

*Ф. Е. Евдокимов*

# ОБЩАЯ ЭЛЕКТРО- ТЕХНИКА



*Ф. Е. Евдокимов*

# ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Допущено  
Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебника  
для учащихся неэлектротехнических  
специальностей техникумов



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1987

ББК 31.2  
Е 15  
УДК 621.3

Рецензенты:  
канд. техн. наук, доц. А. А. Бокуняев  
(Московский электротехнический институт связи);  
Л. А. Прибылова — преподаватель  
(Московский электромеханический техникум)

**Евдокимов Ф. Е.**

Е 15    **Общая электротехника: Учеб. для учащ. не-  
электротехн. спец. техникумов.— М.: Высш. шк.,  
1987.—352 с.: ил.**

В книге изложены теоретические и прикладные вопросы электро-  
техники; даны элементарные сведения об электрическом и магнитном  
полях, рассмотрены принципы действия, устройство, основные характе-  
ристики электроизмерительных приборов электрических машин, транс-  
форматоров, электрических и магнитных элементов автоматики; при-  
ведены сведения по электромеханическим материалам, электроприводу,  
электрооборудованию.

Е 2302010000—153 181—87  
001 (01)—87

ББК 31.2  
6П2.1

© Издательство «Высшая школа», 1987

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В учебные планы большинства неэлектротехнических специальностей техникумов входит предмет «Общая электротехника с основами электроники».

Необходимость этого предмета обусловлена тем, что в народном хозяйстве из всех видов энергии наиболее широко применяется электрическая энергия и специалист-техник любого неэлектротехнического профиля в своей практической работе встречается с различным технологическим, силовым и осветительным электрооборудованием, электрическими приборами и устройствами для контроля, автоматизации технологических процессов.

В настоящее время особое внимание уделяется развитию и внедрению электронной вычислительной техники, приборов с применением микропроцессоров, автоматизации машин и оборудования и созданию на этой основе автоматизированных технологических комплексов.

Разделы по автоматизированным технологическим процессам и автоматическому электрооборудованию предусмотрены в профилирующих предметах учебных планов. Изучение этих предметов возможно только при условии предварительной подготовки учащихся по теоретическим вопросам электротехники и электроники, знания общих принципов действия и устройства силового электрооборудования, приборов контроля и элементов автоматики.

Программа предмета «Общая электротехника с основами электроники» состоит из двух разделов. Настоящая книга написана в соответствии с содержанием первого раздела «Общая электротехника».

Автор выражает благодарность рецензентам рукописи: канд. техн. наук, доц. А. А. Бокуняеву и инж. Л. А. Прибыловой за сделанные ими полезные замечания и ценные предложения, а также инж. В. Ф. Евдокимову, выполнившему значительную работу по подготовке рукописи к изданию.

Отзывы и предложения направлять по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

*Автор*

Современная энергетика — это ключевая отрасль народного хозяйства страны. Она играет определяющую роль в развитии научно-технического прогресса, интенсификации общественного производства. В настоящее время энергетика переживает период крупных преобразований, изменения условий ее развития. Долгосрочная стратегия развития энергетики нашла свое отражение в Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года. Предусмотрено более эффективно развивать топливно-энергетический комплекс, реализовать Энергетическую программу СССР, продолжить работы по развитию электрификации всех отраслей народного хозяйства и формированию Единой энергетической системы страны, повышению надежности и качества электроснабжения народного хозяйства. Будет значительно увеличена выработка электроэнергии в целом, в том числе на атомных электростанциях не менее чем в 5—7 раз, увеличена добыча газа в 1,6—1,8 раза, намечается шире использовать нетрадиционные возобновляемые источники энергии.

**Применение электрической энергии.** Из всех используемых видов энергии в настоящее время наиболее широко применяется электромагнитная энергия. Этот вид энергии в повседневной практике принято называть электрической энергией.

Энергия — одно из свойств материи. Для любого вида энергии можно назвать материальный объект, который является ее носителем. Механическую энергию несут, например, вода, падающая на лопасти гидротурбины, ветер, заведенная пружина; тепловую — нагретый газ, пар, горячая вода.

Носителем электрической энергии является особая форма материи — электромагнитное поле. Его главная особенность состоит в том, что оно оказывает силовое воздействие на электрически заряженные частицы, причем сила зависит от скорости частиц и величины их заряда.

Это свойство электромагнитного поля является основой связанных между собой электрических и магнитных явлений, известных из курса физики — взаимодействия электрически заряженных или намагниченных тел, электрического тока, электромагнитной индукции и др.

Использованием этих явлений для получения, передачи и пре-

образования электрической энергии занимается электротехника. Применение электромагнитного поля и его энергии для передачи информации без проводов — задача радиотехники.

Электрическую энергию широко используют во всех отраслях промышленного и сельскохозяйственного производства, на транспорте, в науке, быту; преобразуют ее в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую, химическую) в целях приведения в действие машин и механизмов, получения тепла и света, изменения химического состава веществ, производства и обработки материалов и т. д.

Преобразование электрической энергии в механическую с помощью электродвигателей позволяет наиболее удобно и экономически выгодно приводить в движение разнообразные рабочие машины: металлорежущие станки, прокатные станы, подъемно-транспортные механизмы, насосы, вентиляторы, швейные и обувные машины, молотилки, зерноочистительные, мукомольные машины и т. д. (см. гл. 11). Электродвигатели применяют на поездах, морских и речных судах, городском транспорте.

Во многих технологических процессах используют преобразование электрической энергии в тепловую и химическую. Так, например, с помощью электронагрева и электролиза получают высококачественные стали, цветные металлы при наивысшей чистоте производимых материалов, а в результате электротермической обработки — высокое качество металлов, резиновых изделий, пластмасс, стекла, древесины.

Большое развитие, особенно в нашей стране, получила электросварка, которая дает высокое качество соединения металлов и обеспечивает высокую производительность труда и другие технико-экономические показатели.

Электрохимические процессы, составляющие основу гальванотехники, позволяют получить антикоррозионные покрытия, идеальные поверхности для отражения лучей и т. д.

В установках искусственного освещения применяют только электрические источники света, при этом качество освещения уступает лишь естественному солнечному.

Современная техника связи (телефон, телеграф, радиоустройство) стала возможна только благодаря применению электрической энергии. Еще совсем недавно в таких областях науки, как медицина, биология, астрономия, геология, математика, применялись электроустройства общего назначения (электролампы, электродвигатели, электронагреватели и т. д.), а теперь все шире внедряются специализированные электрические приборы, аппараты, установки, предназначенные для выполнения практических работ или научных исследований.

Для дальнейшего научно-технического прогресса большое зна-

чение имеют электронные вычислительные машины, которые стали высокоэффективными средствами экономических расчетов, планирования и управления, автоматизации различных установок и технологических процессов.

**Получение и передача электрической энергии.** Электрическую энергию получают из других видов энергии непосредственно или путем промежуточных преобразований. Для этого используют природные энергетические ресурсы — органическое и ядерное топливо, а также возобновляемые источники энергии: течение рек, водопады, океанские приливы, солнечную радиацию, ветер, геотермальные источники.

В настоящее время для электрификации промышленности, сельскохозяйственного производства, транспорта и других отраслей народного хозяйства наибольшую часть электрической энергии производят путем преобразования химической энергии органического топлива на тепловых электростанциях (ТЭС).

Тепловая энергия, получаемая при сжигании топлива, поступает в тепловые турбины (паровые, газовые), превращается в них в механическую энергию, которая передается в электрические генераторы (см. гл. 8, 9) — преобразователи механической энергии в электрическую. На втором месте по объему производства электроэнергии находятся гидроэлектростанции (ГЭС), где используется энергия течения рек, преобразуемая с помощью гидротурбин и гидрогенераторов в электрическую.

В ряду основных производителей энергии следом за тепловыми и гидроэлектростанциями стоят атомные электростанции (АЭС). Первичным видом энергии на АЭС является энергия ядер атомов, которую преобразуют в тепловую энергию, а далее схема получения электрической энергии аналогична схеме тепловой станции.

Учитывая быстрое уменьшение запасов органического топлива, а также неблагоприятное воздействие тепловых электростанций на окружающую природу, ведутся поиски технически и экономически удовлетворительных решений для получения электроэнергии на базе использования термоядерной энергии и перечисленных ранее возобновляемых источников энергии.

Прямое преобразование химической, тепловой, лучистой энергии в электрическую осуществляется с помощью электрохимических, термоэлектрических, термоэмиссионных, фотоэлектрических генераторов. Эти устройства имеют малую мощность и поэтому для большой энергетики непригодны, а применяются главным образом в радиотехнике, космической технике.

Для получения электроэнергии в больших количествах более перспективны магнитогидродинамические генераторы и устройства для прямого преобразования термоядерной энергии в электрическую.

Повсеместное использование электрической энергии при концентрации природных энергетических ресурсов в отдельных географических районах привело к необходимости передачи ее на большие расстояния, распределения между электроприемниками в большом диапазоне мощностей.

От электростанции до электроприемника электрическая энергия передается на десятки, сотни и даже тысячи километров, и при этом неоднократно изменяются напряжения и токи — величины, определяющие ее количественные и качественные показатели.

Поэтому в общей схеме электроснабжения (рис. В. 1) можно выделить несколько составляющих ее звеньев. Состав элементов, конструктивное выполнение электроустановок в этих звеньях различны, так как различны их мощности, величины напряжений, условия монтажа и эксплуатации электрооборудования.

В начале схемы электроснабжения находится источник электрической энергии, а в конце ее — электроприемник. Источник преобразует энергию какого-либо вида (механическую, тепловую, атомную и т. д.) в электрическую, которая в электроприемнике преобразуется в другие виды энергии — механическую (электро-

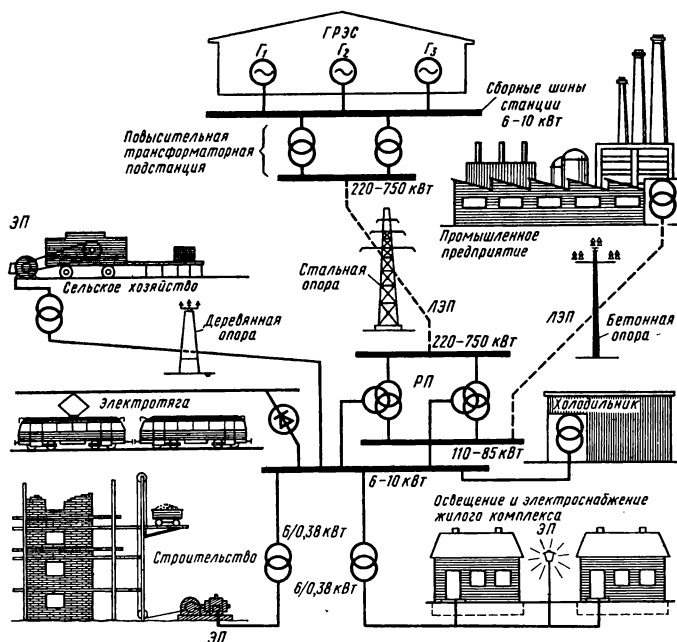


Рис. В.1



двигатели), тепловую (электропечи), световую (электролампы) и др.

Между источниками и приемниками электрической энергии находятся устройства, обеспечивающие ее передачу и распределение — линии электропередачи, трансформаторы и другие преобразователи, аппаратура управления, контроля, защиты.

На каждой электростанции обычно работают несколько электрогенераторов ( $G_1, G_2, G_3$  на рис. В. 1), которые непосредственно связаны с трансформаторами, установленными здесь же для повышения напряжения. От электростанции электрическая энергия по линиям электропередачи (ЛЭП) передается на районные подстанции (РП), а далее распределяется между потребителями (завод, цех, совхоз, поселок и т. д.). Каждый потребитель имеет пункты приема электрической энергии и распределения ее между группами или отдельными электроприемниками (ЭП).

Электрическая энергия относительно легко распределяется по приемникам любой мощности. В технике связи, автоматике и измерительной технике используют устройства малой мощности (единицы и доли ватта). Вместе с тем имеются электрические устройства (двигатели, нагревательные установки) мощностью в тысячи и десятки тысяч киловатт.

Для линий электропередачи и распределительных электрических сетей применяют металлические провода (из алюминия, стали, меди). Действием электрогенераторов в проводах и окружающем их диэлектрике устанавливается электромагнитное поле, несущее энергию. При наличии проводов оно достигает высокой концентрации, поэтому передача электроэнергии осуществляется с высоким коэффициентом полезного действия (к.п.д.) и в количествах, достаточных для приведения в действие электроприемников не только малой, но и большой мощности.

В радиотехнике используется передача электромагнитного поля без соединительных проводов, поэтому оно распространяется во все стороны и рассеивается в большом объеме. Приемные устройства улавливают только небольшую часть энергии, которой недостаточно для приведения в действие машин, нагревательных устройств, источников света и т. д. Однако для передачи информации такой способ пригоден, так как для воспроизведения сигналов достаточно принять ничтожно малую часть энергии передатчика.

**Электрификация народного хозяйства и ее значение.** Ценные свойства электрической энергии были замечены еще тогда, когда наука и техника делали первые шаги на пути ее использования.

Более 100 лет назад К. Маркс и Ф. Энгельс предсказали огромное влияние электрификации на развитие человеческого общества. Об этом говорил и писал В. И. Ленин. Он видел исключительное социальное значение электрификации. Указывая на необходи-

мость электрификации страны, В. И. Ленин не ограничивал ее роль периодом восстановления народного хозяйства и построения фундамента социализма, а видел в ней материально-техническую базу коммунистического общества.

«Если не перевести Россию на иную технику, более высокую, чем прежде, не может быть речи о восстановлении народного хозяйства и о коммунизме. Коммунизм есть Советская власть плюс электрификация всей страны, ибо без электрификации поднять промышленность невозможно»<sup>1</sup>.

В феврале 1920 г. приступила к работе созданная по инициативе В. И. Ленина Государственная Комиссия по электрификации России (ГОЭЛРО). При постоянном внимании и поддержке В. И. Ленина комиссия подготовила комплексный план восстановления и развития наиболее важных отраслей народного хозяйства на основе электрификации. В декабре того же года план был принят на VIII Всероссийском съезде Советов. По плану ГОЭЛРО было намечено построить за 10—15 лет 30 электростанций общей мощностью 1,5 млн. кВт с годовым производством 8,8 млрд. кВт·ч электроэнергии. План ГОЭЛРО был выполнен за 10 лет, а к 1935 г. мощность построенных электростанций превысила плановые наметки почти в 2,5 раза.

О дальнейшем развитии электроэнергетики можно судить по динамике производства электрической энергии (табл. В. 1).

Т а б л и ц а В. 1

	Год								
	1913	1931	1940	1960	1965	1970	1975	1980	1985
Производство электроэнергии, млрд. кВт·ч	2,03	10,7	48,3	292,3	596,7	740,9	1038	1295	1545

Годовая выработка электроэнергии стремительно росла в основном за счет ввода в действие новых и расширения старых тепловых и гидравлических электростанций. Сейчас на первый план выступает тенденция увеличения единичной мощности электростанций и их энергоагрегатов.

Решениями XXVII съезда КПСС намечено ускоренное строительство и ввод атомных электростанций, а также реконструкция и модернизация действующих тепловых и гидравлических электростанций путем замены малопроизводительного и устарев-

<sup>1</sup> Ленин В. И. Полн. собр. соч. Т. 42, С. 30.

шего оборудования более мощными и эффективными энергоагрегатами.

Большие успехи в электрификации народного хозяйства, намеченный дальнейший рост производства электроэнергии не освобождают от необходимости экономить электроэнергию. Напротив, экономное рациональное использование электроэнергии, максимальное сокращение потерь в процессе ее потребления, передачи, распределения остается важнейшей задачей.

Задача экономии поставлена не только в отношении электроэнергии, но распространяется и на все виды энергетических ресурсов. Она является частью общей большой работы по экономии и рациональному использованию всех видов ресурсов — материальных, трудовых, финансовых.

### *Контрольные вопросы*

1. В Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года указано на необходимость строгой экономии всех энергетических ресурсов, особенно невозобновляемых источников. Какие вы знаете источники энергии возобновляемые и невозобновляемые?

2. Как следует расположить типы электростанций в порядке убывания их отрицательного воздействия на окружающую среду?

3. В какие виды энергии преобразуют электрическую энергию электроприемники, имеющиеся у вас дома?

4. Как вы понимаете знаменитое выражение В. И. Ленина «Коммунизм есть Советская власть плюс электрификация всей страны»?

5. Какие меры применяются и какие можно применять у вас дома по экономии электроэнергии?

## ГЛАВА I

### ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Представление об электрическом поле сложилось в результате изучения электрических явлений — притяжения и отталкивания наэлектризованных тел, электростатической индукции и др.

Большие заслуги в этом принадлежат родоначальнику русской науки М. В. Ломоносову, который вместе с Г. В. Рихманом проводил количественные исследования атмосферного электричества.

#### § 1.1. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Электрическое поле обнаруживается в пространстве, окружающем заряженные частицы и тела, с которыми это поле связано.

Главным свойством электрического поля является силовое действие на электрически заряженную частицу, причем сила воздействия пропорциональна заряду частицы и не зависит от ее скорости.

Электрическое поле неподвижных заряженных тел при отсутствии в них электрических токов называется **электростатическим**.

**Закон Кулона.** В результате опытов французский физик Кулон в 1785 г. установил закон, выражающий силу взаимодействия двух наэлектризованных тел (рис. 1.1).

Далее формулировка и математическое выражение закона Кулона приведены для случая взаимодействия точечных заряженных тел, т. е. тел, линейные размеры которых бесконечно малы.

**Сила взаимодействия двух точечных заряженных тел прямо пропорциональна произведению зарядов этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:**

$$F_3 = \frac{Q_1 Q_2}{4 \pi \epsilon_0 r^2} \quad (1.1)$$

где  $F_3$  — электрическая сила, Н (ньютон);  $Q_1, Q_2$  — электрические заряды, Кл (кулон);  $r$  — расстояние между заряженными телами,

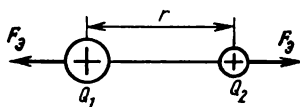


Рис. 1.1

м (метр);  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м (фарад/метр) — электрическая постоянная, величина, которая определяется выбором системы единиц.

