 кВ, чтобы обеспечить надежную электрическую связь, в том числе и с международной энергетической системой «Мир». На очереди — освоение еще более высокого напряжения — 1200 кВ.

Если в первые годы советской власти уровень напряжений наших электрических передач отставал по времени на 12—15 лет от США и на 5—10 лет от Западной Европы, то, начиная с 1956 г., СССР стоит в первых рядах в области передачи электроэнергии как переменным, так и постоянным током.

Гармоничное сочетание электрических передач переменного и постоянного тока ляжет в основу построения надежной и экономичной Единой энергетической системы СССР (см. гл. 9), задача постепенного создания которой поставлена Программой КПСС.

### *Глава восьмая*

## **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Количество приемников электроэнергии очень велико, и вести к каждому из них свою линию высокого напряжения явно неразумно из-за ее большой стоимости. Поэтому наряду с передачей возникает необходимость распределения электроэнергии, т. е. доведения ее до каждого прибора, в котором электроэнергия полезно преобразуется в нужную форму (механическую, лучистую, тепловую, химическую).

**Электрическая сеть.** Распределение электроэнергии производится с помощью электрических сетей, которые содержат большое число линий передачи, присоединен-



ных к сборным шинам подстанций (узловые точки сети). К этим шинам приключены трансформаторы, соединенные со стороны низшего напряжения с другими сборными шинами, представляющими собой узловую точку сети другого напряжения. Получается многоярусная сеть. Так, например, в разветвленной сети 110 кВ имеется много подстанций с трансформаторами, понижающими напряжение со 110 до 35 кВ (для питания района с радиусом до 50 км) и со 110 до 10 кВ (для питания района с радиусом до 15 км). Разветвленная сеть 35 кВ питается, как уже сказано, от ряда подстанций 110 кВ, но она содержит, вместе с тем, подстанции, где напряжение

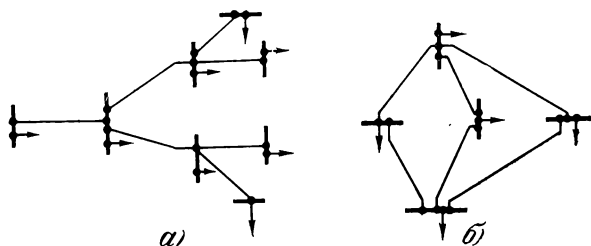


Рис. 42. Электрические сети энергосистем.  
а — радиальная; б — кольцевая.

уменьшается до 10 или 6 кВ, а также до 660, 380 или 220 В. В свою очередь в сети 6—10 кВ имеются подстанции или простые узловые точки (в буквальном смысле слова) с отпайками на трансформаторы, понижающими напряжение до 380 В или 220 В. При этом низком напряжении электроэнергия используется потребителями.

Таким образом, электрическая сеть состоит из ряда сетей различных напряжений, связанных между собой трансформаторами и охватывающих географический район, который снабжается электрической энергией.

В настоящее время огромная территория нашей страны еще недостаточно охвачена электрическими сетями. По плану полной электрификации страны густота электрических сетей будет быстро увеличиваться, в первую очередь на обжитой территории.

По своей конфигурации сети делятся на радиальные, не имеющие замкнутых контуров — колец, и замкнутые или кольцевые (рис. 42). Радиальные сети дешевле, но им свойственна меньшая надежность. Авария на любом

участке радиальной сети обязательно лишает электроэнергии часть потребителей. Если авария происходит на отпавном (головном) участке сети, то все потребители останутся без электроэнергии. Отсюда понятны преимущества кольцевых сетей, в которых все потребители обеспечиваются электроэнергией и при аварии в сети, сопровождаемой отключением одной из линий. Недостатки кольцевой сети — увеличение токов короткого замыкания и трудности создания надежной релейной защиты.

В больших городах используют кольцевые сети, разделенные на участки с помощью выключателей так, что в нормальном режиме они работают как радиальные. При аварии какого-либо элемента сети участки, лишившиеся электроэнергии, автоматически соединяются с соседними участками. Эта операция называется автоматическим вводом резерва (АВР). Так устраняются отмеченные выше недостатки кольцевой сети. В сетях напряжением 35 кВ и выше, где сетка является более редкой, обычно используются неразделенные замкнутые кольца.

Следует, однако, заметить, что по мере роста территориальной плотности нагрузки ( $\text{кВт/км}^2$ ) и обусловленной этим густоты сети приходится делить в отдельных точках сети 110 кВ и даже 330 кВ. Необходимость деления, ухудшающего нормальный режим сети и снижающего надежность электроснабжения, диктуется увеличением токов короткого замыкания.

**Напряжения изменяются.** Важнейшей задачей правильной эксплуатации электрических сетей является поддержание нужной величины напряжений. Каждый электрический прибор, машина изготавливаются для работы при вполне определенном напряжении, которое называется номинальным. Включение на большее напряжение сокращает срок службы устройства. При низком напряжении электродвигатели перегреваются, а иногда и останавливаются, лампы дают мало света, удлиняется время приготовления пищи на электрической плитке и т. п. Определенные значения напряжения должны быть также в узловых точках сети самого высокого напряжения, чтобы сохранялась устойчивая работа генераторов, являющихся источниками электроэнергии (см. гл. 6).

От чего зависит величина напряжений в различных точках сети? Потребление электроэнергии неодинаково в разное время суток. Ночью загрузка сети обычно невелика; она возрастает в утренние часы, затем наблю-

дается небольшой спад и вновь потребление энергии увеличивается в вечерние часы. Ночное и дневное уменьшение нагрузки зависит от состава потребителей. В больших городах ночной спад нагрузки велик, так как значительная доля потребляемой электроэнергии расходуется на бытовые нужды. В районах, где преобладает промышленная нагрузка, ночной спад может составлять всего 15—20% максимума. Изменение расхода электроэнергии сопровождается изменением нагрузочных токов, проходящих по сети. Так как линии передачи и трансформаторы обладают сопротивлением, на котором теряется часть напряжения, то напряжение у потребителей зависит от загрузки сети.

Однако уровень напряжения определяется не только и не столько нагрузочными токами. Дело в том, что в сетях переменного тока, кроме основных потоков электроэнергии от генераторов к приемникам, циркулируют еще потоки электроэнергии, обязанные своим существованием токам смещения и э. д. с. электромагнитной индукции. Величина и направление потоков «блуждающей» энергии зависят от числа приключенных приемников, от их характера (лампы накаливания, двигатели, электрические печи и т. д.), мощности и места присоединения к сети, т. е. от загрузки сети. Вот эта электромагнитная энергия, блуждающая по сети, и является основной причиной изменения величины напряжений в узловых точках сети.

**Реактивная мощность.** В сети и среди потребителей имеются устройства, способные накапливать определенное количество энергии магнитного или электрического полей. Воздушные линии всех напряжений обладают индуктивным сопротивлением, свидетельствующим о наличии магнитного поля заметной величины. Сильные магнитные поля создаются в трансформаторах и асинхронных двигателях. В воздушных линиях высокого и сверхвысокого напряжения и в кабельных линиях протекают токи смещения, с которыми приходится считаться даже при низкой частоте 50 Гц вследствие большой протяженности электрических сетей. Электрические поля, с которыми связаны токи смещения, несут в себе запасы электроэнергии. Все эти магнитные и электрические поля дважды за период создаются и уничтожаются. Каждый из элементов электрической цепи, способный накапливать электроэнергию, дважды за период запасает и

отдает ее другим элементам, порождая потоки «блуждающей» энергии. Среднее за период значение электрической энергии при этом равно нулю: сколько поступило в данный элемент, столько он выдал обратно. Полезно превращение электроэнергии в другие формы, т. е. расходования ее при этом не происходит.

Изменения запаса электроэнергии в элементе цепи, не расходуящем ее, характеризуется так называемой реактивной мощностью. Эта величина имеет размерность электрической мощности и равна произведению напряжения и тока элемента. Особое название возникло потому, что ток в таком элементе сдвинут по фазе относительно напряжения на  $+90^\circ$ , если энергия накапливается электрическим полем, и на  $-90^\circ$ , если энергия накапливается магнитным полем. Во всяком элементе цепи, только расходуя энергию, ток и напряжение совпадают по фазе.

Расход электроэнергии характеризуется активной мощностью (вспомните «активное сопротивление», гл. 6). В предшествующем изложении под словом «мощность» всегда имелась в виду именно активная мощность. И в дальнейшем часто будем опускать для краткости прилагательное «активная».

Строго говоря, не существует таких электротехнических устройств, энергетическое состояние которых можно характеризовать только активной или только реактивной мощностью. В действительности каждое устройство и расходует и накапливает, а затем возвращает энергию. Но в некоторых случаях абсолютно преобладает расходование электроэнергии, так что реактивную мощность можно практически считать равной нулю (электрическая плитка, лампа накаливания). В других случаях главенствует накопление электроэнергии, и тогда можно не считаться с активной мощностью (конденсатор, реактор). В большинстве устройств приходится принимать во внимание оба вида мощности. Характеризуя нагрузку в узловой точке сети, электроэнергетики обычно называют две величины: активную и реактивную мощности. Последняя измеряется в вольтамперах или киловольтамперах реактивных.

Соотношение между расходом энергии и способностью ее накапливать характеризуют коэффициентом мощности ( $\cos \varphi$ ), который определяется формулой

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}, \quad (11)$$

где  $P$  — активная мощность;  $U$  — действующее значение напряжения;  $I$  — действующее значение тока;  $\varphi$  — угол сдвига фаз между напряжением и током.