Формула (1.1) записана для случая взаимодействия точечных тел в вакууме. Эта формула и последующие выражения, относящиеся к электрическому полю в вакууме, справедливы, если средой является воздух. Применение их для других сред рассмотрено в § 1.2.

Электрическое поле создается заряженными частицами и телами и вместе с тем действует на заряженные частицы и тела с некоторой силой. Учитывая это, отметим два важных обстоятельства: каждое из двух взаимодействующих тел (с зарядами  $Q_1$  и  $Q_2$ ) создает свое электрическое поле, а в окружающем их пространстве одно поле накладывается на другое и образуется общее электрическое поле (в данном случае действует принцип наложения полей); силовое взаимодействие двух заряженных тел следует рассматривать как результат действия на каждое из них общего электрического поля, созданного этими телами.

**Напряженность электрического поля.** Важные для практики свойства и характеристики электрического поля зависят от формы заряженного тела, величины, знака и распределения его заряда, от взаимного расположения заряженных тел (если поле создается группой тел), от свойств среды, окружающей заряженные тела, и других факторов. Поэтому электрические поля, созданные при различных условиях, отличаются одно от другого по форме, а также по количественным и качественным показателям.

Для того чтобы сопоставлять электрические поля, оценивать возможности их использования и вести соответствующие расчеты, установлены и применяются силовые и энергетические характеристики электрического поля.

Предположим, что источником электрического поля является тело с зарядом  $Q_1$ , а заряд  $Q_2$  настолько мал, что не изменяет характеристик этого поля. В этом случае заряд  $Q_2$  является пробным, с помощью которого можно обнаружить силу  $F$ , и исследовать электрическое поле в различных точках. Силовой характеристикой электрического поля является напряженность электрического поля.

*Напряженность электрического поля — векторная величина, численно равная отношению силы, действующей на положительно заряженную частицу, к ее заряду:*

$$E = F_3 / Q_2, \quad (1.2)$$

где  $E$  — напряженность электрического поля, В/м (вольт/метр).

Разделив обе части формулы (1.1) на  $Q_2$ , получим выражение напряженности электрического поля точечного заряженного тела

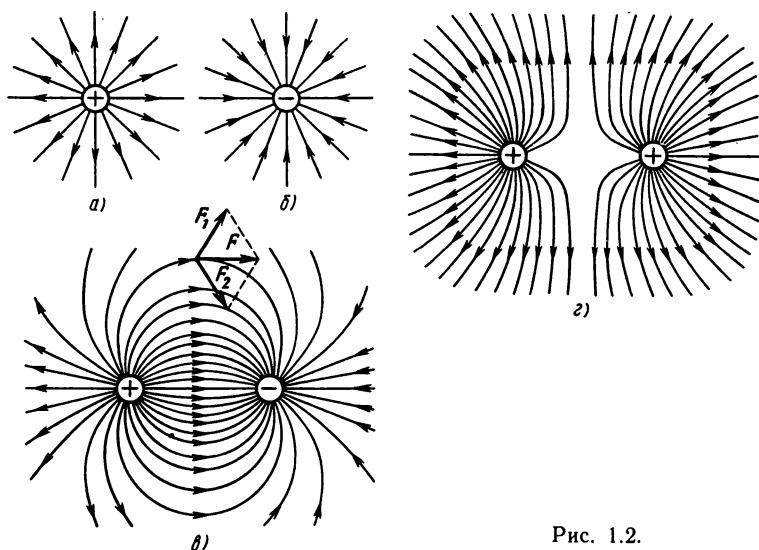


Рис. 1.2.

и в любой точке, отстоящей от него на расстоянии  $r$ :

$$E = Q / (4\pi\epsilon_0 r^2). \quad (1.3)$$

Для наглядного изображения электрического поля проводят линии напряженности (силовые линии). В каждой точке такой линии направление вектора напряженности электрического поля совпадает с касательной к этой линии (рис. 1.2,  $a - г$ )

Электрическое поле называют однородным (или равномерным), если во всех его точках напряженность поля одинакова по величине и направлению.

Равномерное поле имеется между двумя параллельными заряженными пластинами, линейные размеры которых значительно больше расстояния между ними (см. рис. 1.6,  $a$ ), а у краев пластин поле неравномерно.

### Электрическое напряжение.

Свободная частица с положительным зарядом  $Q$  в электрическом поле будет перемещаться в направлении действующей на нее электрической силы  $F_z$  (на рис. 1.3 поле взято равномерное для упрощения рассуждений).

При перемещении частицы на расстояние  $l$  между точками 1 и 2 совершается работа  $A_{1,2} = F_z l$ , кото-

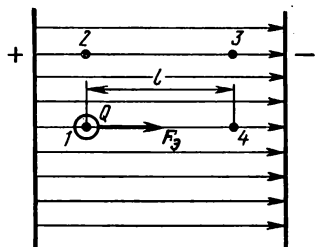


Рис. 1.3

рую можно выразить через напряженность электрического поля, учитывая формулу (1.2):

$$A_{1.2} = Eql.$$

Работа зависит не только от величин, относящихся к полю ( $E$ ,  $l$ ), но и от заряда частицы  $Q$ . Поэтому энергетической характеристикой электрического поля служит не сама величина работы, а отношение ее к величине заряда перемещенной частицы:

$$U = A_{1.2} / Q, \quad (1.4)$$

$U$  — электрическое напряжение, В (вольт);  $A_{1.2}$  — работа, Дж (джоуль).

Отношение работы сил электрического поля по перемещению заряженной частицы между двумя точками к величине заряда частицы называется электрическим напряжением между этими точками.

В равенство (1.4) подставим выражение работы, получим формулу, в которой энергетическая характеристика электрического поля ( $U$ ) связана с силовой характеристикой ( $E$ ):

$$U = El. \quad (1.5)$$

Для расчета применяется также энергетическая характеристика электрического поля в каждой точке — электрический потенциал ( $V$ ). Предположим, что пробная частица, обладающая зарядом  $Q$ , расположена в точке 1 (рис. 1.3). Частица обладает потенциальной энергией  $A_1$  (подобно тому, как некоторое тело массой  $m$  имеет потенциальную энергию в поле земного тяготения).

Отношение потенциальной энергии заряженной частицы, находящейся в некоторой точке электрического поля, к величине ее заряда выражает потенциал поля в этой точке:  $V_1 = A_1 / Q$ ;  $V_2 = A_2 / Q$ .

Потенциальная энергия заряженной частицы в электрическом поле уменьшается при переходе от точки к точке по направлению линий напряженности. Она становится равной нулю за пределами электрического поля, где сила  $F_s = 0$ .

При перемещении заряженной частицы из точки 1 в точку 2 под действием силы  $F_s$  совершается работа  $A_{1.2}$ . На эту величину потенциальная энергия частицы в точке 2 меньше, чем в точке 1:  $A_{1.2} = A_1 - A_2$ . Разделив это выражение на величину заряда, получим  $U_{1.2} = A_{1.2} / Q = A_1 / Q - A_2 / Q$  или

$$U_{1.2} = V_1 - V_2. \quad (1.6)$$

Обычно потенциальную энергию и потенциал определяют относительно какого-либо уровня, принятого за начальный.

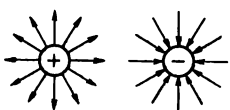
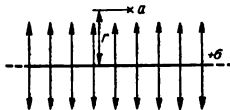
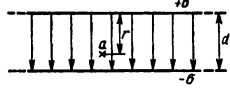
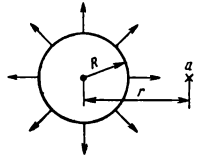
При решении практических задач, относящихся к электрическим установкам, начальным обычно полагают потенциал земли, который принимают равным нулю.

**Определение характеристик электрического поля.** Определение напряженности электрического поля, потенциалов, напряжений является одной из задач расчета электрических полей.

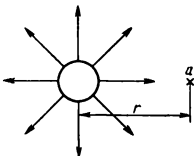
Напряженность электрического поля уединенного точечного заряженного тела в любой точке определяют по формуле (1.3), используя которую можно получить выражение для определения величины потенциала.

В практике чаще встречаются случаи, когда заряд тела распределен по его поверхности с некоторой плотностью. Расчет электрических полей в этих случаях осуществляется по формулам, которые получены на основе теоремы Гаусса, и приведены в табл. 1.1 без доказательств.

Т а б л и ц а 1.1

Заряженное тело, образующее электрическое поле	Напряженность электрического поля	Потенциал	Величины, входящие в формулы
<p>Уединенное точечное тело</p> 	$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$	$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$	<p><math>Q</math> — заряд (Кл);  <math>\sigma = Q/S</math> / поверхностная плотность (Кл/м<sup>2</sup>); <math>\tau</math> — линейная плотность заряда (Кл/м);  <math>r</math> — расстояние от положительной пластины, от центра сферы, от оси провода до данной точки (м);  <math>r_x</math> — расстояние от центра сферы, от оси провода до точки, потенциал которой равен нулю (<math>V_x=0</math>);  <math>R</math> — радиус сферы (м); <math>d</math> — расстояние между пластинами (м)  <math>l</math> — длина провода (м)</p>
<p>Плоскость бесконечной протяженности</p> 	$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$	$V = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} (r_x - r)$	
<p>Две параллельные плоскости</p> 	$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$	$V = \frac{\sigma}{\epsilon_0} (d - r)$	
<p>Сфера</p> 	$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{\sigma R^2}{\epsilon_0 r^2}$	$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{\sigma R^2}{\epsilon_0 r}$	



Заряженное тело, образующее электрическое поле	Напряженность электрического поля	Потенциал	Величины, входящие в формулы
<p>Прямой провод бесконечной длины</p> 	$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 l r} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 r}$	$V = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_x}{r}$	

### Контрольные вопросы и задачи

1. В однородном электрическом поле движется электрон. Изменится ли сила, действующая на него, если изменится его скорость?

2. Почему силовой характеристикой электрического поля является напряженность  $E$ , а не сама сила, действующая на пробное заряженное тело в этом поле?

3. Две плоскости бесконечной протяженности несут разноименные заряды одинаковой плотности  $\sigma$  (см. табл. 1.1). Какую величину имеет напряженность электрического поля: в пространстве между пластинами? в пространстве за пределами пластин?

4. Заряд  $Q$  равномерно распределен на поверхности сферы. Можно ли в расчетах заряженную сферу рассматривать как точечное заряженное тело, заряд которого сосредоточен в центре сферы?

5. В электрическом поле (см. рис. 1.3) намечен прямоугольный контур  $1-2-3-4-1$ . Как изменяется потенциал при обходе этого контура?

**Задача 1.1.** В противоположных вершинах воображаемого прямоугольника со сторонами 6 и 8 см в вакууме расположены заряженные точечные тела:  $Q_1 = 3,2 \cdot 10^{-11}$  Кл,  $Q_2 = -4,267 \cdot 10^{-11}$  Кл. Определить напряженность электрического поля в двух других вершинах прямоугольника и в точке пересечения его диагоналей.

**Задача 1.2.** Между параллельными пластинами (рис. 1.6, а), размеры которых значительно больше расстояния между ними, напряжение  $U = 100$  В. Определить потенциалы пластин, полагая равным нулю потенциал точки, отстоящей от положительной пластины на расстояние  $r = d, 3d/4, d/2, d/4$ , где  $d$  — расстояние между пластинами.

## § 1.2. ПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Формулы, приведенные в § 1.1, показывают, что напряженность и потенциал электрического поля в вакууме зависят от вели-

чины и характера распределения электрического заряда, формы тела, несущего заряд.

Характеристики электрического поля в пространстве, заполненном веществом, зависят от свойств вещества, так как электрическое поле воздействует на вещество, а оно, в свою очередь, определенным образом изменяет электрическое поле.

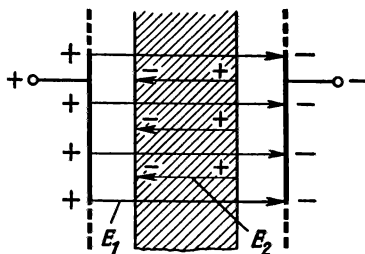


Рис. 1.4

**Проводники в электрическом поле.** Под действием внешнего электрического поля с напряженностью  $E_1$  в металлическом теле (рис. 1.4) свободные электроны перемещаются к одной поверхности, которая получает отрицательный заряд, противоположная поверхность заряжается положительно (явление электростатической индукции).

В результате разделения зарядов в проводнике создается внутреннее электрическое поле с напряженностью  $E_2$ , направленное противоположно внешнему. Движение свободных электронов в проводнике в данном случае кратковременно, пока напряженности внешнего и внутреннего полей не уравниваются.

При равенстве  $E_1 = E_2$  результирующая напряженность электрического поля равна нулю. Напряжение между двумя любыми точками проводника также равно нулю, т. е. его потенциал во всех точках один и тот же.

Следовательно, при наличии в проводнике свободных носителей заряда электростатическое поле в нем существовать не может.

Если в электрическое поле поместить проводник с полостью внутри, то в этом случае заряженные частицы будут только на его поверхности, а внутри металла и полости электрическое поле отсутствует.

**Электрическое поле в однородном диэлектрике.** По сравнению с проводниками количество свободных заряженных частиц в единице объема диэлектрика очень мало. Поэтому при наличии внешнего электрического поля направленным движением свободных заряженных частиц можно пренебречь и считать, что в диэлектрике преобладают явления электростатические.

Различают диэлектрики с полярными и неполярными молекулами. Полярные молекулы в электрическом отношении можно рассматривать как электрический диполь (рис. 1.5, а, б).

Электрический диполь — это совокупность двух частиц с электрическими зарядами, равными по величине

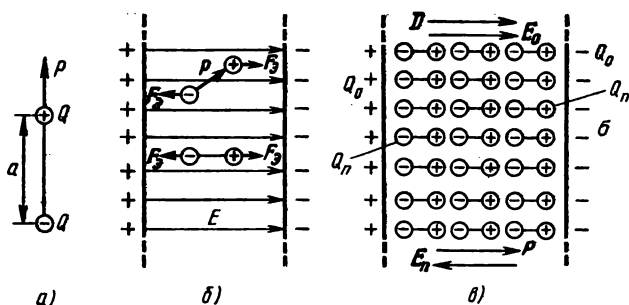


Рис. 1.5

и противоположными по знаку, расстояние между которыми очень мало по сравнению с расстоянием от них до точек наблюдения.

Во внешнем электрическом поле полярная молекула (диполь) испытывает действие пары сил, которая поворачивает ее так, что электрический момент оказывается направленным так же, как и напряженность поля (на рис. 1.5, б, в показан диэлектрик в равномерном электрическом поле между двумя заряженными металлическими пластинами).

В неполярных молекулах диэлектрика под действием внешнего электрического поля заряженные частицы смещаются вдоль направления вектора напряженности  $E$ , в результате чего молекулы приобретают свойство диполей.

Это явление ограниченного смещения заряженных частиц в молекуле или изменения ориентации дипольных молекул в диэлектрике под действием электрического напряжения называется **поляризацией диэлектрика**.

В результате поляризации диэлектрика поляризованные молекулы располагаются вдоль линий напряженности внешнего электрического поля (напряженность  $E_0$ ). При этом внутри диэлектрика в любом объеме, не меньшем объема молекулы, сохраняется равенство обоих зарядов того и другого знака, так что диэлектрик остается нейтральным. Однако по поверхностям диэлектрика, прилегающим к металлическим пластинам, распределены частицы, обладающие зарядом одного знака: отрицательным на границе с положительной пластиной и положительным на границе с отрицательной пластиной (рис. 1.5, в). На обеих поверхностях заряд распределен равномерно с одинаковой плотностью  $\sigma$ . Таким образом, на границе между металлической пластиной и диэлектриком распределены два вида заряженных частиц: свободные частицы металлической пластины с общим зарядом  $Q_0$ , которые создают внешнее электрическое поле (напряженность  $E_0$ ), и связанные частицы ди-

электрика с общим зарядом  $Q_n$  противоположного знака, создающие внутреннее поле (напряженность  $E_n$ ).

Электрическое поле в диэлектрике соответствует общему заряду частиц  $Q = Q_0 - Q_n$ , и его можно представить как результат наложения двух полей — внешнего и внутреннего.

Векторы напряженности этих полей  $E_0$  и  $E_n$  направлены противоположно, поэтому напряженность результирующего поля  $E = E_0 - E_n$ .

При определении характеристик электрического поля в диэлектрике это можно учесть, введя в выражения, определяющие электрическую силу, напряженность поля или потенциал [см. формулы (1.1), (1.3) и др.], вместо электрической постоянной  $\epsilon_0$  величину  $\epsilon_a > \epsilon_0$ , считая общий заряд равным заряду свободных частиц ( $Q = Q_0$ ).

Величина  $\epsilon_a$ , характеризующая свойства диэлектрика, получила название абсолютной диэлектрической проницаемости.

Замена в формулах электрической постоянной диэлектрической проницаемостью позволяет расчет электрического поля в диэлектрике вести так же, как в вакууме, т. е. не учитывая явления поляризации диэлектрика.

Величину диэлектрической проницаемости для различных диэлектриков можно найти в соответствующих справочниках. Обычно в справочных таблицах (см., например, табл. П. 1) указана относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$  — отношение абсолютной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_a$  к электрической постоянной  $\epsilon_0$ :  $\epsilon_r = \epsilon_a / \epsilon_0$ .

**Основные электрические свойства диэлектриков.** Любое, даже самое простое электрическое устройство нельзя построить без диэлектрических материалов. Большинство их применяют для электрической изоляции, т. е. для отделения друг от друга и от земли электропроводных частей, имеющих между собой разность электрических потенциалов.

Электрическая изоляция полностью или частично окружает токоведущие части и закрывает все те потенциально возможные пути электрическому току, которые не предусмотрены специально электрической схемой устройства, установки.

Между электропроводными участками, с разными электрическими потенциалами, имеется электрическое поле, следовательно, диэлектрические материалы находятся под действием этого поля или, как говорят, «несут электрическую нагрузку».