При отсутствии сдвига фаз  $\varphi=0$  и  $\cos \varphi=1$  и

$$P=UI. \quad (12)$$

Формула (12) действительна, когда реактивная мощность равна нулю. Наличие реактивной мощности свидетельствует о фазовом сдвиге между напряжением и током, т. е. об уменьшении коэффициента мощности; при угле  $\varphi=90^\circ$  по формуле (11)  $P=0$ . Соотношение между мощностями удобно выражается следующими формулами:

$$\sqrt{P^2 + Q^2} = UI \quad (13)$$

или

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad (14)$$

где  $Q$  — реактивная мощность.

Полезное расходование электроэнергии переменного тока неизбежно сопровождается циркуляцией энергии, характеризуемой реактивными мощностями элементов сети. Казалось бы, первичные двигатели электростанции могут не замечать реактивных нагрузок, поскольку циркуляционные потоки поддерживаются элементами самой электрической цепи. Однако это не совсем так. Если  $Q \neq 0$ , то для получения заданной мощности  $P$  требуется больший ток (при данном напряжении). Вследствие циркуляции электроэнергии увеличиваются токи в линиях передачи, трансформаторах, генераторах и, следовательно, возрастают и потери напряжения в индуктивных сопротивлениях сети, и тепловые потери энергии в проводах и обмотках. Приrost потерь электроэнергии должен быть покрыт за счет подвода дополнительного количества электроэнергии к первичным двигателям.

**Регулирование напряжений.** Для обеспечения требуемых напряжений в узловых точках сети применяются, кроме регулирования э. д. с. генераторов, следующие основные способы: изменение числа витков одной из обмоток трансформаторов, установка специальных устройств для поддержания надлежащего баланса реактивных мощностей (конденсаторов, синхронных компенсаторов), увеличение пропускной способности сети (строительство новых линий и др.).

Напряжение вторичной обмотки трансформатора зависит от отношения чисел витков первичной и вторичной обмоток. Если вторичное напряжение получается слишком низким, то в ряде случаев можно поправить дело увеличением числа витков вторичной обмотки или уменьшением числа витков первичной обмотки. Поэтому в одной из обмоток трансформатора обычно делают дополнительные выводы (ответвления) от разных ее частей. Это дает возможность регулировать напряжение ступенями по несколько процентов. Переключение с одного ответвления на другое выполняется под током и автоматически.

Изменение коэффициента трансформации достигает цели, когда неполадки с напряжением имеют местный характер, т. е. наблюдаются только в некоторых узловых точках сети. Если же вся сеть перегружена циркуляционными потоками электроэнергии, которой обмениваются между собой различные ее части, то требуются более радикальные меры.

Пусть к одной и той же узловой точке сети приключены реактор 1, накапливающий энергию магнитного поля, и конденсатор 2, накапливающий энергию электрического поля (рис. 43). При одинаковой величине токов  $I_p$  и  $I_k$  в этих аппаратах во внешней цепи тока не будет, так как энергия переходит из одного аппарата в другой, не попадая в сеть. Реактивные мощности реактора и конденсатора оказываются сбалансированными.

Если в сети преобладают потребители реактивной мощности, т. е. устройства, в которых ток сдвинут по фазе относительно напряжения на  $-90^\circ$ , то нужно добавить источники реактивной мощности, в которых ток сдвинут по фазе относительно напряжения на  $+90^\circ$ . При правильном размещении источников по сети можно уменьшить циркуляцию электроэнергии и выправить напряжения в узловых точках. В ночные часы в отдельных частях сети могут преобладать источники реактивной мощности и тогда целесообразно подключать потребителей реактивной мощности в виде реакторов.

В качестве дополнительных источников реактивной мощности используют конденсаторы с бумажно-масляной

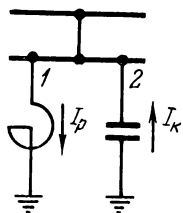


Рис. 43. Параллельное включение реактора и конденсатора.

изоляции и синхронные компенсаторы. О конденсаторах уже говорилось в гл. 6 в связи с проблемой устойчивости передачи энергии.

Синхронный компенсатор, в принципе, устроен так же, как электромеханический генератор электрической энергии, но работает в двигательном режиме: электроэнергия для вращения поступает из сети. Компенсатор не связан с каким-либо первичным двигателем и потому вырабатывать электроэнергию для полезного использования не может. Когда э. д. с. компенсатора больше напряжения в узловой точке сети, обмен электроэнергией между компенсатором и сетью происходит так, что компенсатор играет роль источника реактивной мощности. Если э. д. с. меньше напряжения сети, то компенсатор становится потребителем реактивной мощности. Среднее за период значение электроэнергии компенсатора равно нулю (точнее, оно равно малой отрицательной величине, так как из сети поступает электроэнергия для вращения ротора компенсатора и покрытия тепловых потерь в обмотке и стальном магнитопроводе). В тех случаях, когда добавление источников реактивной мощности не дает эффекта, приходится усиливать сеть: строить новые линии, устанавливать трансформаторы.