Напряженность электрического поля в диэлектрике зависит от напряжения между проводниками (электродами), расстояния между ними, формы и размеров электродов, величины диэлектрической проницаемости.

Электрическую нагрузку изоляции оценивают величиной напряженности электрического поля в ней. Чем больше напряженность поля, тем больше силы, действующие на заряженные частицы молекул (рис. 1.5, б). Этим силам противодействуют внутримолекулярные силы сцепления частиц, от величины которых зависят электроизоляционные свойства диэлектриков. Если напряженность электрического поля превысит некоторую критическую величину, то диэлектрик теряет электроизоляционные свойства. Это явление называют пробоем диэлектрика, а величину напряжения, при котором оно происходит, — пробивным напряжением.

Величина напряженности электрического поля, соответствующая пробивному напряжению, называется электрической прочностью диэлектрика.

Электрическую прочность ( $E_{пр}$ ) определяют отношением пробивного напряжения ( $U_{пр}$ ) к толщине диэлектрика ( $d$ ), т. е.  $E_{пр} = U_{пр}/d$ .

Для обеспечения надежной работы электрических устройств и установок их электроизоляция должна иметь определенный запас прочности ( $K$ ), который выражается отношением электрической прочности  $E_{пр}$  к действительной величине напряженности электрического поля  $E$ , т. е.  $K = E_{пр}/E$ .

Пробой электрической изоляции обусловлен многими факторами и в зависимости от того, какие из них преобладают, различают электрический, электротепловой, электрохимический пробои.

Явление электрического пробоя связано с электронными процессами в диэлектрике, которые возникают под действием сильного электрического поля и приводят к значительному местному увеличению электропроводности к моменту пробоя.

В идеальном диэлектрике, электропроводность которого равна нулю, пробой может произойти при большой величине напряженности электрического поля в результате разрыва внутримолекулярных связей заряженных частиц под действием электрических сил.

Опыты показывают, что в реальных диэлектриках пробой наступает при значении напряженности поля, меньшем той, при которой разрываются внутримолекулярные связи. Из табл. П. 1 приложения 2 видно, что электропроводность диэлектриков очень мала, но не равна нулю, что свидетельствует о наличии в них некоторого (хотя и малого) количества свободных заряженных частиц.

Под действием электрического поля эти частицы (преимущественно электроны) приобретают скорость и сталкиваются с нейтральными атомами и молекулами диэлектрика. При увеличении напряженности поля скорость электронов достигает величины, до-

статочной для отделения от нейтральных частиц других электронов.

В результате количество свободных электронов лавинообразно увеличивается (процесс называется ударной ионизацией) и диэлектрик в некоторой области становится электропроводным. Такая примерная схема пробоя характерна для газов.

В жидких и твердых диэлектриках основную роль играют электротепловые процессы. С увеличением напряженности электрического поля увеличивается движение свободных электронов внутри диэлектрика (объемный электрический ток), по его поверхности (поверхностный ток) и увеличивается выделение теплоты.

При переменном напряжении (в установках переменного тока) электрическая изоляция находится в переменном электрическом поле, что является причиной непрерывного периодического изменения поляризованности (периодически изменяется смещение заряженных частиц и ориентация молекул-диполей).

Поэтому в диэлектрике электрическая энергия преобразуется в теплоту. При определенной величине напряженности электрического поля происходит местный перегрев электроизоляционного материала, в результате чего он растрескивается, обугливается и становится в этом месте электропроводным. Такой пробой называют электротепловым и наблюдается он наиболее часто.

Пробой может быть следствием электрохимических процессов в диэлектрике, связанных также с действием электрического поля. Электрическая прочность диэлектриков существенно зависит от наличия в них инородных примесей (например, капли воды в масле, газовые включения в твердых диэлектриках), от многих других факторов, в числе которых форма, частота изменения и продолжительность действия напряжения; форма электродов; толщина, температура, влажность диэлектрика и др.

Энергию, преобразуемую в единицу времени в диэлектрике в теплоту при воздействии на него электрического поля, называют диэлектрическими потерями.

Эти потери нежелательны, как и любые другие потери энергии, но они, кроме того, значительно ухудшают условия работы электроизоляции.

Однако нагревание некоторых веществ за счет диэлектрических потерь используется для их сушки или развития химических реакций, протекающих при повышенных температурах.

**Диэлектрические материалы.** Общую оценку диэлектрического материала можно дать по его основным электрическим свойствам, учитывая, что хороший материал имеет высокую электрическую прочность, низкую электропроводность, малые диэлектрические потери. В некоторых случаях имеет особое значение величина ди-

электрической проницаемости или зависимость ее от напряженности внешнего электрического поля.

Однако при выборе диэлектрических материалов для конкретных условий необходимо учитывать и другие физические и химические свойства: механическую прочность, твердость, эластичность, вязкость, гигроскопичность и влагопроницаемость, теплостойкость и холодостойкость, радиационную стойкость и др.

Важное значение имеют технологические и экономические качества, которыми определяются способы изготовления изоляционных деталей и конструкций, возможность применения тех или других видов обработки, нанесения изоляционных покрытий, а также стоимость и дефицитность материалов.

Электроизоляционные, механические и другие свойства диэлектриков зависят от их химической природы и в этой связи их делят на органические и неорганические.

Многие органические материалы нашли широкое применение в электротехнике, так как вместе с удовлетворительными электроизоляционными свойствами имеют хорошие механические и технологические качества, в том числе гибкость, эластичность, возможность изготовления и применения в виде волокон, лент, пленок и изделий других разнообразных форм. Однако их применение ограничено из-за относительно низкой теплостойкости.

При высоких рабочих температурах для электроизоляции применяют материалы неорганического происхождения, которые в большинстве не обладают гибкостью и эластичностью, а для обработки требуют более сложной технологии.

В электрической практике применяют также электроизоляционные материалы, по свойствам промежуточные между органическими и неорганическими, которые созданы искусственно на органической основе с включением в молекулы атомов элементов, обычно не входящих в органические вещества.

По агрегатному состоянию электроизоляционные материалы подразделяют на газообразные, жидкие и твердые. Особую группу составляют твердеющие материалы, которые в исходном состоянии и при изготовлении изоляции — жидкости, а затем отвердевают и в эксплуатации являются твердыми телами.

*Газообразные диэлектрики.* Из газообразных диэлектриков наибольшее значение имеет воздух, который ввиду повсеместного распространения является частью системы электрической изоляции подавляющего большинства электро- и радиотехнических устройств.

Диэлектрическая проницаемость воздуха мало отличается от этого показателя для вакуума ( $\epsilon_r = 1$ ), электропроводность и диэлектрические потери при нормальных условиях по величине незначительны.

По сравнению с большинством жидких и твердых диэлектриков электрическая прочность воздуха в несколько раз ниже (см. табл. П. 1 приложения 2).

Кроме воздуха в качестве электроизоляции применяют инертные газы (неон, аргон, криптон), водород, азот, углекислый газ и др.

*Жидкие диэлектрики.* В качестве электроизоляционных материалов в жидком виде применяют нефтяные электроизоляционные масла, некоторые синтетические жидкости.

Применение жидких диэлектриков в конструкционном отношении во многих случаях более сложно, чем твердых. Однако, выполняя роль электрической изоляции, жидкие диэлектрики позволяют одновременно решать и другие задачи, которые с помощью твердых материалов решить труднее или совсем нельзя.

В маслонаполненном трансформаторе (см. рис. 7.7) масло выполняет не только роль электрической изоляции, но является хорошей теплоотводящей средой; в высоковольтном масляном выключателе масло играет активную роль в гашении электрической дуги.

Масло хорошо пропитывает твердые волокнистые материалы (бумагу, пряжу, ткани и т. д.), заполняет пространство между конструктивными элементами, чем значительно улучшает электрическую изоляцию того или другого устройства.

Из синтетических жидких диэлектриков наиболее широко применяются хлорированные углеводороды (в частности, совол, совтол, гексол), кремнийорганические жидкости.

Электроизоляционные свойства жидких диэлектриков значительно понижаются при увлажнении и загрязнении.

*Твердые диэлектрики.* Многие твердые диэлектрики, выполняя роль электроизоляции, одновременно несут механическую нагрузку.

Волокнистые электроизоляционные материалы изготовляют из волокон различных веществ — органических (растительных, синтетических) и неорганических (стекло, асбест).

Для электроизоляции монтажных и обмоточных проводов, кабелей, электрических машин и аппаратов применяют пряжу, ткани, бумагу, картон с последующей пропиткой специальными пропиточными составами.

Волокнистые материалы являются основой при производстве других видов электроизоляционных материалов (лакотканей, слоистых пластиков, гибких трубок и т. д.).

Пропиточные, заливочные, покровные материалы содержат в основе естественные и синтетические высокомолекулярные вещества, в числе которых смолы, битумы,



воски. Они применяются для пропитки волокнистых материалов, заливки (герметизации) отдельных элементов электроустановок, изготовления слоистых пластиков. Особенность покровных материалов (основа — растительные масла, некоторые вещества из нефти) состоит в том, что после нанесения их на изолируемую поверхность образуется тонкая гибкая твердая пленка с хорошими электроизоляционными свойствами.

Слоистые пластики изготовляют прессованием с различными связующими бумаги (гетинакс, асбогетинакс), тканей (текстолиты), древесного шпона (древеснослоистый пластик). Слоистые пластики выпускают в виде листов, цилиндров, трубок, обладающих значительной механической прочностью. Их применяют в качестве электроизоляционных и конструкционных материалов для изготовления панелей, оснований печатных схем, каркасов, различных прокладок и других деталей.

Пластмассы изготовляют на основе связующих (в основном синтетических полимеров) с всевозможными наполнителями (органическими и неорганическими) и без наполнителей.

Из пластмасс методами прессования или литья изготовляют различные фасонные детали и узлы, требующие сочетания хороших электрических, механических и физических свойств. В большом количестве пластмассы идут на изготовление низковольтной установочной аппаратуры (штепсельные разъемы, патроны для электроламп и т. д.) и приборов.

Электроизоляционные пленки изготовляют из некоторых синтетических полимеров и эфиров целлюлозы. Применяют в качестве основного диэлектрика при изготовлении конденсаторов, изоляции обмоток электрических машин и аппаратов, проводов и кабелей. В ряде случаев их применяют в сочетании с волокнистой основой.

Резина — материал, получаемый из натурального или синтетического каучука методом вулканизации. Резины обладают высокой эластичностью и гибкостью, применяются в качестве электроизоляции проводов и кабелей, для изготовления гибких трубок, уплотняющих прокладок.

Слюда и слюдяные электроизоляционные материалы в чистом виде применяются в качестве основного диэлектрика конденсаторов, межэлектродной изоляции в электронных лампах. В сочетании с различными волокнистыми и склеивающими веществами слюда применяется для изготовления материалов с высокими электроизоляционными качествами. Слюдяные материалы вместе с тем имеют повышенную теплостойкость. Их применяют для изготовления изоляции электрических машин и аппаратов в тех случаях, когда необходима повышенная надежность.

Керамические материалы используют для изго-

товления электроизоляционных деталей и конструкций (электроизоляторы, каркасы катушек, штепсельные разъемы, ламповые панели и т. д.), которые изготавливают путем формовки и последующего обжига.

Стекло применяют для изготовления колб ламп электрического освещения, электровакуумных приборов, для изготовления стеклянных волокнистых материалов (волокна, пряжи, ткани, бумаги).

Сегнетоэлектрики и электреты составляют отдельную группу твердых диэлектриков, имеющих особенности в процессе поляризации.

Для сегнетоэлектриков (название от сегнетовой соли) характерен доменный тип поляризации, отличающийся тем, что в диэлектрике до наложения внешнего электрического поля имеются не отдельные полярные молекулы, а целые самопроизвольно поляризованные области (домены). Под действием внешнего электрического поля домены однообразно ориентируются так, что в диэлектрике создается большой поляризованный заряд и большой электрический момент. Следовательно, такие материалы имеют очень большую диэлектрическую проницаемость. Кроме того, зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля нелинейная, а после снятия внешнего электрического поля в сегнетоэлектриках поляризационный заряд не уменьшается до нуля, т. е. наблюдается остаточная поляризованность.

Диэлектрики, длительно сохраняющие значительную остаточную поляризованность, называют электретами.

#### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Явление электростатической индукции используют в практике для защиты каких-либо устройств от действия внешнего по отношению к ним электрического поля. В чем состоит метод защиты, называемый электростатическим экранированием?

2. Как изменится напряженность электрического поля между заряженными пластинами, если воздушное пространство между ними заполнить парафином?

3. Почему при одинаковом рабочем напряжении расстояние между токоведущими жилами электрического кабеля значительно меньше, чем между проводами воздушной линии?

4. Изоляция между заряженными пластинами состоит из двух слоев диэлектриков, причем  $\epsilon_{r1} > \epsilon_{r2}$ . В каком слое напряженность электрического поля больше?

5. Нагревание некоторых веществ за счет диэлектрических потерь используют для их сушки. Почему в этих случаях применяют чаще всего установки, работающие при повышенной частоте напряжения?

**Задача 1.3.** Между плоскопараллельными пластинами изоляция из слюды толщиной  $d = 0,5$  см имеет четырехкратный запас электрической прочности. Определить рабочее напряжение между пластинами. Найти толщину

ну изоляции из картона, которая обеспечивает четырехкратный запас прочности при том же рабочем напряжении.

**Задача 1.4.** Между металлическими пластинами (электродами) напряжение  $U = 15$  кВ. Определить запас электрической прочности изоляции между пластинами, если она изготовлена: а) один слой картона толщиной  $d = 0,5$  см; б) один слой воздуха  $d = 1,5$  см; в) два слоя — картон толщиной  $d_1 = 0,5$  см, воздух  $d_2 = 1,5$  см.

**Указание.** Напряженность электрического поля в двухслойной изоляции определяется по формулам:

$$E_1 = \frac{U \varepsilon_{r2}}{d_1 \varepsilon_{r2} + d_2 \varepsilon_{r1}}; \quad E_2 = \frac{U \varepsilon_{r1}}{d_1 \varepsilon_{r2} + d_2 \varepsilon_{r1}}.$$

### § 1.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ. КОНДЕНСАТОРЫ

Проводники, обладающие электрическим зарядом, являются источниками электрического поля. При изменении заряда проводника совершается работа, поэтому и энергетическая характеристика проводника — потенциал — соответственно изменяется.

Способность проводника накапливать электрический заряд зависит от формы и размеров его поверхности, расстояния между проводниками (если поле создается группой проводников), от свойств среды, в которую проводники помещены.

Для выражения этой зависимости введено понятие электрической емкости.

**Электрическая емкость проводника и между проводниками.** Электрическая емкость проводника — величина, характеризующая способность проводника накапливать электрический заряд, численно равная отношению заряда проводника к его потенциалу:

$$C = Q/V, \quad (1.7)$$

где  $C$  — электрическая емкость, Ф (фарад).

В системе заряженных проводников на заряд и потенциал каждого из них влияют форма, расположение и величины зарядов других проводников. В этом случае применяют понятие емкости между проводниками. Наибольшее значение для практики имеют системы из двух проводников, имеющих равные по величине, но противоположные по знаку заряды. Примерами таких систем являются два провода воздушной линии электросети (см. рис. 12.5), две жилы электрического кабеля, жила кабеля и его броня (см. рис. 2.3), токоведущий стержень и кожух проходного изолятора, два электрода электронной лампы и т. д.

*Электрическая емкость между двумя проводниками — величина, равная отношению электрического заряда ( $Q$ ) одного*

проводника к разности потенциалов ( $U$ ) между этими проводниками:

$$C = Q / (V_1 - V_2) = Q / U. \quad (1.8)$$

**Электрические конденсаторы.** Электрическая емкость между проводниками в перечисленных ранее случаях специально не создается; она определяется конструкцией электрических устройств и ее приходится учитывать при расчетах, монтаже и эксплуатации электрических и особенно радиотехнических устройств.

Однако в электротехнике, радиотехнике, электронике широко применяют устройства с электрической емкостью, специально построенные и предназначенные для создания электрического поля и хранения его энергии.

Элемент электрической цепи, предназначенный для использования его электрической емкости, называется электрическим конденсатором.

Электрические конденсаторы входят в схемы колебательных контуров, усилителей напряжения и мощности, электрических фильтров и других элементов и узлов радиотехнической и электронной аппаратуры. В электрических сетях переменного тока конденсаторы применяют для компенсации реактивной мощности (см. § 12.4).

Электрический конденсатор имеет два проводника (их иногда называют обкладками), которые разделены диэлектриком, по форме проводников различают конденсаторы плоские (рис. 1.6, а), цилиндрические (рис. 1.6, б).

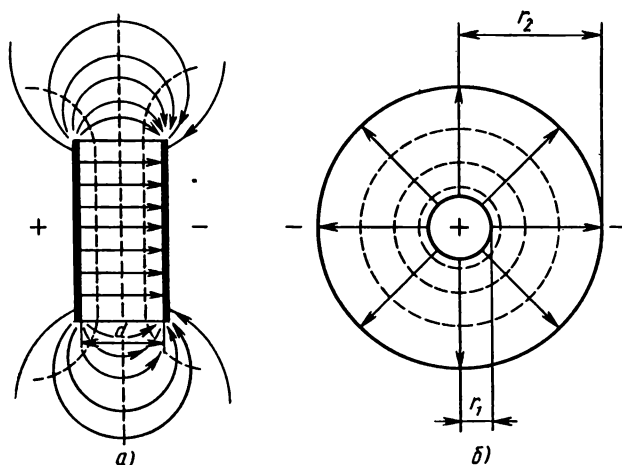


Рис. 1.6

Для определения емкости плоского конденсатора воспользуемся формулой (1.5) и формулой  $E = \sigma/\epsilon_0$  (см. табл. 1.1), заменив в ней электрическую постоянную  $\epsilon_0$  диэлектрической проницаемостью диэлектрика  $\epsilon_a$ :

$$E = \sigma/\epsilon_a; \quad U/d = \sigma/\epsilon_a,$$

где  $d$  — расстояние между обкладками конденсатора. Умножим обе части равенства на  $S$  ( $S$  — площадь одной обкладки), получим выражение емкости плоского конденсатора

$$C = Q/U = \epsilon_a S/d. \quad (1.9)$$

Емкость цилиндрического конденсатора выражает формула (1.10), а двухпроводной воздушной линии (рис. 1.7) — формула (1.11):

$$C = \frac{2\pi\epsilon_a l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (1.10)$$

где  $l$  — длина цилиндрического конденсатора или участка линии;

$$C = \frac{\pi\epsilon_a l}{\ln \frac{a}{r_0}}, \quad (1.11)$$

здесь  $r_1$ ;  $r_2$  — радиусы обкладок внутренней и внешней;  $a$  — расстояние между осями проводов линии;  $r_0$  — радиус провода.