**Потери энергии в сети.** В каждой линии передачи, воздушной или кабельной, а также в трансформаторах теряется электроэнергия на нагревание проводников током. В трансформаторах, кроме потерь в обмотках, еще имеются потери в стальных магнитопроводах: в процессе перемагничивания стали небольшая часть энергии магнитного поля трансформатора преобразуется в тепловую энергию. Сумма потерь в разветвленных сетях достигает 6—10%. Около 1/10 частей всей произведенной энергии растрчивается в процессе ее транспортировки! Уменьшение потерь в сетях является важной задачей.

Основным способом ограничения потерь в сети является своевременное увеличение ее пропускной способности в соответствии с ростом нагрузки. Далее нужно уменьшить токи, т. е. поддерживать напряжение сети на возможно более высоком уровне. Работа с пониженным напряжением резко увеличивает потери в сетях именно из-за роста тока. Дело в том, что мощность на валу большинства асинхронных двигателей при понижении напряжения сети уменьшается незначительно и, следовательно, увеличивается притекающий к ним ток.

Мощность нагревательных приборов и ламп накаливания уменьшается, но вследствие преобладания в современных энергосистемах двигательной нагрузки ток сети в конечном итоге увеличивается.

Нужно использовать все имеющиеся линии передачи, обеспечивая оптимальную нагрузку каждой из них. В связи с этим стремятся ремонтировать линии без отключения, под напряжением. Некоторые виды ремонтов удается выполнить в таком режиме.

Большое значение имеет разумное использование генераторов энергии и источников реактивной мощности, приключенных к сети. Добиваются того, чтобы полезные потоки электроэнергии направлялись по кратчайшим путям, а циркуляционные потоки были минимальными. На заводах, где много асинхронных двигателей, для этой цели устанавливают конденсаторы.

При назначении нагрузки генераторов станций и источников реактивной мощности нельзя руководствоваться только стремлением уменьшать потери в сети. Киловатт-час энергии, выработанный на одной станции, стоит дороже или дешевле, чем на другой; то же можно сказать о стоимости генерации реактивной мощности. В первую очередь выгодно использовать электростанции с дешевой энергией, даже допуская при этом несколько большие потери в сети. Выбор наиболее экономичного распределения нагрузок между электростанциями представляет собой весьма сложную задачу, для решения которой приходится прибегать к быстродействующим вычислительным машинам.

### *Глава девятая*

## **САМАЯ БОЛЬШАЯ МАШИНА СОВРЕМЕННОГО ОБЩЕСТВА**

Значение линий передачи высокого и сверхвысокого напряжения состоит не только в том, что они служат основой, костяком разветвленной электрической сети, по которой электроэнергия доставляется сотням тысяч потребителей, а также и в возможности передавать электроэнергию на значительное расстояние, соединять электростанции на параллельную работу и создавать тем самым энергетические системы.

**Энергетическая система** — это совокупность ряда электрических станций, общей сети, в которую они выдают



энергию, и приемников, присоединенных к сети. При зарождении электроэнергетики независимые электростанции питали самостоятельные местные сети. Такое решение давно уже признано неэкономичным. Теперь электростанции объединяются в энергосистемы, мощность которых непрерывно растет. Первые энергосистемы Советского Союза (Московская, Ленинградская) начинались с мощностей в сотни тысяч киловатт. В настоящее время имеются энергосистемы, мощность электростанций которых измеряется миллионами киловатт. Более того, энергосистемы соединяются между собой и, в конечном итоге, образуется Единая энергетическая система (ЕЭС). Уже возникло такое крупное объединение, как, например, Единая энергетическая система европейской части СССР, охватывающая сотню электростанций суммарной мощностью в несколько десятков миллионов киловатт. К 1980—1985 гг. мощность Единой энергетической системы СССР достигнет сотен миллионов киловатт.

**Почему не выгодно обособленная работа?** Предположим, что две одинаковые электростанции могут работать каждая только на свою сеть. Пусть на каждой электростанции установлено по четыре одинаковых агрегата<sup>1</sup>. Одна электростанция, взятая в отдельности, может выдавать потребителям электроэнергию из расчета  $\frac{3}{4}$  своей полной мощности, так как один агрегат ( $\frac{1}{4}$  или 25%) должен быть в резерве на случай аварии одного из работающих агрегатов. Присоединим обе станции к общей сети. Теперь они могут вырабатывать электроэнергию из расчета  $\frac{7}{8}$  своей мощности, поскольку мощность одного резервного агрегата составит только 12,5% суммы мощностей. Таким образом, объединение двух электростанций уменьшило величину резерва вдвое. Если бы таких электростанций было три, то величина резерва уменьшилась бы до 8,3% (в 3 раза).

Далее, предположим, что из двух соединяемых электростанций одна гидроэлектростанция (ГЭС), а другая — тепловая электростанция (ТЭС). Пока ГЭС не связана с ТЭС, ей приходится самой покрывать всю нагрузку своей сети во все периоды времени. Пусть мощность ГЭС достаточна для электроснабжения района и в часы максимальной нагрузки. Однако возможность выработки электроэнергии на ГЭС ограничена количеством посту-

---

<sup>1</sup> В электроэнергетике называют одним словом «агрегат» электромеханический генератор и его первичный двигатель.

пающей воды, которое может оказаться недостаточным для покрытия суточной потребности в электроэнергии. Тогда придется отключать часть потребителей данного района. В то же время ТЭС, покрывающая максимальную нагрузку своего района, легко справилась бы с этим делом, так как ограничения по выработке ТЭС не имеет (топливо можно подвезти). В периоды малой нагрузки возможности ТЭС по производству электрической энергии оказываются неиспользованными, в то время как потребители соседнего района отключаются из-за недостатка воды на ГЭС. Что получится, если присоединить ГЭС и ТЭС к общей сети?

Пусть мощности ГЭС и ТЭС составляют по 100 тыс. кВт. Потребность каждого из районов пусть будет по мощности тоже 100 тыс. кВт, а по энергии — 1600 тыс. кВт·ч в сутки. Далее, пусть ГЭС располагает суточной энергией 1200 тыс. кВт·ч. При обособленной работе в районе с ГЭС не хватает 400 тыс. кВт·ч энергии, а в районе с ТЭС остается неиспользованным 800 тыс. кВт·ч, так как ТЭС может за 24 ч выработать 100 тыс.  $\times 24 = 2400$  тыс. кВт·ч. При соединении районов ГЭС и ТЭС в энергосистему получается потребность в максимальной мощности 200 тыс. кВт, а в суточной энергии — 3200 тыс. кВт·ч. Если теперь поручить ТЭС выработку 2000 тыс. кВт·ч, то никаких ограничений в потреблении вводить не нужно.

Конечно, этот пример только иллюстрирует возможность лучшего использования ТЭС по электроэнергии при ее объединении с ГЭС. Может ли ТЭС в действительности выработать 2000 тыс. кВт·ч, зависит еще от графика нагрузки, т. е. от характера изменения мощности на протяжении суток. Во всяком случае при объединении ГЭС и ТЭС можно поручить ТЭС покрытие более плотной (базовой) части графика (рис. 44), а менее плотную часть графика (пиковую) покроет ГЭС, возможности которой по выработке энергии ограничены количеством воды. Такое сочетание позволяет строить ГЭС достаточно большой мощности, с полным использованием плотины, что уменьшает стоимость производимой энергии. Таким образом, объединение ГЭС и ТЭС может дать большой экономический эффект.

Не меньший эффект дает объединение двух ГЭС с различными условиями приточности воды на протяжении года,

При объединении электростанций через общую сеть объединяются и потребители электроэнергии, что также дает существенные преимущества: график суммарной нагрузки становится более ровным, так как периоды максимальной нагрузки в разных районах, как правило, не совпадают во времени. Отсюда вытекает возможность уменьшить мощность новых тепловых электростанций, т. е.

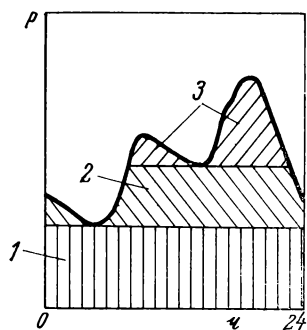


Рис. 44. Суточный график нагрузки.

1 — базовая часть; 2 — полубазовая часть; 3 — пиковая часть;  $P$  — потребная мощность.

сократить затраты на их сооружение. Повышается использование действующих электростанций и снижается себестоимость электроэнергии. Наконец, объединение электростанций в энергосистеме позволяет вводить в строй выгодные агрегаты мощностью 300—800 тыс. кВт.

Все эти обстоятельства привели к тому, что современная энергетика развивается в форме энергосистем, когда многие электростанции соединяются с помощью электрической сети в один производственный механизм.

**Диспетчер.** Управление энергосистемой осуществляется специальным персоналом — диспетчерами энергосистем, из производственных помещений, называемых диспетчерскими пунктами. Диспетчерский пункт — мозговой центр энергосистемы. Диспетчер имеет надежную связь со всеми электростанциями и с крупнейшими подстанциями, получает информацию о важнейших событиях в энергосистеме и отдает распоряжения, которые немедленно выполняются. Диспетчер следит за режимом энергосистемы: заботится о частоте тока, о поддержании напряжений в основных узловых точках сети, наблюдает за распределением активных и реактивных мощностей между электростанциями, чтобы получились наименьшие затраты на производство энергии в целом по энергосистеме. Особенно велика роль диспетчера в случае возникновения аварии в энергосистеме. Только тот, кто в курсе дел во всей энергосистеме, может быстро разобраться в происшедшем, свести к минимуму вредные последствия аварии и восстановить нормальную работу системы.