Диэлектрики, применяемые для изготовления конденсаторов, в большинстве случаев имеют постоянную величину диэлектрической проницаемости, независимую от напряженности

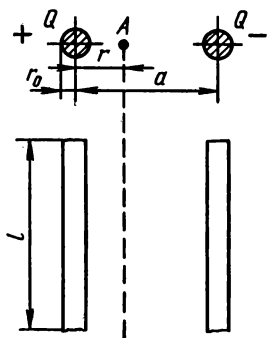


Рис. 1.7

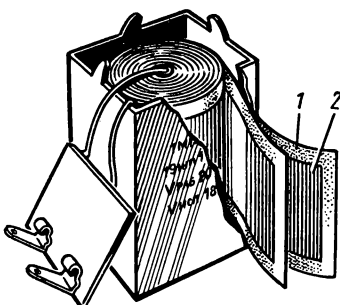


Рис. 1.8

электрического поля. Поэтому конденсаторы имеют постоянную величину емкости.

У сегнетоэлектриков  $\epsilon_a$  зависит от напряженности электрического поля, поэтому конденсаторы с сегнетоэлектриками (вариконды) имеют нелинейную вольт-кулонову характеристику  $Q=f(U)$ . Их применяют в автоматике и радиотехнике в схемах ди-электрических усилителей постоянного и переменного токов, умно-жителей и делителей частоты, стабилизаторов напряжения и т. д.

В зависимости от назначения, рабочих характеристик (вели-чин емкости, напряжения, частоты) промышленность выпускает конденсаторы, отличающиеся по конструкции и материалам: бу-мажные, электролитические и др.

В бумажном конденсаторе проводники — две длинные ленты алюминиевой фольги изолированы лентами парафинированной бумаги (рис. 1.8).

Одной из обкладок электролитического конденсатора также служит алюминиевая фольга 2, другая обкладка из бумаги или ткани 1, пропитанной электролитом. Изоляцией является тонкий слой окиси на поверхности обкладки из алюминиевой фольги. Элек-тролитические конденсаторы работают при неизменной полярно-сти обкладок (в цепях постоянного тока).

**Соединение конденсаторов.** В практике иногда необходимо соединять конденсаторы в батареи, для чего применяют схемы по-следовательного, параллельного и смешанного соединений.

Каждый конденсатор имеет два наружных зажима (начало «Н», конец «К») для присоединения его к другим элементам.

В схеме (рис. 1.9) начало следующего конденсатора соединено с концом предыдущего (последовательное соединение). Источник присоединен к обкладкам крайних конденсаторов, а внутренние конденсаторы с источником непосредственно не соединены и заря-жаются путем электростатической индукции. Поэтому заряд всей

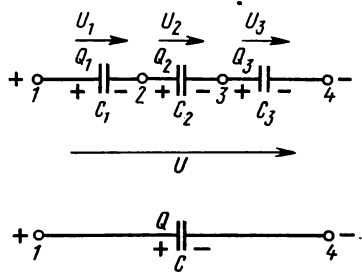


Рис. 1.9

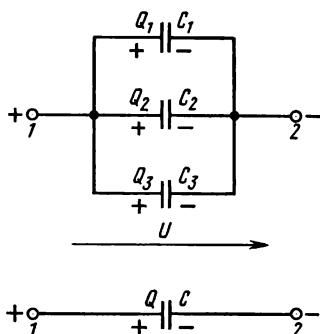


Рис. 1.10

группы конденсаторов и каждого конденсатора один и тот же:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3.$$

Для упрощения схемы и расчетов группу конденсаторов можно заменить одним конденсатором эквивалентной емкости  $C$ . Общее напряжение  $U$  в данном случае распределяется между конденсаторами обратно пропорционально их емкости [см. формулу (1.8)] и равно сумме напряжений на этих конденсаторах:  $U = U_1 + U_2 + U_3$ .

Подставим в это равенство выражения напряжений по формуле (1.8) и после сокращения на  $Q$  получим выражение для определения эквивалентной емкости

$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3. \quad (1.12)$$

В схеме (рис. 1.10) конденсаторы группы присоединены одной обкладкой в общей точке 1, а другой — в общей точке 2. К этим точкам подводится напряжение источника. При таком (параллельном) соединении группу конденсаторов тоже можно заменить одним с эквивалентной емкостью  $C$ .

В данной схеме все конденсаторы группы имеют между обкладками одно и то же напряжение  $U$ , а заряды получают разные, пропорционально их емкости [см. формулу (1.8)].

Каждый конденсатор получает заряд независимо от других, поэтому общий заряд равен сумме зарядов отдельных конденсаторов:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3.$$

Подставив сюда выражения зарядов по формуле (1.8) и сократив на  $U$ , получим формулу для определения эквивалентной емкости

$$C = C_1 + C_2 + C_3. \quad (1.13.)$$

В схемах (рис. 1.11, а, 1.12) имеются участки с последовательным и параллельным соединением конденсаторов (*смешанное* соединение). Подобную группу конденсаторов можно заменить эквивалентным конденсатором с емкостью  $C$  (рис. 1.11, б, в).

**Энергия электрического поля.** Электрическое поле обладает энергией, которая накапливается при образовании заряда в электрическом устройстве. Наглядным примером такого устройства является электрический конденсатор, который рассмотрим в схеме его зарядки от источника электрической энергии с постоянным напряжением  $U$  через резистор с сопротивлением  $R$  (рис. 1.13, а). Заряд конденсатора образуется переносом заряженных частиц с одной обкладки на другую под действием внешнего источника энергии. При этом одна часть энергии источника расходуется на об-

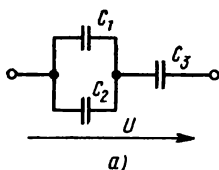


Рис. 1.11

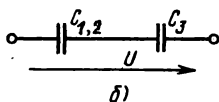
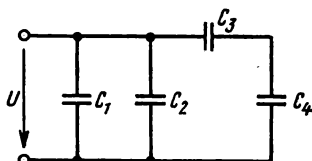
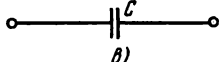


Рис. 1.12



разование заряда и запасается в виде энергии электрического поля в конденсаторе, а другая преобразуется в теплоту в резисторе и соединительных проводах.

Работа, совершенная при переносе единицы заряда, численно равна напряжению между обкладками  $U_s$ . Если бы это напряжение в процессе зарядки не изменялось, то энергию можно было бы определить произведением напряжения и заряда [см. формулу (1.4)]. Однако в процессе накопления заряда растет и напряжение, поэтому при определении энергии, затраченной на образование заряда, нужно учесть зависимость между напряжением и зарядом, которая при постоянной величине емкости конденсатора  $C$  графически выражается прямой линией (рис. 1.13, б).

Предположим, что заряд  $Q_1$  увеличился на  $dQ$  — величину столь малую, что в пределах его изменения напряжение можно считать неизменным:  $U_s = U_{s1}$  ( $dU_s \rightarrow 0$ ). В этом случае работа, выполненная при увеличении заряда на  $dQ$ , определяется произведением  $dW_s = U_{s1} dQ$ . На рис. 1.13, б работа показана заштрихованным элементом площади.

Всю работу, затраченную на образование заряда, можно определить, суммируя элементы площади в пределах изменения заряда

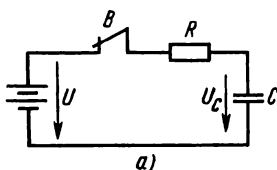
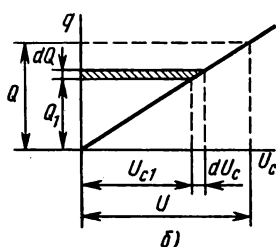


Рис. 1.13





от 0 до  $Q$  и напряжения от 0 до  $U_c = U$ , т. е. площадью прямоугольного треугольника:  $W_s = UQ/2$ . Учитывая также формулу (1.7), получим еще два выражения для энергии электрического поля конденсатора:

$$W_s = UQ/2 = CU^2/2 = Q^2/2C. \quad (1.14)$$

### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Какой диэлектрик из указанных в табл. п. 1 приложения 2 может дать наибольшую электрическую емкость конденсатора при прочих равных условиях?

2. Емкость конденсатора выражается отношением заряда к напряжению [см. формулу (1.8)]. Вместе с тем формулы (1.9) — (1.11) показывают, что емкость конденсаторов не зависит от заряда и напряжения. Как нужно объяснить это положение?

3. В зависимости от характера вольт-кулоновой характеристики  $Q = f(U)$  различают линейные и нелинейные конденсаторы. В чем состоит основное различие этих типов конденсаторов?

4. В радиотехнике широко применяют конденсаторы регулируемой емкости. В чем состоит различие конденсаторов регулируемых и нелинейных?

5. Три конденсатора можно соединить последовательно, параллельно и по схемам смешанного соединения. Сколько схем соединения можно построить из трех конденсаторов одинаковой емкости  $C$  и какая из них имеет наименьшую эквивалентную емкость?

**Задача 1.5.** Определить емкость и напряженность электрического поля плоского конденсатора, если площадь его обкладок  $S = 200 \text{ см}^2$ , поверхностная плотность заряда  $\sigma = 4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/см}^2$ . Напряжение между обкладками  $U = 1000 \text{ В}$ . Задачу решить в двух случаях: а) конденсатор воздушный; б) диэлектрик между обкладками — бумага, пропитанная маслом ( $\epsilon_4 = 10$ ).

**Задача 1.6.** Из четырех конденсаторов емкостью по  $4 \text{ мкФ}$  составляют два варианта схем: а)  $C_1$  и  $C_2$  между собой соединены параллельно,  $C_3$  и  $C_4$  — последовательно; относительно входных зажимов эти две группы соединены параллельно;

б)  $C_1$  и  $C_2$  между собой соединены последовательно,  $C_3$  и  $C_4$  — параллельно; относительно входных зажимов эти две группы соединены последовательно. Определить напряжение, заряд каждого конденсатора и всей цепи, если заряд  $Q_3 = 8 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$  в обеих схемах одинаковый.

## Г Л А В А 2.

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Получение, передача и распределение электрической энергии, преобразование ее в другие виды энергии связано с явлением электрического тока. Эти энергетические преобразования происходят в электрических цепях.

*Электрическая цепь — это совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока. Электромагнитные процессы в электрических цепях можно описать с помощью понятий об электродвижущей силе, токе и напряжении.*

Русский академик В. В. Петров (1761—1834), которого заслуженно называют отцом русской электротехники, открыл явление электрической дуги и впервые применил его для плавления металлов, электросварки, чем положил начало практическому применению электричества.

Различают электрические цепи постоянного и переменного токов. В данной главе рассмотрены цепи постоянного тока и некоторые общие вопросы, относящиеся к тем и другим цепям.

## **§ 2.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК**

Электрический ток имеет несколько разновидностей в зависимости от типа вещества, в котором он возникает при соответствующих условиях. По степени электропроводности вещества делят на проводники, полупроводники и непроводники (диэлектрики). В данном параграфе рассмотрены ток в проводниках и ток смещения в диэлектриках.

**Электрический ток проводимости.** Электрический ток в проводниках образуют свободные носители электрического заряда. В металлах — это свободные электроны, в электролитах (растворах солей, кислот, щелочей) — заряженные атомы и молекулы (ионы). Электропроводность металлов называется *э л е к т р о н н о й*, а электролитов — *и о н н о й*.

Если в проводнике поддерживается электрическое поле, то свободные заряженные частицы (электроны, ионы), участвующие в тепловом беспорядочном движении, приобретают составляющие скорости в направлении действия сил электрического поля  $F$ , (вдоль линии напряженности). В этом случае частицы движутся преимущественно в одном направлении: положительные — по направлению поля, а отрицательные — в обратную сторону.

Электрический ток можно получить и поддерживать не только в проводнике, но и в вакууме, если обеспечить для этого необходимые условия.

**Явление направленного движения свободных носителей электрического заряда в веществе или в вакууме называется электрическим током проводимости.**

Значение тока проводимости определяется совокупным электрическим зарядом  $Q$  всех частиц, проходящих через поперечное сечение проводника в единицу времени

$$I = Q/t, \quad (2.1)$$

где  $I$  — ток,  $A$  (ампер);  $t$  — время,  $s$  (секунда).

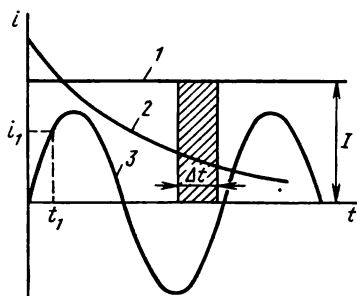


Рис. 2.1

Электрический ток, не изменяющийся во времени, называется **п о с т о я н н ы м**, а ток, изменяющийся с течением времени, — **п е р е м е н н ы м**.

На рис. 2.1 показаны графики постоянного тока (прямая 1) и переменных токов (кривые 2, 3). На графике переменного тока по оси ординат откладываются мгновенные значения тока  $i$ , которые определяются изменением элементарного заряда  $dQ$  за бесконечно малый промежуток времени:

$$i = dQ/dt. \quad (2.3)$$

На кривой 3 показан мгновенный ток  $i_1$  в момент времени  $t_1$ . При постоянном токе, несмотря на движение заряженных частиц, распределение заряда в проводнике стационарно, так как в любом элементе объема за некоторый промежуток времени заряд уходящих и входящих частиц одинаков.

В этом случае неизменяющийся во времени электрический ток создает **с т а ц и о н а р н о е э л е к т р и ч е с к о е п о л е** (при условии неподвижности проводника с током). Оно отличается от электростатического поля тем, что связано с движущимися носителями заряда, но имеет такие же количественные характеристики, так как величина заряда сохраняется постоянной. Поэтому далее при рассмотрении постоянных токов использованы некоторые выражения, полученные для электростатического поля.

**Электрический ток смещения в диэлектрике.** Ранее отмечено, что под действием внешнего электрического поля ток проводимости в диэлектрике очень мал (при рабочих напряжениях и температуре), основное изменение заряда в любом выделенном объеме диэлектрика является следствием смещения связанных заряженных частиц. При изменении напряженности электрического поля изменяется поляризация диэлектрика, а перемещение заряженных частиц образует электрический ток.

**Явление движения связанных заряженных частиц в ди-**

В практических расчетах используют понятие **плотности электрического тока**, которая выражается отношением тока в проводнике к площади его поперечного сечения:

$$J = I/S, \quad (2.2)$$

где  $J$  — плотность электрического тока,  $\text{А/м}^2$ ;  $S$  — площадь поперечного сечения проводника,  $\text{м}^2$ .

электрике при изменении его поляризации называется электрическим током поляризации.

Согласно (2.3), ток поляризации

$$i_n = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(\sigma S)}{dt} = S \frac{d\sigma}{dt},$$

где  $\sigma$  — плотность смещения заряда в диэлектрике.

**Электрическая проводимость и сопротивление проводников.** Опытами установлено, что плотность электрического тока пропорциональна напряженности электрического поля  $E$  и зависит от свойств проводящего вещества, которые в данном случае выражает величина удельной электрической проводимости  $\gamma$ :

$$J = \gamma E. \quad (2.4)$$

*Удельная электрическая проводимость характеризует электропроводность — свойство вещества проводить неизменяющийся электрический ток под действием неизменяющегося электрического поля.*

Для практических целей представляет интерес определение значения тока в проводнике, если известны его форма и размеры: длина  $l$ , площадь поперечного сечения  $S$ . Предположим, что равномерное электрическое поле направлено вдоль провода, тогда разность потенциалов между его концами можно выразить по формуле  $U = El$ .

При равномерном распределении тока по сечению провода, учитывая зависимость плотности тока от напряженности электрического поля, получим  $J = I/S = \gamma U/l$ . Отсюда следует формула, выражающая электрическую проводимость провода заданных размеров

$$G = I/U = \gamma S/l, \quad (2.5)$$

где  $G$  — электрическая проводимость, См (сименс).

При постоянной величине  $\gamma$  постоянна и величина  $G$ . Поэтому ток в проводе пропорционален напряжению между его концами. Величина, обратная электрической проводимости, выражает электрическое сопротивление провода  $R$ , а величина, обратная удельной электрической проводимости, также характеризует свойства материала провода и называется удельным электрическим сопротивлением  $\rho = 1/\gamma$ .

Учитывая эти определения и обозначения, получим другие расчетные формулы для электрических цепей постоянного тока:

$$R = l/G = \rho l/S, \quad (2.6)$$

$$I = U/R, \quad (2.7)$$

где  $R$  — электрическое сопротивление, Ом.

Формула (2.7) выражает закон Ома. Ток в проводнике равен отношению напряжения между его концами к сопротивлению проводника.

Из курса физики известно, что электрическое сопротивление проводников зависит от их температуры. Эта зависимость выражается формулой

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)], \quad (2.8),$$

здесь  $R_1, R_2$  — сопротивление провода при начальной ( $t_1$ ) и конечной ( $t_2$ ) температурах;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления ( $1/^\circ\text{C}$ ).

Электрическое сопротивление (большее или меньшее) имеют все элементы электрических цепей (провода и кабели, обмотки электрических машин, аппаратов, приборов и т. д.). В этих случаях сопротивление не создается преднамеренно, а обусловлено свойствами материалов.

Однако в электротехнике, радиотехнике, электронике широко применяют устройства с электрическим сопротивлением, специально созданные и предназначенные для использования их в электрических цепях.

Элемент электрической цепи, предназначенный для использования его электрического сопротивления, называется **р е з и с т о р о м**.

Если токопроводящий элемент резистора изготовлен из материала с постоянной величиной удельной электрической проводимости, независимой от тока или напряжения, то резистор называется **л и н е й н ы м**, так как имеет постоянное сопротивление и прямолинейную зависимость между током и напряжением на его зажимах — вольт-амперную характеристику  $I = f(U)$ . К резисторам такого типа относятся и регулируемые резисторы, конструкцией которых предусмотрена возможность принудительного изменения их сопротивления.

В практике применяют также резисторы с сопротивлением, зависящим от приложенного к их зажимам напряжения (варисторы). Резистор такого типа называется **н е л и н е й н ы м**, так как он имеет нелинейную вольт-амперную характеристику.

К нелинейным элементам электрических цепей относятся и другие устройства с нелинейной характеристикой  $I = f(U)$ , например электронные лампы, полупроводниковые приборы и др.

#### *Контрольные вопросы и задачи*

1. При каких условиях можно получить постоянный электрический ток проводимости в вакууме?

2. В какую сторону направлен постоянный электрический ток в металлическом проводнике относительно направления движения носителей заряда?

3. Проводники характеризуются величинами сопротивления  $R$  и удельного сопротивления  $\rho$ . В чем состоит физическое сходство и различие этих величин?

4. Электрическое сопротивление металлических проводников возрастает с увеличением их температуры. Как объяснить это явление с точки зрения электронной теории электропроводности?

5. В прямоугольной системе координат изобразите графики зависимости тока от напряжения  $I=f(U)$  по выражению (2.7) для двух проводов, одинаковых по размерам, но изготовленных из разных материалов — меди, алюминия. В чем состоят различие и сходство этих графиков?

**Задача 2.1.** От распределительного пункта электросети постоянного тока до электроприемника расстояние  $l_1=200$  м. Сопротивление электроприемника  $R=15$  Ом, напряжение на его зажимах  $U=120$  В. Определить: падение напряжения в медных проводах линии, имеющих площадь поперечного сечения  $S=10$  мм<sup>2</sup>; наименьшую площадь поперечного сечения алюминиевых проводов, при которой падение напряжения в линии составляет 5 % от номинального напряжения.

**Задача 2.2.** Медный изолированный провод обмотки электродвигателя имеет длину  $l=275$  м, площадь поперечного сечения  $S=4$  мм<sup>2</sup>. Определить: сопротивление обмотки при температурах  $t_1=+20$  °С и  $t_2=+10$  °С; температуру обмотки после работы двигателя, если ее сопротивление увеличилось до  $R_3=1,4$  Ом.

## § 2.2. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Простейшая электрическая цепь (рис. 2.2) состоит из трех основных элементов: источника 1, приемника 2 электрической энергии, соединительных проводов 3. Эти элементы условно названы основными, так как при отсутствии хотя бы одного из них электрическую цепь собрать невозможно.

Отдельное устройство, входящее в состав электрической цепи, выполняющее в ней определенную функцию, называется элементом электрической цепи.

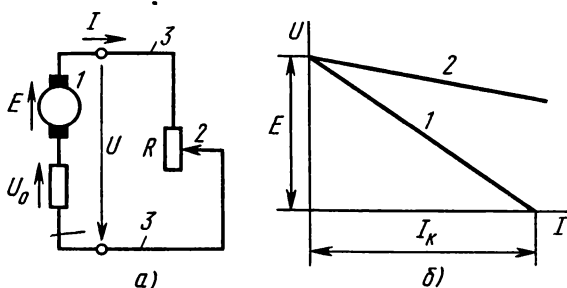


Рис. 2.2

В электрические цепи кроме основных входят вспомогательные элементы, предназначенные для управления, регулирования, контроля, защиты.

**Источники электрической энергии.** Электрическую энергию получают путем преобразования других видов энергии посредством соответствующих преобразователей, которые принято называть источниками электрической энергии.

В настоящее время основным видом таких устройств являются электромеханические генераторы — электрические машины для преобразования механической энергии в электрическую.

На тепловых электростанциях работают турбогенераторы, приводимые в движение тепловыми (паровыми, газовыми) турбинами, а на гидроэлектростанциях установлены гидрогенераторы с приводом от гидравлических турбин. Турбогенераторы и гидрогенераторы — это машины переменного тока (см. § 8.5).

В цепях постоянного тока в качестве источников электрической энергии применяются: электромеханические генераторы (см. § 9.3), электрохимические источники (гальванические элементы, аккумуляторы, топливные элементы), термоэлектрогенераторы (устройства прямого преобразования тепловой энергии в электрическую), фотоэлектрогенераторы (преобразователи лучистой энергии в электрическую).

Возможность получения электрической энергии из других видов энергии связана с тем, что на заряженные частицы кроме сил электрического поля при определенных условиях могут действовать силы, обусловленные неэлектромагнитными процессами. Эти силы, называемые *сторонними*, возникают при химических реакциях, нагревании контакта разнородных металлов или полупроводников, при освещении фотоэлементов и в некоторых других случаях.

Принципы прямого преобразования различных видов энергии в электрическую, устройство преобразователей известны из курса физики и частично рассмотрены в данной книге (см. гл. 8, 9). Отметим общее свойство источников: при преобразовании любого вида энергии в электрическую в источнике происходит разделение положительного и отрицательного зарядов и образуется электродвижущая сила (э. д. с.).

Таким образом, электрическую энергию можно получить из других видов энергии при наличии стороннего поля или индуктированного электрического поля.

Величина, характеризующая способность стороннего поля и индуктированного электрического поля вызывать электрический ток, называется *электродвижущей силой*.

Согласно закону сохранения энергии, количество электрической энергии,  $W_{\text{и}}$ , полученной в источнике, равно работе сторонних

или электромагнитных сил, совершенной в процессе разделения заряда ( $W_n = A$ ).

Отношение этой работы к величине разделенного заряда выражает величину электродвижущей силы

$$E = A/Q, \quad (2.9)$$

где  $E$  — э.д.с., В.

Учитывая это, получим выражение энергии источника

$$W_n = EIt, \quad (2.10)$$

где  $W_n$  — энергия, Дж (джоуль).

Электрическая энергия, получаемая в источнике в единицу времени (за одну секунду), называется м о щ н о с т ь ю и с т о ч н и к а:

$$P_n = W_n/t = EI, \quad (2.11)$$

здесь  $P_n$  — мощность источника, Вт (ватт).

Для оценки эффективности работы источника определяют его коэффициент полезного действия  $\eta_n$  (к.п.д.)

$$\eta_n = (P_n - \Delta P_n)/P_n, \quad (2.12)$$

где  $\Delta P_n$  — мощность потерь энергии в источнике.

**Приемники электрической энергии.** Наиболее многочисленными и разнообразными элементами электрических цепей являются приемники электрической энергии (электроприемники). Они служат для преобразования электрической энергии в другие виды энергии: механическую (электродвигатели переменного и постоянного тока, тяговые электромагниты), тепловую (электрические промышленные печи, бытовые нагревательные приборы, сварочные аппараты), световую (лампы электрического освещения, прожекторы), химическую (аккумуляторы в процессе зарядки, электролитические ванны и др.).

Физические процессы преобразования электрической энергии в тепловую и химическую изучаются в курсе физики. Рассмотрим количественные выражения, характеризующие эти процессы.

Предположим, что между концами проводника с сопротивлением  $R$ , который является электроприемником, разность потенциалов  $U$  (при отсутствии э.д.с. в проводнике), заряд перемещенных частиц  $Q = It$ .

Энергия электрического поля, затраченная на перемещение заряженных частиц, согласно выражению (1.4),  $W_s = UQ = UIt$ .

Учитывая формулу (2.7), получим выражение энергии электроприемника

$$W_n = UIt = I^2 Rt. \quad (2.13)$$



Скорость преобразования электрической энергии в электроприемнике в другой вид энергии называется мощностью электроприемника. Численно она выражается величиной энергии, преобразуемой в электроприемнике за одну секунду:

$$P_n = W_n/t = UI = I^2 R, \quad (2.14)$$

где  $P_n$  — мощность электроприемника, Вт.

К.п.д. электроприемника выражается отношением

$$\eta_n = (P_n - \Delta P_n)/P_n, \quad (2.15)$$

где  $\Delta P_n$  — мощность потерь энергии в электроприемнике.

Принцип преобразования электрической энергии в тепловую лежит также в основе работы электрических ламп накаливания. Нить лампы, изготовленная из тугоплавкого металла (например, вольфрама), нагревается при электрическом токе в ней до температуры около 3000 °С. При высокой температуре нити лампы часть энергии (менее 10 %) излучается в виде света.

В аккумуляторе при разрядке, как в любом источнике электрической энергии, направления э.д.с. и тока совпадают.

В режиме зарядки э.д.с.  $E_a$  аккумулятора сохраняет то же направление, а направление тока изменяется на обратное, так как оно определяется не э.д.с.  $E_a$ , а э.д.с.  $E$  внешнего заряжающего источника. При зарядке аккумулятора его э.д.с. направлена против зарядного тока и поэтому ее называют противо-э. д. с.

Перемещение заряженных частиц при зарядке аккумулятора происходит под действием электрического поля, которое создается заряжающим источником. Силы электрического поля в любой момент времени уравниваются сторонними (в данном случае химическими) силами, поэтому работа сил электрического поля, приходящаяся на единицу заряда, может быть приравнена  $E_a$ . Тогда энергия, израсходованная на зарядку, и мощность выражаются формулами

$$W_n = E_a Q = E_a It; \quad (2.16)$$

$$P_n = W_n/t = E_a I. \quad (2.17)$$

Эти формулы относятся ко всем электроприемникам, имеющим противо-э.д.с.

**Проводниковые материалы.** В качестве проводниковых материалов наибольшее применение имеют металлы и их сплавы.

Основными из электрических характеристик проводниковых материалов являются удельная проводимость  $\gamma$  (или удельное сопротивление  $\rho$ ), температурный коэффициент удельного сопротивления  $\alpha$  (см. табл. П. 2.1).

С точки зрения электропроводности различают проводниковые материалы с малым удельным сопротивлением, сверхпроводящие, с большим удельным сопротивлением.

Материалы с *малым удельным сопротивлением* идут на изготовление линейных проводов и кабелей (для устройства линий передачи и распределения электрической энергии, линий связи); обмоточных проводов (для всевозможных обмоток электрических машин, аппаратов, приборов). Для этих целей наибольшее применение имеют медь и алюминий.

Широкое применение меди обусловлено не только высокой удельной проводимостью, но и другими ее свойствами, в числе которых достаточно высокая механическая прочность, удовлетворительная стойкость против коррозии. Из меди легко изготовить проволоку разной толщины (до тысячных долей мм), ленты и тонкую фольгу. Кроме чистой меди в электротехнике применяют ее сплавы (бронзу, латунь). В электротехнике по технико-экономическим соображениям все большее применение находит алюминий. Удельное сопротивление алюминия выше, а механическая прочность ниже, чем у меди, но его плотность примерно в 3,5 раза меньше, поэтому алюминиевый провод такого же сопротивления, что и медный, при большей толщине оказывается приблизительно вдвое легче. Очень важное преимущество алюминия состоит в том, что он менее дефицитен, чем медь, по обработке не уступает меди (кроме пайки). Алюминий применяют в основном для изготовления комбинированных проводов линий электропередачи и линий связи (сталеалюминиевые провода) и все больше внедряют в производство кабелей и изолированных проводов.

При понижении температуры удельное сопротивление  $\rho$  металлов уменьшается. В настоящее время известно, что многие чистые металлы и сложные вещества (сплавы и химические соединения) при охлаждении до некоторой температуры, приближающейся к абсолютному нулю, переходят в состояние *сверхпроводимости*, с наступлением которого их удельное сопротивление скачком уменьшается практически до нуля. В числе сверхпроводников можно отметить алюминий, ртуть, тантал, свинец, ниобий и его сплавы. Из этих веществ наиболее низкую критическую температуру перехода в сверхпроводящее состояние 1,2 К имеет алюминий.

В сверхпроводнике при наличии электрического тока потеря энергии практически нет, поэтому в замкнутом сверхпроводящем контуре возникший однажды ток будет циркулировать много лет, не уменьшаясь по величине, даже без подвода энергии извне. Однако энергию необходимо расходовать на обеспечение работы охлаждающего устройства, чтобы поддерживать температуру контура ниже критической величины.

Материалы с большим удельным сопротивлением в основном

являются металлическими сплавами: манганин — медно-марганцовый сплав, применяется при изготовлении измерительных приборов и образцовых сопротивлений; константан — медно-никелевый сплав для намотки проволочных резисторов и реостатов; нихром — сплав никеля, хрома и железа; фехраль — сплав железа, хрома, алюминия применяют для устройства электронагревательных приборов.

Эти материалы имеют высокое удельное электрическое сопротивление, достаточную механическую прочность, позволяют получить ленты, проволоки различной толщины.

В зависимости от области применения важную роль играют и другие характеристики и свойства сплавов высокого сопротивления, например очень малый температурный коэффициент удельного сопротивления  $\alpha$  (манганин, константан), высокая рабочая температура (нихром, фехраль), стойкость против коррозии. В перечень проводниковых материалов, применяемых в электротехнике, входят угольные материалы, металлические и металло-керамические контактные материалы, припой и др.

**Проводниковые изделия.** К проводниковым изделиям относятся электрические кабели, провода и шнуры внутренних проводов, провода для воздушных линий электропередачи, обмоточные провода, контактные изделия и т. д.

В силовом кабеле несколько токоведущих жил взаимно изолированы, скручены вместе и заключены в общую герметичную оболочку (рис. 2.3). На оболочку наложены защитные покровы. Токоведущие жилы изготовлены из медных или алюминиевых проволок 1. В поперечном сечении жилам придают форму сектора, достигая уменьшения диаметра кабеля. Изоляция токоведущих жил 2 изготовлена из плотной кабельной бумаги (предназначенной для кабелей). Для заполнения пустот, образующихся при скручивании жил, уложены заполнители 3, а затем наложена поясная общая изоляция 4 также из кабельной бумаги. Бумага пропитана специальной кабельной массой. Вместо бумажной применяют также резиновую или пластмассовую изоляцию. Последующая герметическая оболочка 5 из свинца, алюминия, а в кабелях напряжением до 1 кВ из пластмассы, служит для защиты от проникновения влаги, кислот, газов.

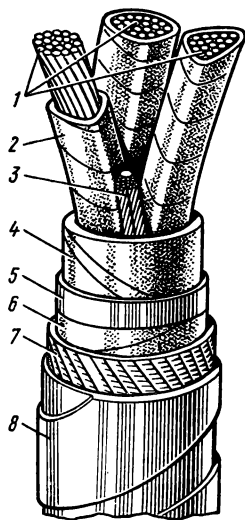


Рис. 2.3

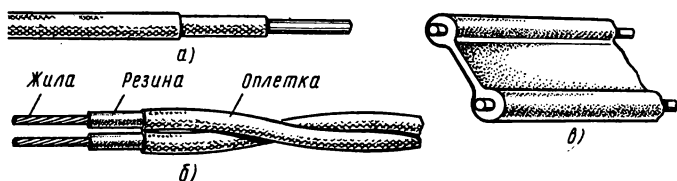


Рис. 2.4

Далее наложены покрытия: бумажно-битумное б, из кабельной пряжи 7. От механических повреждений кабель защищен броней из стальных лент 8. Поверх брони имеется еще покров из кабельной пряжи, пропитанной битумом, который защищает броню от коррозии.

Для воздушных линий электропередачи применяют: неизолированные алюминиевые многопроволочные провода сечением 16—400 мм<sup>2</sup>; комбинированные сталеалюминиевые провода сечением 35—600 мм<sup>2</sup>, у которых стальная сердцевина (она несет механическую нагрузку) и вокруг нее наружная оболочка из алюминиевых проволок (электропроводящая часть).

Для устройства воздушных линий малой мощности применяют стальные провода. Для внутренних проводок кроме кабелей применяют изолированные провода, шнуры, шинопроводы.

На рис. 2.4, а — в показаны некоторые типы изолированных проводов: а) ПР и АПР — провода одножильные (у первого жила медная, у второго — алюминиевая) с резиновой изоляцией в оплетке из пропитанной хлопчатобумажной пряжи (такие же провода, но с поливинилхлоридной изоляцией марок ПВ и АПВ); б) ПРД — провода с резиновой изоляцией двухжильный гибкий в оплетке из хлопчатобумажной пряжи с медной жилой; в) ППВ и АППВ — провода плоские двух- или трехжильные с поливинилхлоридной изоляцией с медными (первый) или алюминиевыми (второй) жилами.

Обмоточные провода применяют для изготовления обмоток электрических машин и аппаратов.

### *Контрольные вопросы и задачи*

1. У источника электрической энергии для соединения с другими элементами электрической цепи постоянного тока имеются выходные зажимы (два полюса + и —). Как направлены э.д.с. и ток внутри источника относительно его зажимов?

2. Как направлены напряжение источника и ток во внешней части цепи относительно выходных зажимов источника?

3. Как направлены напряжение и ток приемника относительно его входных зажимов?

4. Какие преимущества и недостатки имеет применение алюминия вместо меди для проводов линейных, обмоточных?

5. В практике для измерения и счета электрической энергии и мощности применяют основные единицы: джоуль (Дж), ватт (Вт) и производные от них, более крупные единицы — киловатт (кВт), мегаватт (МВт), киловатт·час (кВт·ч). Как количественно выражаются производственные единицы через основные?

**Задача 2.3.** Два генератора постоянного тока, работая круглосуточно на общий приемник, дали вместе за месяц (30 сут) 96 000 кВт·ч электроэнергии. В течение 10 сут первый генератор находился в ремонте и за это время счетчик электроэнергии, установленный на линии к электроприемнику, показал 24 000 кВт·ч. Определить мощность и э.д.с. каждого генератора, если во время работы их нагрузка не менялась, амперметр в цепи первого генератора показывал ток  $I_1 = 500$  А, а в цепи второго —  $I_2 = 1000$  А.