Часть информации поступает к диспетчеру по телефону, и по этому каналу связи частично осуществляется управление. Вместе с тем, широко используются устройства телеизмерений, т. е. измерений на расстоянии, телесигнализации и телеуправления.

Телеизмерительные устройства измеряют загрузку электростанций в данный момент времени, напряжение в различных точках энергосистемы, ток в линиях передачи и трансформаторах. Телесигнализация сообщает о состоянии оборудования электростанций и подстанций. Вместе с телеизмерениями она дает возможность чувствовать пульс энергосистемы: если случится авария, телесигнал будет передан раньше, чем поступит доклад по телефону. Наконец, телеуправление дает возможность диспетчеру, не покидая диспетчерский пункт, пускать в ход гидроагрегат или останавливать его, включать или отключать выключатель и т. п.

В крупной энергосистеме диспетчер не может лично управлять всем: для этого не хватило бы и 48 ч в сутки. Обычно в такой системе имеются районные диспетчеры, ведающие электростанциями и сетями отдельных районов. Очень часто районный диспетчер не только дает распоряжения, но и сам управляет подстанциями, на которых совсем нет людей. Ближайший помощник диспетчера — автоматика. Наряду с релейной защитой, без которой электроэнергетика не могла обойтись даже на первом этапе своего развития, в жизнь энергосистем прочно вошли автоматическое повторное включение линий передачи (АПВ); автоматическая разгрузка, т. е. отключение части приемников электроэнергии при авариях; автоматическое включение резервных линий и трансформаторов (АВР); автоматические регуляторы возбуждения генераторов (АРВ); автоматические регуляторы частоты (АРЧ) и др. Автоматические устройства установлены не только на диспетчерском пункте, но и на местах, и их слаженное действие во многом упрощает работу диспетчера. Это как бы его помощники, рассредоточенные по всей энергосистеме.

**Сутки на диспетчерском пункте.** Теперь мы приглашаем Вас, читатель, на диспетчерский пункт энергосистемы. Посмотрите сами, как работает эта гиганская машина, размеры которой измеряются тысячами километров.

Ночь. Нагрузка энергосистемы минимальна. Остановлены агрегаты на гидроэлектростанциях, на тепловых

станциях уменьшена или полностью прекращена подача топлива в топки котлов, в первую очередь тех, которые дают пар наименее экономичным агрегатам. Сейчас трудность в том, чтобы удержать в норме напряжение в сети. В этот период суток напряжение обычно повышается вследствие спада нагрузки. Приходится уменьшать поступление реактивной мощности от генераторов, развозбуждать синхронные компенсаторы, отключать конденсаторы и включать реакторы. Может быть, даже, отключать некоторые, мало загруженные линии передачи высокого напряжения.

Ночь на исходе, близится утро. Стрелка на сумматоре мощности всех электростанций движется вправо: нагрузка растет. На станциях увеличивают подачу топлива в котлы, возрастает давление пара, турбины принимают нагрузку. Диспетчер, не мешкай! Если заблаговременно, за несколько часов, не дать команду растопить котлы, если вовремя не пустить агрегаты тепловых электростанций, то может случиться непоправимое. Ведь утром нагрузка растет быстро. Просыпаются люди и зажигают свет, готовясь уходить на работу. Выезжают из парков и депо трамваи, троллейбусы, поезда. На заводах включают двигатели станков и насосов, разогревают электрические печи. Потребление электрической энергии нарастает.

Страшно подумать: уже все работоспособные агрегаты электростанций загружены на полную мощность, а нагрузка неумолимо прибывает. Начинается снижение частоты, верный признак недостатка мощности источников электроэнергии, уменьшается напряжение. Это вредно для оборудования электростанций и потребителей и весьма опасно для энергосистемы в целом — может нарушиться устойчивость передачи энергии с прекращением параллельной работы генераторов. История энергетики знает такие случаи, последствия которых сопоставимы по своим масштабам со стихийными бедствиями. Поэтому, диспетчер, больше внимания. Не забывай, что руководить — это значит предвидеть!

Опытный диспетчер предвидит. Вовремя включаются новые агрегаты. Утренний максимум не застал его врасплох. Нагрузка возрастает, но все время остается резерв мощности. Теперь энергосистеме не грозит опасность.

По утрам требуется большая реактивная мощность для асинхронных двигателей. Значит, следи за напряже-

нием, не давай ему снизиться. Это обеспечивается наличием автоматических регуляторов напряжения на трансформаторах и резервов источников реактивной мощности.

Все хорошо! Напряжение в норме. Утренний максимум кончился и теперь можно заняться делами электростанций и сетей.