**Задача 2.4.** К распределительному щиту электросети постоянного тока присоединены электродвигатель и электропечь. Дано: механическая мощность двигателя (на валу)  $P_{\text{мех}} = 6$  кВт, к.п.д. = 83 %, напряжение на зажимах двигателя  $U_{2д} = 120$  В, сопротивление линии  $R_{\text{л}} = 0,1$  Ом; длина линии до электропечи  $l = 37$  м, площадь поперечного сечения алюминиевого провода  $S = 16$  мм<sup>2</sup>, показание ваттметра на входе в линию  $P_1 = 5670$  Вт. Определить: напряжение на распределительном щитке  $U_1$ ; напряжение на зажимах электропечи  $U_{2п}$ , полагая напряжение на щитке неизменным.

### § 2.3. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При расчете электрической цепи определяют токи, напряжения, мощности и другие величины, характеризующие работу ее элементов.

Результаты расчета дают возможность оценить условия работы и выбрать соответствующие этим условиям источники, приемники, провода, вспомогательное электрооборудование, приборы.

**Режимы электрических цепей.** Источники и приемники электрической энергии, а также вспомогательные аппараты и приборы характеризуются номинальными величинами, в числе которых могут быть напряжение  $U_{\text{ном}}$ , ток  $I_{\text{ном}}$ , мощность  $P_{\text{ном}}$  и др. Для проводов и кабелей кроме номинального напряжения указывают допустимые токи  $I_{\text{доп}}$ . Номинальные величины указаны в паспорте устройства, в каталоге. На эти величины заводы-изготовители рассчитывают устройство для нормальной работы.

Режим, при котором действительные токи, напряжения, мощности и другие величины соответствуют номинальным характеристикам элементов электрической цепи, называется **номинальным (нормальным)**.

Отклонения от номинального режима нежелательны, а в сторону превышения номинальных величин в большинстве слу-

чаев недопустимы, так как при этом не могут быть гарантированы надежность, расчетные продолжительность и экономичность работы электрических устройств и установок.

Для обеспечения нормальных условий работы приемников электрической энергии необходимо, в первую очередь, соблюдать соответствие напряжений: действительное напряжение на зажимах устройства должно быть равно его номинальному напряжению.

Режимы электрической цепи по различным причинам могут все же отличаться от номинального. Если действительные характеристики режима отличаются от номинальных значений, но отклонения находятся в допустимых пределах, такой режим называют рабочим.

На схеме простейшей электрической цепи (см. рис. 2.2, а) сопротивление соединительных проводов отнесено к приемнику (общее сопротивление приемника и проводов  $R$ ).

Применяя к этой цепи закон сохранения энергии, составим уравнение энергетического баланса за некоторое время  $t$ : электрическая энергия получена в источнике в количестве  $W_n = EIt$  (2.10), большая часть ее передается приемнику  $W_n = I^2 R t$  (2.13), а меньшая часть расходуется в самом источнике ( $W_0 = I^2 r t$  — потери энергии)  $W_n = W_0 + W_n$  или  $EIt = I^2 r t + I^2 R t$ . Потери энергии в источнике выражены здесь по аналогии с энергией приемника путем введения величины внутреннего сопротивления источника  $r$ . После сокращения на  $t$  получим уравнение баланса мощностей  $EI = I^2 r + I^2 R$ , а сократив еще на  $I$ , — уравнение напряжений  $E = Ir + IR$  или  $E = U_0 + U$ , где  $U_0$  — внутреннее падение напряжения в источнике;  $U$  — напряжение на внешних зажимах источника. Из уравнения напряжений следуют выражения для тока в цепи и напряжения на внешних зажимах источника:

$$I = E / (r + R), \quad (2.18)$$

$$U = IR = E - Ir. \quad (2.19)$$

Формулы (2.18) и (2.19) выражают закон Ома для простейшей электрической цепи.

Предположим, что в схеме рис. 2.2, а  $R = \infty$ , тогда тока в цепи нет ( $I = 0$ ), что соответствует размыканию цепи.

Режим электрической цепи или отдельных ее элементов, при котором ток в них равен нулю, называется режимом холостого хода.

При  $R = 0$ , согласно выражению (2.18), ток в цепи  $I = E/r = I_k$ , а напряжение на зажимах приемника и источника  $U = 0$ .

Режим электрической цепи, при котором накоротко замкнут участок с одним или несколькими элементами, в связи с чем напря-

жение на этом участке равно нулю, называется режимом короткого замыкания.

Зависимость напряжения на зажимах источника от тока нагрузки  $U = f(I)$  называют внешней характеристикой. Такую зависимость выражает уравнение (2.19) и характеристики 1, 2 на рис. 2.2, б.

**Схемы электрических цепей.** При разработке, монтаже и эксплуатации электрических устройств и установок необходимы электрические схемы.

*Схема электрической цепи — это графическое изображение, содержащее условные обозначения элементов электрической цепи и показывающее соединения между ними.*

В практике различают схемы принципиальные, схемы соединений (монтажные) и др.

Для расчета электрических цепей составляют также схемы замещения (расчетные).

Принципиальная схема определяет полный состав элементов и связей между ними. Она, как правило, дает детальное представление о принципах работы электрического изделия, установки.

Схема соединений (монтажная) показывает соединения составных частей изделия, установки, определяет провода, жгуты, кабели, которыми эти соединения осуществляются, а также места их присоединения и ввода.

По принципиальной схеме изучают принципы работы изделий, установок; по схемам соединения осуществляют монтаж и присоединения их составных частей, те и другие схемы используют при наладке, регулировке, контроле, ремонте и эксплуатации изделий, установок.

Схема замещения электрической цепи отображает свойства этой цепи при определенных условиях и применяется при расчетах. На схеме замещения изображают все элементы, влиянием которых на результаты расчета пренебречь нельзя, и указывают электрические соединения между ними, соответствующие принципиальной схеме. Условные обозначения для электрических схем установлены стандартами.

Элемент цепи, в котором электрическая энергия преобразуется в теплоту, в схеме замещения характеризуется величиной его сопротивления  $R$  или проводимости  $G$ . Такие элементы называются пассивными. К ним относятся и соединительные провода, если их сопротивлением нельзя пренебречь.

Элементы электрических цепей, в которых преобразование энергии сопровождается возникновением электродвижущей силы (аккумуляторы, электрические машины), называют активными. Часть энергии при этом превращается в теплоту (потери энер-

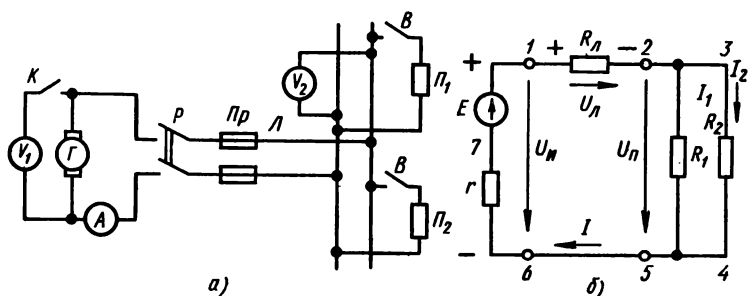


Рис. 2.5

гии), поэтому такой элемент в схеме замещения характеризуется величинами э.д.с.  $E$  и внутреннего сопротивления  $r$ .

На рис. 2.5,а показана принципиальная схема некоторой электрической цепи, а на рис. 2.5,б — ее схема замещения.

На рис. 2.6 изображена схема замещения сложной электрической цепи. Рассматривая схемы различных электрических цепей, можно выделить в них характерные участки: **ветвь** — участок электрической цепи, вдоль которого ток один и тот же; **узел** — место соединения ветвей электрической цепи; **контур** — замкнутый путь по нескольким ветвям электрической цепи. На схемах стрелками отмечают положительные направления э.д.с., напряжений, токов.

**Законы Кирхгофа.** Для расчета электрических цепей наряду с законом Ома применяются два закона Кирхгофа.

**Первый закон Кирхгофа** является следствием принципа непрерывности тока (сохранения заряда), применяется к узлам электрических цепей.

**В ветвях электрической цепи, соединенных в одном электрическом узле, сумма токов направленных к узлу ( $I_n$ ), равна сумме токов, направленных от узла ( $I_k$ ):**

$$\sum_1^n I_n = \sum_1^k I_k. \quad (2.20)$$

По первому закону Кирхгофа, для каждого узла электрической цепи можно составить уравнение токов (узловое уравнение), например для узла б в схеме рис. 2.6  $I_2 = I_1 + I_3$ .

**Второй закон Кирхгофа** является следствием закона сохранения энергии, применяется к контурам электрических цепей.

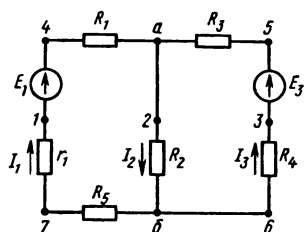


Рис. 2.6



**В ветвях, образующих контур электрической цепи, алгебраическая сумма э.д.с. равна алгебраической сумме падений напряжения в пассивных элементах:**

$$\sum_1^n E_n = \sum_1^k I_k R_k. \quad (2.21)$$

По второму закону Кирхгофа для каждого контура электрической цепи можно составить уравнение напряжений (контурное уравнение). Например, для контура  $a-5-3-6-1-4-a$  в схеме рис. 2.6:  $E_1 - E_3 = I_1 R_1 - I_3 R_3 - I_3 R_4 + I_1 R_5 + I_1 r_1$ . Оно составлено в следующем порядке: выбраны (произвольно) направления токов в ветвях и направление обхода контура; в левую часть уравнения записана алгебраическая сумма э.д.с., встречающихся при обходе контура, в правую — алгебраическая сумма падений напряжения в пассивных элементах контура. В таком же порядке можно составить уравнения для других контуров схемы. При этом положительными считают э.д.с. и токи, направление которых совпадает с направлением обхода контура.

### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Напряжение на зажимах источника  $U$  (см. рис. 2.2,а) связано с током нагрузки  $I$  уравнением (2.19). Как будет изменяться напряжение источника при изменении его нагрузки в пределах от холостого хода до короткого замыкания при постоянных величинах э.д.с.  $E$  и внутреннего сопротивления  $r$ ?

2. На рис. 2.2,б показаны две внешние характеристики источника ( $I$ , 2). Какая из них предпочтительнее с точки зрения условий работы приемника?

3. В момент включения электроплитки яркость уже горящей электролампы, включенной в ту же сеть, немного уменьшается. Как объяснить это явление?

4. Сколько в электрической цепи (см. рис. 2.6) ветвей, узлов, контуров?

5. Как выражается в общем виде (формулой) при токе  $I$  напряжение на зажимах: а) электроприемника с сопротивлением  $R$ ; с э.д.с.  $E$  и внутренним сопротивлением  $r$ ? б) источника электрической энергии с э.д.с.  $E$  и внутренним сопротивлением  $r$ ?

**Задача 2.5.** В электрической цепи рис. 2.2,а источник электроэнергии имеет э.д.с.  $E = 24$  В, внутреннее сопротивление  $r = 1$  Ом; сопротивление электроприемника  $R = 7$  Ом. Определить ток в цепи, напряжение на зажимах источника, мощность источника и электроприемника, к.п.д. источника.

**Задача 2.6.** Для схемы электрической цепи рис. 2.6 составить уравнения по первому закону Кирхгофа для всех узлов и по второму закону Кирхгофа для всех контуров.

## § 2.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ Э.Д.С.

Задачи расчета электрических цепей с одним источником э.д.с. в практике встречаются наиболее часто. В схеме такой цепи (рис. 2.9, а) источник находится в одной из ее ветвей — активной, все другие ветви — пассивные.

Независимо от количества пассивных элементов и схемы их соединения задачи расчета подобных цепей обычно решают методом преобразования схемы до простейшего вида (рис. 2.9, б, в, д). Далее на конкретных примерах рассмотрены преобразования схем, в которых можно выделить участки, соединенные последовательно или параллельно.

**Последовательное соединение пассивных элементов.** При последовательном соединении участков или отдельных элементов электрической цепи ток в них один и тот же. Этому признаку последовательного соединения соответствует схема на рис. 2.7, а, где три элемента (например, три резистора с сопротивлениями  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ) соединены в таком порядке: начало следующего элемента соединено с концом предыдущего, входными зажимами данной группы элементов являются начало первого и конец последнего элемента ( $H_1$ ,  $K_3$ ). Между входными зажимами действует напряжение  $U$ , которое согласно второму закону Кирхгофа равно сумме падений напряжения на отдельных элементах (участках):

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = IR_1 + IR_2 + IR_3;$$

$$U = I(R_1 + R_2 + R_3) = IR;$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3. \quad (2.22)$$

Для последовательного соединения произвольного количества пассивных элементов ( $n$ ) можно написать аналогичные выражения. Сопротивление  $R$  по своему действию эквивалентно сопротивлениям  $n$  пассивных элементов. Поэтому группу пассивных элементов можно заменить одним элементом (эквивалентным) и получить более простую схему цепи (рис. 2.7, б), в которой значение тока и баланс мощностей остаются без изменения.

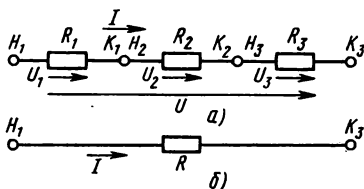


Рис. 2.7

**Параллельное соединение пассивных элементов.** При параллельном соединении участков или отдельных элементов цепи все они присоединены к одной паре узлов, т. е. находятся под действием одного и того же напряжения.

Этому признаку параллельного соединения соответствует схема на рис. 2.8, а, где начала трех пассивных элементов (например, трех резисторов) с сопротивлениями  $R_1, R_2, R_3$  соединены в узле Н, а концы — в узле К. Между узловыми точками действует напряжение:  $U = U_1 = U_2 = U_3$ .

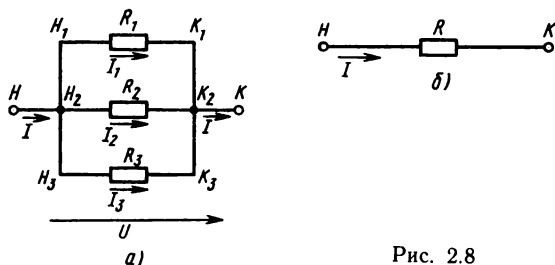


Рис. 2.8

При параллельном соединении пассивных элементов в расчете удобно использовать проводимости ветвей, определив их по формуле (2.6). В данном случае проводимости  $G_1 = 1/R_1$ ;  $G_2 = 1/R_2$ ;  $G_3 = 1/R_3$ , а токи в ветвях  $I_1 = UG_1$ ;  $I_2 = UG_2$ ;  $I_3 = UG_3$ .

Согласно первому закону Кирхгофа, общий ток  $I$  группы ветвей (элементов) равен сумме токов ветвей и направлен в данном случае от узла Н к узлу К:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = UG_1 + UG_2 + UG_3;$$

$$I = U(G_1 + G_2 + G_3) = UG;$$

$$G = G_1 + G_2 + G_3. \quad (2.23)$$

Для параллельного соединения произвольного количества пассивных элементов ( $n$ ) можно написать аналогичные выражения. Общая проводимость  $G$  по своему действию эквивалентна проводимостям  $n$  пассивных элементов при сохранении значения общего тока и баланса мощностей цепи. Поэтому группу пассивных элементов можно заменить одним элементом (эквивалентным) и получить более простую схему (рис. 2.8, б), в которой  $R = 1/G$ .

**Преобразование схем.** На рис. 2.9, а показана схема электрической цепи, в которой имеется один источник энергии ( $E, r$ ), а в группе пассивных элементов можно отметить последовательное соединение электроприемников и параллельное соединение вет-

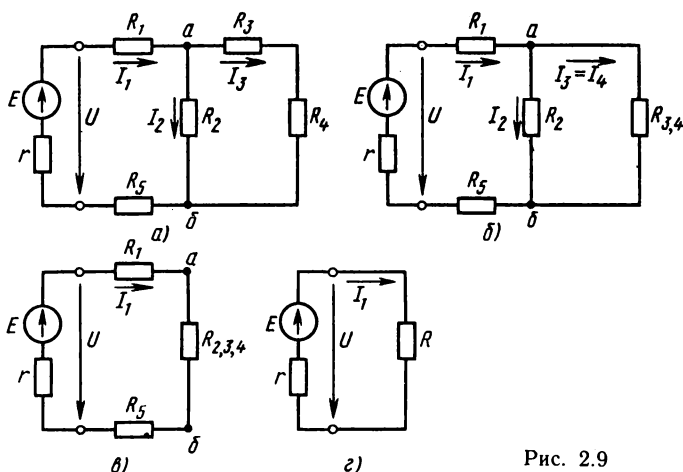


Рис. 2.9

вей. Для расчёта подобных цепей применяют метод преобразования (свертывания) схем, в результате которого они приводятся к простейшему виду. Предположим, что для этой цепи известны сопротивления пассивных элементов, э.д.с.  $E$ , требуется найти ток, напряжение и мощность каждого элемента и всей цепи.

Преобразование схемы в данном случае начинается с третьей ветви, где элементы  $R_3$  и  $R_4$ , соединённые последовательно, заменим одним с сопротивлением  $R_{3,4} = R_3 + R_4$  и получим более простую схему рис. 2.9, б. В этой схеме элементы  $R_2$  и  $R_{3,4}$  соединены параллельно. Их тоже заменим эквивалентным элементом  $R_{2,3,4}$ , сложив проводимости  $G_2 = 1/R_2$  и  $G_{3,4} = 1/R_{3,4}$ ;  $G_{2,3,4} = G_2 + G_{3,4}$ ;  $R_{2,3,4} = 1/G_{2,3,4}$ . После замены получается ещё более простая схема (рис. 2.9, в), в которой все элементы соединены последовательно. Общее (эквивалентное) сопротивление внешней части цепи  $R = R_1 + R_{2,3,4} + R_5$ . Такая замена приводит к простейшей схеме (рис. 2.9, г), в которой ток  $I_1 = E/(r + R)$ .

Для определения токов во второй и третьей ветвях надо прежде найти напряжение между узловыми точками по схеме рис. 2.9, в  $U_{a\delta} = I_1 R_{2,3,4}$ . Токи  $I_2$  и  $I_3$  легко определить по закону Ома (схема рис. 2.9, б):  $I_2 = U_{a\delta}/R_2$ ;  $I_3 = U_{a\delta}/R_{3,4}$ .

После определения токов нетрудно найти напряжения и мощности пассивных элементов, мощность источника, применяя уже известные формулы, и составить баланс мощностей: мощность источника за вычетом мощности потерь в источнике равна сумме мощностей всех электроприёмников:  $P_{\text{и}} - P_0 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5$ .

### Контрольные вопросы и задачи

1. Для электрической цепи с произвольным числом  $n$  пассивных элементов записаны выражения:  $I = I_n$ ;  $U = \sum_1^n U_n$ ;  $R = \sum_1^n R_n$ . По какой схеме соединены пассивные элементы этой цепи?

2. Для электрической цепи с произвольным числом  $n$  пассивных элементов записаны выражения:  $U = U_n$ ;  $I = \sum_1^n I_n$ ;  $G = \sum_1^n G_n$ . По какой схеме соединены пассивные элементы этой цепи?

3. Как изменится напряжение на зажимах источника и напряжение между узловыми точками «а» и «б» в схеме рис. 2.9, а, если сопротивления  $R_1$  уменьшить?  $R_5$  увеличить?

4. Как изменятся падения напряжения в элементах  $R_1$  и  $R_5$  (см. рис. 2.9, а), если элемент  $R_4$  замкнуть накоротко? если разорвать провод, соединяющий элементы  $R_3$  и  $R_4$ ?

5. Как изменится ток  $I_2$  и падение напряжения  $U_5$  (в элементе  $R_5$ ) в схеме рис. 2.9, а, если сопротивления  $R_4$  уменьшить?  $R_2$  увеличить?

**Задача 2.7.** Для электрической цепи, схема которой представлена на рис. 2.9, а, дано:  $E = 160$  В;  $r = 0,5$  Ом;  $R_1 = 2$  Ом;  $R_2 = 30$  Ом;  $R_3 = 12$  Ом;  $R_4 = 8$  Ом;  $R_5 = 1,5$  Ом. Определить ток, напряжение и мощность каждого элемента и всей цепи.

**Задача 2.8.** Для электрической цепи по схеме рис. 2.9, а дано:  $R_1 = 3$  Ом;  $R_2 = 20$  Ом;  $R_3 = 18$  Ом;  $R_4 = 12$  Ом;  $R_5 = 2$  Ом;  $r = 1$  Ом;  $I_2 = 3$  А. Определить ток, напряжение и мощность каждого элемента и всей цепи; э.д.с. и мощность источника электроэнергии.

## § 2.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С НЕСКОЛЬКИМИ ИСТОЧНИКАМИ Э.Д.С.

Схемы на рис. 2.6 и 2.9, а отличаются только тем, что в первой имеется источник э.д.с.  $E_3$ , которого во второй схеме нет. Если предположить, что в обеих схемах сопротивления элементов и э.д.с.  $E_1$  одинаковы, распределение токов по ветвям различно, так как в каждой ветви к току от источника  $E_1$  добавляется ток от источника  $E_3$  (принцип наложения токов).

Рассмотренный в § 2.4 метод преобразования к схеме рис. 2.6 применить нельзя, так как при наличии э.д.с.  $E_3$  пассивные элементы второй и третьей ветвей нельзя считать соединенными параллельно. Для расчета цепей с несколькими источниками э.д.с. применяют различные методы, некоторые из них рассмотрим далее.

**Последовательное соединение источников э.д.с.** Для схемы рис. 2.10, а по второму закону Кирхгофа [см. формулу (2.21)]:  $E_1 + E_2 + E_3 = Ir_1 + Ir_2 + Ir_3 + IR$ .

Э.д.с. в схеме направлены одинаково относительно направле-

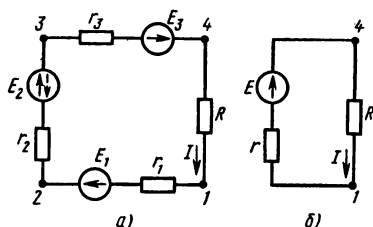


Рис. 2.10

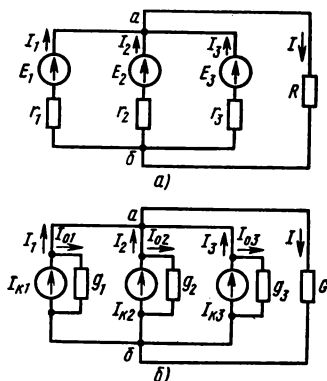


Рис. 2.11

нения обхода контура, т. е. согласно этому все они в левой части равенства приняты положительными. Ток в цепи

$$I = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{(r_1 + r_2 + r_3) + R} = \frac{E}{r + R}. \quad (2.24)$$

Ток в приемнике не изменится, если вместо трех источников э.д.с. включить один эквивалентный источник с э.д.с.  $E = E_1 + E_2 + E_3$  и внутренним сопротивлением  $r = r_1 + r_2 + r_3$  по схеме рис. 2.10, б.

Аналогично можно упростить схему, если в ней последовательно соединены  $n$  источников  $E = \sum_{i=1}^n E_i$ ;  $r = \sum_{i=1}^n r_i$ . Э.д.с., направленные по обходу контура, в данном случае считают положительными, а направленные встречно — отрицательными. Внутренние сопротивления  $r_n$  складывают арифметически.

**Параллельное соединение источников э.д.с.** В практике часто применяют параллельное включение источников электрической энергии для совместной работы их на один или несколько приемников (рис. 2.11, а). При этом решают важную задачу распределения токов (нагрузки) между источниками. Выразим напряжение между узлами а, б ( $U_{аб}$ ) и токи в ветвях с источниками, применив формулу (2.19) к первой ветви:

$$U_{аб} = E_1 - I_1 r_1; \text{ отсюда}$$

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{аб}}{r_1}. \quad (2.25)$$

Отношение э.д.с. источника к его внутреннему сопротивлению

выражает ток короткого замыкания источника

$$I_{к1} = E_1/r_1 = E_1 g_1,$$

где  $g_1$  — внутренняя проводимость источника. Величина  $I_{0.1} = U_{ab}/r_1$  выражает некоторый ток, определяемый отношением мощности потерь энергии в источнике к напряжению  $U_{ab}$  на его зажимах:  $I_{0.1} = P_{0.1}/U_{ab}$ ;  $I_1 = I_{к1} - I_{0.1}$ . Это выражение и ему подобные для других ветвей позволяют от схемы рис. 2.11, а перейти к эквивалентной схеме рис. 2.11, б, в которой источник характеризуется током короткого замыкания и внутренней проводимостью ( $I_k, g$  вместо  $E, r$ ), а приемник — проводимостью  $G = 1/R$ .

Согласно первому закону Кирхгофа, для узла а

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = I_{к1} + I_{к2} + I_{к3} - (I_{0.1} + I_{0.2} + I_{0.3}).$$

Подставив сюда выражения токов, получим

$$U_{ab}G + U_{ab}(g_1 + g_2 + g_3)/I_{к1} + I_{к2} + I_{к3}.$$

Отсюда напряжение между узлами

$$U_{ab} = \frac{I_{к1} + I_{к2} + I_{к3}}{(g_1 + g_2 + g_3) + G} = \frac{I_k}{g + G}. \quad (2.26)$$

Выражение (2.26) показывает, что три источника энергии, соединенные параллельно, можно заменить одним, эквивалентным, характеристиками которого являются ток короткого замыкания  $I_k = I_{к1} + I_{к2} + I_{к3}$  и внутренняя проводимость  $g = g_1 + g_2 + g_3$ .

Если в схеме рис. 2.11, а известны э.д.с. ( $E$ ) и внутренние сопротивления ( $r$ ) источников электрической энергии, токи в ветвях можно определить в следующем порядке: сначала найдем проводимости ветвей, затем узловое напряжение по формуле

$$U_{ab} = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2 + E_3 g_3}{g_1 + g_2 + g_3 + G}, \quad (2.27)$$

которая следует из (2.26), если учесть, что  $I_k = Eg$ ; далее по формуле (2.25) находим ток  $I_1$  и аналогично токи других ветвей. Такой же порядок применяют к расчету электрических цепей с двумя узлами при любом числе параллельных ветвей.

Приступая к расчету конкретной цепи, сначала выбирают одинаковое для всех ветвей направление обхода от одного узла к другому. Э.д.с., направленные по принятому обходу ветвей, считают положительными, а направленные противоположно — отрицательными. Проводимости ветвей всегда положительны.

**Сложные электрические цепи.** Электрическую цепь условно называют сложной, если ее нельзя привести к простейшему виду, так как на некотором этапе преобразования схемы в ней нельзя

выделить однородные элементы (пассивные или активные), соединенные последовательно или параллельно.

Из всех методов расчета сложных электрических цепей рассмотрим наиболее универсальный — метод узловых и контурных уравнений. Исходными данными для этого расчета являются сопротивления (или проводимости) пассивных элементов, э.д.с. источников (значения и направления). Требуется определить токи в ветвях заданной электрической цепи. Для узлов и контуров схемы этой цепи можно составить уравнения по законам Кирхгофа (узловые уравнения по первому закону, контурные — по второму).

В эти уравнения входят неизвестные токи, которые можно найти, решив систему уравнений, число которых равно числу неизвестных токов (числу ветвей).

Для решения задачи выбирают направления токов в ветвях (произвольно), а затем составляют уравнения. Число узловых уравнений в системе должно быть на единицу меньше числа узлов в схеме, а остальные уравнения — контурные. При составлении контурных уравнений выбирают наиболее простые контуры, но с тем условием, что в каждом из них имеется хотя бы одна ветвь, не входящая в другие выбранные контуры. Эти условия обеспечивают независимость уравнений в системе, поэтому любое из них не является следствием других.

#### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Направление э.д.с.  $E_2$  в схеме рис. 2.10,а изменено на обратное. При каком условии изменится направление тока в цепи?

2. Источниками э.д.с. в цепи рис. 2.10,а являются аккумуляторы, причем  $(E_1 + E_3) < E_2$ . Какие из них будут в режиме зарядки, если: а) направление  $E_2$  изменить на обратное? б) направление всех э.д.с. ( $E_1, E_2, E_3$ ) изменить на обратное?

3. Распределение токов в источниках цепи рис. 2.11,а находится в результате ее расчета. Можно ли, пользуясь формулой (2.25), заранее предсказать, в каком источнике ток будет наибольшим?

4. Последовательное согласное соединение источников э.д.с. применяют при объединении одинаковых аккумуляторных элементов в батареи. Какую цель преследуют в этом случае? Можно ли такую батарею нагрузить током, большим номинального тока одного элемента?

5. Параллельное соединение источников электрической энергии применяют, если требуется увеличить мощность присоединенных электроприемников. Как изменятся напряжение  $U_{ab}$  и общий ток в цепи рис. 2.11,а, если параллельно к электроприемнику  $R$  включить еще такой же электроприемник?

**Задача 2.9.** Составить баланс мощностей для электрической цепи, схема которой представлена на рис. 2.12 в двух случаях: а) переключатель  $\Pi$  в положении 3; б) переключатель  $\Pi$  в положении 0. Для определения токов применить метод узловых и контурных уравнений и проверить решение



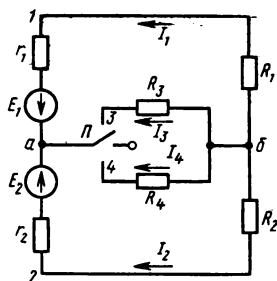


Рис. 2.12

методом узлового напряжения. Дано:  $E_1 = 120\text{ В}$ ;  $r_1 = 0,2\text{ Ом}$ ;  $E_2 = 90\text{ В}$ ;  $r_2 = 0,4\text{ Ом}$ ;  $R_1 = 9,8\text{ Ом}$ ;  $R_2 = 4,6\text{ Ом}$ ;  $R_3 = 5\text{ Ом}$ ;  $R_4 = 10\text{ Ом}$ .

**Задача 2.10.** По условию задачи 2.9 выполнить расчет цепи по схеме рис. 2.12, если переключатель  $P$  в положении 4. Для определения токов применить метод узлового напряжения и проверить решение методом узловых и контурных уравнений.

## § 2.6. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассмотренные ранее методы аналитического расчета электрических цепей постоянного тока применимы к линейным цепям, которые составлены из линейных элементов.

Электрическая цепь, в которую входит хотя бы один нелинейный элемент, называется **нелинейной**.

Для нелинейной цепи справедливы законы Ома и Кирхгофа, однако аналитическое решение задач расчета невозможно, так как сопротивление нелинейного элемента не может быть задано однозначно. Величина сопротивления в данном случае зависит от тока или напряжения, которые в начале расчета тоже неизвестны.

Для расчета нелинейных цепей применяют графические и графоаналитические методы, а исходными данными являются вольт-амперные характеристики элементов  $I = f(U)$ .

**Последовательное соединение нелинейных элементов.** Для расчета цепи рис. 2.13,а заданы вольт-амперные характеристики элементов  $I(U_1)$  и  $I(U_2)$  на рис. 2.13,б. По этим характеристикам нетрудно построить вольт-амперную характеристику всей цепи  $I(U)$ , выражающую зависимость тока от общего напряжения.

Ток  $I$  обоих участков цепи один и тот же, а общее напряжение  $U = U_1 + U_2$ , поэтому для построения общей вольт-амперной характеристики достаточно сложить абсциссы исходных кривых  $I(U_1)$  и  $I(U_2)$ , соответствующие ряду значений тока. Построение показано на рис. 2.13,б для одной точки. Параллельно оси абсцисс проведена прямая 1—3, соответствующая току  $I$ ; отрезки 1—2 и 1—3 в выбранном масштабе выражают напряжения  $U_1$  и  $U_2$ . Сло-

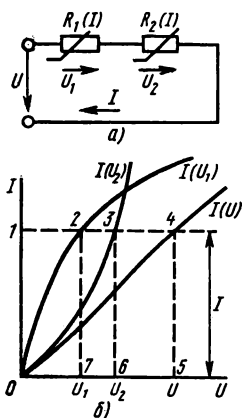


Рис. 2.13

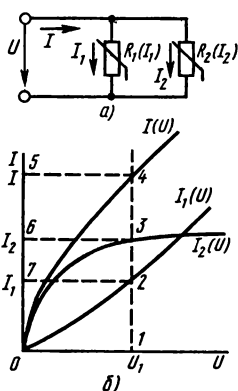


Рис. 2.14

жение их дает отрезок 1—4, выражающий общее напряжение  $U$ , и указывает точку 4 общей вольт-амперной характеристики.

Аналогично находят еще несколько точек и проводят кривую  $I(U)$ .

Построение вольт-амперных характеристик (рис. 2.13, б) является подготовительным этапом для решения различных задач. Например, требуется определить ток в цепи и напряжения  $U_1$  и  $U_2$  на участках, если общее напряжение  $U$  известно.

На оси абсцисс надо отметить отрезок 0—5, соответствующий напряжению  $U$ ; из точки 5 провести параллельно оси ординат прямую 5—4 до пересечения с общей вольт-амперной характеристикой в точке 4; из этой точки провести линию 4—1, параллельную оси абсцисс. Отрезок 5—4 соответствует току в цепи, а отрезки 1—2 и 1—3 — напряжениям на участках (соответственно  $U_1$  и  $U_2$ ).

При последовательном соединении нелинейного элемента с линейным, а также при соединении более двух элементов (линейных и нелинейных) задачи решают аналогично.

**Параллельное соединение нелинейных элементов.** При параллельном соединении двух нелинейных элементов (рис. 2.14, а) к ним приложено одно и то же напряжение, а ток в неразветвленной части цепи равен сумме токов в ветвях:  $I = I_1 + I_2$ .

Построение общей вольт-амперной характеристики  $I(U)$  по заданным вольт-амперным характеристикам элементов проводят путем сложения токов для значений напряжения, как показано на рис. 2.14, б. Предположим, что по заданному напряжению  $U$  надо найти токи в ветвях  $I_1$ ,  $I_2$  и общий ток  $I$ . На оси абсцисс откладывают напряжение  $U$  (отрезок 0—1) и проводят прямую 1—4 парал-

тельно оси ординат. Точки 2, 3, 4 пересечения прямой с вольт-амперными характеристиками указывают значения токов  $I_1$ ;  $I_2$ ;  $I$  (соответственно отрезки 1—2, 1—3, 1—4).

Аналогично решают задачи при параллельном соединении нелинейного элемента с линейными, а также при числе линейных и нелинейных элементов большем двух.

### Контрольные вопросы и задачи

1. В каком порядке надо решать задачи по рис. 2.13, б: дан ток  $I$ , определить напряжения  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U$ ; дано напряжение  $U$ , определить ток  $I$ , напряжения  $U_2$ ,  $U$ ?

2. В каком порядке надо решать задачи по рис. 2.14, б: дан общий ток  $I$ , определить токи  $I_1$ ,  $I_2$ , напряжение  $U$ ; дан ток  $I_2$ , определить токи  $I_1$ ,  $I$ , напряжение  $U$ ?

3. На рис. 2.13, б показаны вольт-амперные характеристики  $I(U_1)$  и  $I(U_2)$  двух нелинейных элементов. Какой из этих элементов имеет меньшее сопротивление при токе  $I_1$ ?

**Задача 2.11.** Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов в схеме рис. 2.15, а, б заданы в табл. 2.1. Построить вольт-амперную характеристику всей цепи, если в неразветвленную ее часть включен линейный резистор с сопротивлением  $R_1 = 5$  Ом.