Начинается текущая работа: нужно отключить линию передачи. Для чего? — спросите Вы. Может быть, для того, чтобы подтянуть зажимы проводов или сменить поврежденные изоляторы, убрать с проводов бумажный змей, запущенный ребятами. Мало ли, какие работы могут быть. Вопрос о том, можно ли отключить данную линию, не перегрузятся ли другие линии, продуман еще накануне. Именно сегодня это сделать можно: ремонтируется генератор на смежной электростанции, мощность передачи все равно будет уменьшена. Диспетчер проверяет нагрузку дефектной линии, смежных линий и принимает решение: отключить линию на ремонт по утвержденной заявке. Следует указание дежурному на подстанции: «Отключить выключатель линии 21». На расстоянии 200 км от диспетчерского пункта дежурный подходит к пульту управления и поворачивает рукоятку. Выключатель отключен. Диспетчер увидел по телесигналу, что его команда выполнена: символ выключателя на схеме района переменял цвет с зеленого на красный. Через несколько минут поступает донесение по телефону, подтверждающее правильность телесигнала. Теперь следует указание на другую подстанцию: «Отключить выключатель линии 21». Указания выполнены, и линия отключена с двух сторон, так что тока в ней нет. Можно допускать людей к работе? Нет, еще нельзя. Случайно включают выключатель на одной из подстанций, линия окажется под напряжением и люди будут убиты. Поэтому дается новое указание на обе подстанции: «Отключите разъединители со стороны линии и заземлите линию». Заземлить линию — это значит осуществить надежное металлическое соединение всех трех проводов с землей. Теперь, если по ошибке включают выключатель, напряжение не попадет на линию. Заземлить линию нужно не только на случай ошибочного включения. На проводах воздушной линии довольно долго сохраняются электрические заряды, создающие опасные напряжения. Кроме того, провода заряжаются атмосферным электричеством. На заземленной линии можно работать без опасений.

Начинает смеркаться, нужно готовить систему к вечернему максимуму. Работают почти все агрегаты. Хорошо, что успели закончить ревизию нового агрегата 300 тыс. кВт. Диспетчер смотрит на частотомер: 50 Гц, частота нормальная, все в порядке. Но вот частота снизилась до 49,9 Гц. Надо пускать резервные генераторы; на гидроэлектростанции это можно сделать за одну минуту. Энергосистема проходит вечерний максимум.

Люди сидят дома у телевизора или едут в троллейбусе, гуляют по освещенным улицам. Всюду им сопутствует электрическая энергия. Без нее многое было бы невозможно. Без транспорта электрической энергии — то же. Электроэнергетическая система работает в эти часы напряженно, но так же четко, как днем. Издалека, по воздушным линиям передачи, электрическая энергия доставляется в город.

Вечерний максимум кончается. Частота немного растет, так как имеется избыток мощности. Команда: «Остановить агрегаты, гасить часть котлов». Автоматические регуляторы частоты регулируют впуск энергоносителя в турбины так, чтобы частота была нормальная. Приближается полночь, нагрузка резко падает. Диспетчер не остается без работы: разгружать электростанции нужно не как попало, а по экономическим соображениям. На помощь приходит вычислительная машина, советник диспетчера. Она решает систему уравнений, принимает во внимание действующие ограничения по току, напряжению и т. п. и подсказывает диспетчеру: надо разгружать станцию № 3, она сейчас самая неэкономичная. Диспетчер доверяет своему советчику, дает распоряжение на станцию. Недалеко то время, когда машина-советчик сможет сама посылать команды на станции, управлять энергосистемой так, как автопилот управляет самолетом.

Прошли всего лишь одни сутки. За это время несколько раз сменились диспетчеры. Сутки прошли благополучно. Но не всегда так бывает. Иногда возникает авария. Теперь диспетчер находится в положении командира корабля, застигнутого тайфуном в открытом море. От его опытности, умения быстро разобраться в том, что происходит, умения быстро найти правильное решение зависит быстрая ликвидация последствий аварии.

Что случилось? Судя по телесигналам полностью отключилась мощная электростанция, связанная с систе-

мой двумя линиями передачи. Частота в энергосистеме снижается, так как мощность станций, оставшихся в работе, недостаточна. Диспетчер поручает помощнику заняться аварийной станцией, уточнить, что произошло, и попытаться восстановить ее связь с системой. Тем временем сам диспетчер занимается энергосистемой. Автоматы частотной разгрузки работали правильно, и часть потребителей отсоединена. В действие вводятся резервные агрегаты и удается восстановить нормальную частоту. Помощник диспетчера поставил под напряжение со стороны системы одну из отключившихся линий передачи, затем включил в работу станцию. Авария ликвидирована быстро. Причина ее в том, что одна линия была повреждена (оборвался провод), а другая отключилась из-за неправильного действия релейной защиты. Последующий анализ аварии поможет предотвратить ее повторение. Впрочем, это уже дело других специалистов. Задача диспетчера — восстановить нормальную работу энергосистемы.

**Единая энергетическая система — ЕЭС.** По мере роста энергетических систем возникает тенденция к их соединению друг с другом. Объединение энергосистем дает не только те преимущества, какие получаются при объединении электростанций в энергосистему, но и некоторые другие. Так, например, при объединении с помощью дальней передачи энергосистем, расположенных на разных меридианах земного шара, получается большой выигрыш в необходимой мощности электростанций вследствие несовпадения во времени максимумов нагрузки (разное поясное время).

Постепенное создание ЕЭС европейской части СССР уже стало фактом. Сооружение Волжской ГЭС имени В. И. Ленина и Волжской ГЭС имени XXII съезда КПСС с тысячекилометровыми передачами на Москву, соединение ГЭС имени В. И. Ленина с Уралом, а ГЭС имени XXII съезда КПСС с Южной объединенной энергосистемой объединило энергосистемы Москвы, Калинин, Тулы, Ярославля, Горького, Иванова, Куйбышева, Волгограда, Челябинска, Свердловска, Перми, Ростова, Донбасса и Днепра в одну огромную энергосистему. Объединения энергосистем созданы на Северо-западе страны, в Сибири, в Средней Азии.

Управление объединением энергосистем осуществляется соответствующими диспетчерскими организациями,



в поле зрения которых уже не отдельные станции и сети, а целые энергосистемы. Это неизбежно и разумно, так как один человек — диспетчер объединенного диспетчерского управления (ОДУ) — в состоянии охватить только ограниченное количество объектов. Диспетчер ОДУ регулирует взаимодействие энергосистем, т. е. потоки энергии между системами, и имеет дело с диспетчерами энергосистем. В свою очередь диспетчер энергосистемы направляет работу электростанций и сетей своей системы, и т. д. Образуется стройная система целенаправленного управления энергетическим хозяйством, отвечающая техническим особенностям отрасли: огромной скорости распространения электромагнитного поля и отсутствию резервных «складов» для хранения электроэнергии.

Процесс объединения энергосистем в СССР продолжается. На очереди соединение ЕЭС Центральной Сибири с ЕЭС Центра европейской части страны. В не очень отдаленной перспективе возникнет ЕЭС СССР, охватывающая всю страну. Это будет наиболее экономичное решение задачи полной электрификации, поставленной В. И. Лениным еще в годы становления советской власти, в тяжелых условиях разрухи и гражданской войны. Пророческое ленинское определение коммунизма как сочетания советской власти и электрификации всей страны воплощается в жизнь.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кржижановский Г. М. Энергетика и ее будущее. Ломоносовские чтения. Современные проблемы науки и техники. М., «Молодая гвардия», 1949, с. 154—174.
2. Электрификация СССР, под ред. П. С. Непорожного. М., «Энергия», 1970, 544 с.
3. Жимерин Д. Г. История электрификации СССР. М., Соцэкгиз, 1962, 458 с.
4. Канаев А. А. От водяной мельницы до атомного двигателя. Изд. 2-е, М., «Машгиз», 1957, 236 с.
5. Адирович Э. И. Электрический ток, изд. 2-е, М., Гостехиздат, 1950, 48 с.
6. Поль Р. Учение об электричестве. Перевод с нем. (17-го изд.). М., Физматгиз, 1962, 516 с.
7. Ломоносов В. Ю. и Поливанов К. М. Электротехника. Основные понятия, изд. 9-е, М., Госэнергоиздат, 1960, 392 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
Глава первая. ПЕРВОЕ ЗНАКОМСТВО . . . . .	5
Глава вторая. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ . . . . .	12
Глава третья. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ В ПУТИ . . . . .	29
Глава четвертая. ЧТО НУЖНО ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ . . . . .	38
Глава пятая. ПОЧЕМУ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК? . . . . .	60
Глава шестая. ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПЕРЕМЕН- НЫМ ТОКОМ . . . . .	72
Глава седьмая. НЕ ВЕРНУТЬСЯ ЛИ К ПОСТО- ЯННОМУ ТОКУ? . . . . .	84
Глава восьмая. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИ- ЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ . . . . .	95
Глава девятая. САМАЯ БОЛЬШАЯ МАШИНА СОВРЕМЕННОГО ОБЩЕСТВА . . . . .	103
Список литературы . . . . .	112

МАРК САМУИЛОВИЧ ЛИБКИНД  
ИСААК МОИСЕЕВИЧ МАРКОВИЧ

## Электричество в пути

Редактор *Е. А. Каминский*  
Редактор издательства *Э. Я. Бранденбургская*  
Обложка художника *Е. В. Никитина*  
Технический редактор *Н. А. Галанчева*  
Корректор *Г. Г. Желтова*

---

Сдано в набор 23/VIII 1974 г. Подписано к печати 27/III 1975 г.  
Т-06524      Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>      Бумага типографская № 2  
Усл. печ. л. 5,88      Уч.-изд. л. 6,67  
Тираж 25 000 экз.      Зак. 904      Цена 24 коп.

---

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

---

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете Совета Министров СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
Москва М-114, Шлюзовая наб., 10.