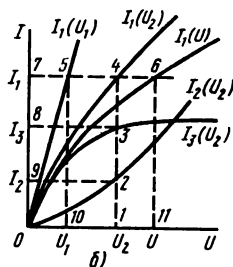
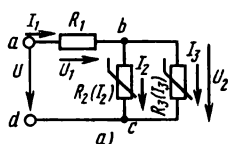


Рис. 2.15

Таблица 2.1

$U_2$ , В	0	10	20	30	40	50	60	80	100	120
$I_2$ , А	0	0,2	0,6	1,0	1,2	1,8	2,2	3,2	4,2	6
$I_3$ , А	0	1,6	2,8	3,4	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,7

**Задача 2.12.** По вольт-амперным характеристикам, построенным при решении задачи 2.11, определить: 1) токи во всех элементах цепи при напряжении на входных зажимах  $U = 90$  В; 2) падение напряжения на линейном резисторе  $R_1$ , если ток  $I_1 = 2$  А.

## ГЛАВА 3

### МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

К понятию о магнитном поле наука пришла в результате длительного наблюдения и изучения магнитных явлений, таких, как притяжение и отталкивание намагниченных тел (постоянных магнитов) или проводов с токами, действие проводника с током на магнитную стрелку, электромагнитная индукция (см. § 3.6).

Изучением магнитных явлений и возможностей их практического использования занимались многие отечественные и зарубежные ученые. В их числе русские академики Э. Х. Ленц (1804—1865), Б. С. Якоби (1801—1874), французский физик и математик Ампер (1775—1836) и др.

#### § 3.1. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Магнитное поле обнаруживается в пространстве, окружающем движущиеся заряженные частицы, с которыми это поле связано. В проводнике и пространстве вокруг него магнитное поле обусловлено этим током, а внутри и вокруг намагниченного тела — внутриатомным и внутримолекулярным движением заряженных частиц (например, вращением электронов вокруг своих осей и вокруг ядра атома).

*Главным свойством магнитного поля является силовое действие на движущуюся электрически заряженную частицу, причем сила воздействия пропорциональна заряду частицы и ее скорости.*

Это свойство магнитного поля положено в основу для определения его количественных характеристик, без которых невозможно изучение магнитных явлений и расчеты, связанные с их практическим использованием.

**Закон Ампера.** В 1820 г. Ампер установил закон, выражающий силу взаимодействия электрических токов. Формулировка и математическое выражение этого закона далее даны для идеализированного случая взаимодействия элементов тока (рис. 3.1).

Величина, численно равная произведению тока проводимости ( $I$ ) вдоль линейного проводника и бесконечно малого отрезка этого проводника ( $\Delta l$ ):  $A = I\Delta l$  называется элементом тока.

**Сила взаимодействия двух элементов тока прямо пропорциональна произведению этих элементов тока и обратно пропорциональна**

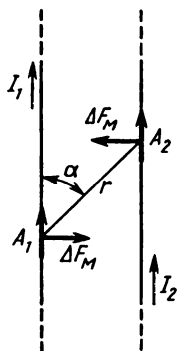


Рис. 3.1

квадрату расстояния между ними:

$$\Delta F_m = \frac{\mu_0 A_1 A_2 \sin \alpha}{4\pi r^2}, \quad (3.1)$$

где  $\Delta F_m$  — элементарная магнитная сила, Н;  $A$  — элемент тока, А·м;  $r$  — расстояние между элементами тока;  $\alpha$  — угол между направлениями;  $A_1$  и  $r$ ;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{генри}}{\text{метр}}$  (Гн/м) — магнитная постоянная.

Формула (3.1) записана в случае взаимодействия токов в вакууме. Эта формула и последующие выражения, относящиеся к магнитному полю в вакууме, справедливы также, если магнитное поле образуется в воздухе или другой неферромагнитной среде (о магнитном поле в ферромагнитной среде см. § 3.3).

Предположим, что источником магнитного поля является провод с током  $I_1$ , а ток  $I_2$  настолько мал, что не изменяет характеристик этого поля. В данном случае элемент тока  $A_2$  является пробным, с помощью которого можно обнаружить силу  $F_m$  и исследовать магнитное поле в различных точках пространства.

Каждый из двух элементов тока ( $A_1$  и  $A_2$ ) создает свое магнитное поле; в окружающем их пространстве одно поле накладывается на другое и образуется общее магнитное поле (принцип наложения полей). Силовое взаимодействие двух токов следует рассматривать как результат действия на каждый из них общего магнитного поля, созданного этими токами.

**Магнитная индукция.** Важные для практики свойства и характеристики магнитного поля зависят от формы проводника, значения и направления тока в нем, от взаимного расположения проводников (если поле создается группой проводников), от свойств среды и т. д. Поэтому магнитные поля, созданные при различных условиях, отличаются одно от другого по форме и количественным показателям.

Для того чтобы сопоставлять магнитные поля, оценивать возможности их использования и вести соответствующие расчеты, установлены и применяются их силовые и энергетические характеристики.

Из выражения (3.1) видно, что сила  $F_m$  зависит от величины пробного элемента тока  $A_2$ , поэтому в качестве характеристики магнитного поля служить не может. Силовой характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}$ .

*Магнитная индукция — векторная величина, численно равная отношению силы, действующей на заряженную частицу, к произведению заряда и скорости частицы, если направление скорости таково, что эта сила максимальна.*

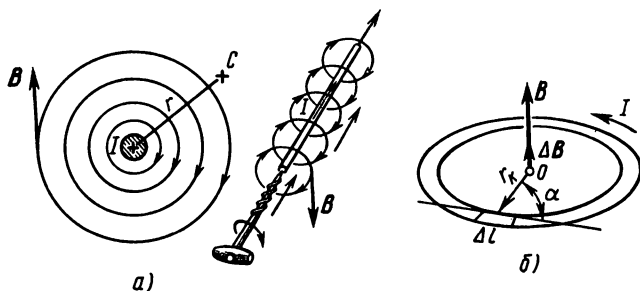


Рис. 3.2

Направление магнитной индукции перпендикулярно векторам силы  $\vec{F}_m$  и скорости  $\vec{v}$  частицы.

На основе этого определения и с учетом формулы (2.1) получим выражение элементарной магнитной индукции:

$$\Delta B = \frac{\Delta F_m}{Qv} = \frac{\Delta F_m}{Q\Delta l/\Delta t} = \frac{\Delta F_m}{I\Delta l}.$$

Из формулы (3.1) следует

$$\Delta B = \frac{\Delta F_m}{A_2} = \frac{\mu_0 A_1 \sin \alpha}{4\pi r^2}.$$

Отсюда

$$\Delta B = \frac{\mu_0 I \Delta l \sin \alpha}{4\pi r^2}, \quad (3.2)$$

где  $\Delta B$  — магнитная индукция, Тл (тесла);  $I\Delta l$  — пробный элемент тока, А·м.

Формула (3.2) выражает закон Био—Савара и определяет элементарную магнитную индукцию в любой точке  $C$  пространства на расстоянии  $r$  от оси провода с током.

Провод конечных размеров состоит из множества элементов, поэтому магнитную индукцию в заданной точке можно найти как векторную сумму элементарных величин  $\Delta B$ , взятую по всей длине провода.

Для длинного прямого провода с током  $I$  (рис. 3.2, а) такое решение приводит к формуле  $B = \mu_0 I / 2\pi r$ , а магнитная индукция в центре кольцевого витка провода с током  $I$  (рис. 3.2, б)  $B = \mu_0 I / 2r_k$ , где  $r_k$  — радиус кольцевого витка.

Внутри катушки (рис. 3.3, а) длиной  $l$ , имеющей  $N$  витков при токе в них  $I$ , магнитная индукция

$$B = \mu_0 I N / l. \quad (3.3)$$

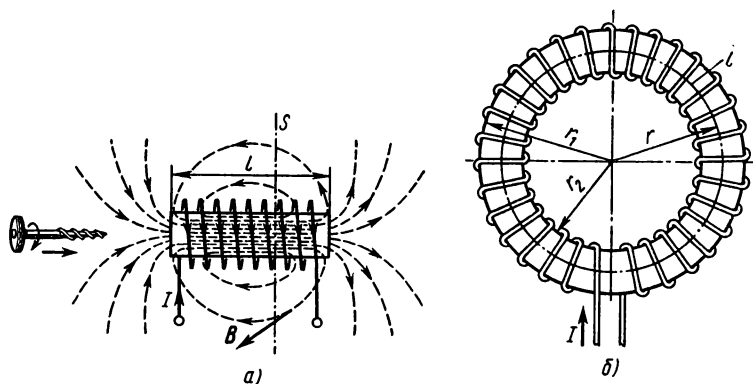


Рис. 3.3

Для катушки с кольцевым неферромагнитным сердечником (рис. 3.3, б)  $l = 2\pi r$ , где  $r$  — радиус сердечника.

Наглядное изображение магнитного поля выполняют с помощью линий магнитной индукции (силовых линий). В каждой точечной линии направление вектора магнитной индукции совпадает с касательной к этой линии (рис. 3.2, а, 3.3, а).

Из формулы (3.3) и рис. 3.3, а видно, что магнитная индукция внутри длинной цилиндрической катушки одинакова по величине и направлению во всех точках. Такое магнитное поле называют однородным (или равномерным).

**Магнитный поток и потокоцепление.** На рис. 3.3, а перпендикулярно оси катушки расположена плоскость  $S$  (след ее показан штрих-пунктирной линией). В данном случае линии магнитной индукции равномерного поля пронизывают эту плоскость под прямым углом (между направлением линий магнитной индукции и нормалью к поверхности  $S$  угол  $\alpha = 0$ ).

В качестве характеристики магнитного поля катушки, кроме величины магнитной индукции, определяют поток магнитной индукции (магнитный поток), который при заданных условиях ( $B = \text{const}$ ,  $\alpha = 0^\circ$ ) выражается произведением

$$\Phi = BS, \quad (3.4)$$

где  $\Phi$  — магнитный поток, Вб (вебер).

Предположим, что число линий магнитной индукции, приходящееся на единицу площади (плотность линий), численно равно величине магнитной индукции  $B$ . Тогда общее число линий внутри катушки составляет  $BS$  ( $S$  — площадь поперечного сечения катушки или площадь, ограниченная витком), т. е. численно равно потоку магнитной индукции катушки.

Если линии магнитной индукции пронизывают поверхность при  $\alpha \neq 0$ , то магнитный поток определяют по формуле

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (3.5)$$

Подставим в формулу (3.4) выражение магнитной индукции (3.3), получим

$$\Phi = \frac{\mu_0 I N S}{l}. \quad (3.6)$$

В магнитном поле катушки рис. 3.3, б рассмотрим некоторый замкнутый контур  $l$ , сцепленный с ее  $N$  витками. Полный ток, охватываемый этим контуром, выражается произведением  $IN$ . От значения полного тока прямо пропорционально зависит магнитный поток катушки [см. формулу (3.6)], поэтому величину  $IN$  называют также намагничивающей силой

$$F = IN, \quad (3.7)$$

где  $F$  — намагничивающая сила, А.

Направление намагничивающей силы связано с направлением тока в витках катушки и его можно определить по правилу буравчика: *если ручку правоходового буравчика вращать по направлению тока в витках, то поступательное движение буравчика покажет направление намагничивающей силы катушки с током* (рис. 3.3, а).

Рис. 3.3, а дает наглядное представление о том, что линии магнитной индукции окружены витками катушки и замыкаются, охватывая витки. Говорят, что магнитный поток сцеплен с витками катушки, а для расчетов введена величина потокоцепления.

Сумма магнитных потоков, сцепленных с отдельными витками катушки, называется потокоцеплением.

Потокоцепление катушки, все  $N$  витков которой сцеплены с магнитным потоком  $\Phi$ , выражается произведением

$$\Psi = \Phi N, \quad (3.8)$$

где  $\Psi$  — потокоцепление, Вб.

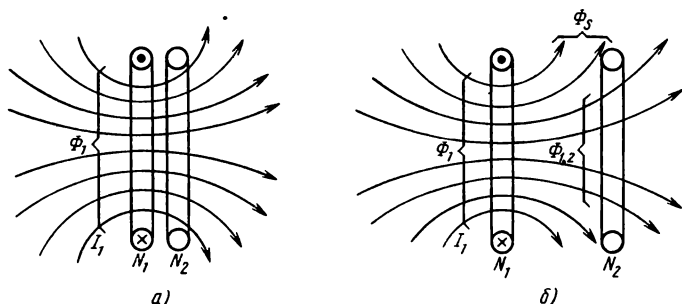


Рис. 3.4



Потокосцепление катушки называют собственным или потокосцеплением самоиндукции, если оно обусловлено током этой катушки. На рис. 3.4, а, б потокосцепление катушки  $N_1$  собственное  $\Psi_{1.1} = \Phi_1 N_1$ . Потокосцепление некоторой катушки, обусловленное электрическим током другой катушки, называют взаимным или потокосцеплением взаимной индукции.

Катушка  $N_2$  на рис. 3.4, а, б имеет взаимное потокосцепление  $\Psi_{1.2} = \Phi_{1.2} N_2$ , причем на рис. 3.4, а  $\Phi_{1.2} = \Phi_1$ , а на рис. 3.4, б  $\Phi_{1.2} < \Phi_1$ , так как имеется некоторый магнитный поток рассеяния  $\Phi_s$ .

#### Контрольные вопросы и задачи

1. В магнитном поле перпендикулярно линии магнитной индукции движется электрон. Изменится ли сила, действующая на электрон, если изменится его скорость? Какова величина силы, если скорость электрона равна нулю?

2. Почему силовой характеристикой магнитного поля является магнитная индукция  $B$ , а не сама сила, действующая на элемент тока в этом поле?

3. Сформулируйте правило буравчика для определения направлений линий магнитной индукции прямого провода с током, используя рис. 3.2, а. Как направить линии магнитной индукции в случаях, показанных на рис. 3.5, а—д.

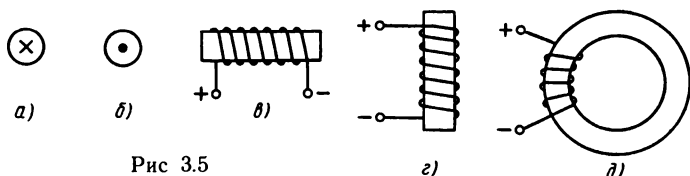


Рис 3.5

4. Какие имеются возможности, чтобы изменить направление магнитного поля кольцевой катушки (см. рис. 3.3, б)?

5. Линии магнитной индукции равномерного магнитного поля пронизывают под углом  $\alpha = 90^\circ$  плоскость в форме круга и часть сфериче-

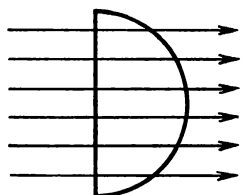


Рис. 3.6

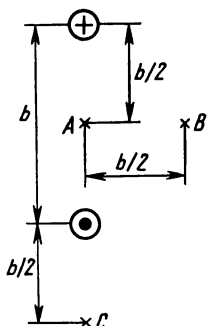


Рис. 3.7

ской поверхности, опирающейся на него (рис. 3.6). Можно ли утверждать, что магнитные потоки через указанные поверхности одинаковые? Если нельзя это утверждать, то какой магнитный поток больше?

**Задача 3.1.** Определить магнитную индукцию в точках  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , расположенных так, как показано на рис. 3.7. Ток в проводах линии  $I = 1000$  А, расстояние между проводами  $b = 40$  см.

**Задача 3.2.** На кольцо из ферромагнитного материала (см. рис. 3.3, б), радиус которого по средней линии  $r = 10$  см и площадь поперечного сечения  $S = 10$  см<sup>2</sup>, равномерно уложено  $N = 300$  витков. Определить магнитное потокоцепление катушки при токе в ней  $I = 30$  А. Найти ток в той же обмотке, если собственное потокоцепление  $\Psi = 18 \cdot 10^{-4}$  Вб.

## § 3.2. ИНДУКТИВНОСТЬ

Прямой проводник или катушка с током являются источниками магнитного поля и характеризуются собственным потокоцеплением.

При изменении тока в катушке изменяется ее собственное потокоцепление, а также взаимное потокоцепление, если магнитная система имеет две катушки, связанные между собой магнитным потоком (см. рис. 3.4).

В обоих случаях потокоцепление определяется не только значением тока, но и зависит от свойств среды, формы и размеров катушек, а во втором случае еще и от их взаимного расположения.

Для выражения этой зависимости введены понятия собственной и взаимной индуктивности.

**Собственная индуктивность.** Эта индуктивность характеризует связь тока с магнитным полем, которое создано этим же током.

*Величина собственной индуктивности равна отношению потокоцепления самоиндукции элемента электрической цепи к току в нем:*

$$L = \Psi / I, \quad (3.9)$$

где  $L$  — индуктивность, Гн (генри).

В практике определяют и учитывают в расчетах индуктивность линий электропередачи и проводной электросвязи, обмоток электрических машин, аппаратов, электромагнитов и т. д.

В электротехнике, радиотехнике, электронике широко применяют устройства, обладающие собственной и взаимной индуктивностью, которую используют в определенных целях.

Элемент электрической цепи, предназначенный для использования его индуктивности, называют *индуктивной катушкой*.

На основе общего определения индуктивности [см. формулу (3.9)] и других уже известных выражений нетрудно получить фор-

мулы для подсчета индуктивности конкретных устройств: формула (3.10) — для цилиндрической или кольцевой катушки, а (3.11) — для отрезка двухпроводной линии:

$$L = \Psi / I = \mu_0 N^2 S / l, \quad (3.10)$$

$$L = \frac{\mu_0 l}{\pi} \ln \frac{a}{r_0}, \quad (3.11)$$

где  $a$  — расстояние между проводами линии;  $r_0$  — радиус поперечного сечения провода.

Формула (3.10) получена в предположении, что магнитное поле катушки равномерно и один и тот же магнитный поток сцеплен со всеми витками катушки. Поэтому ее можно использовать для вычисления индуктивности цилиндрической катушки, у которой длина значительно больше диаметра ( $l \gg D$ ).

Точность результата тем больше, чем больше отношение  $l/D$ . В практике (например, радиотехнической) применяют катушки, для которых это условие часто не выполняется, поэтому для определения индуктивности применяют поправочные коэффициенты к формуле (3.10), расчетные кривые или эмпирические формулы, приводимые в справочниках.

**Взаимная индуктивность.** Магнитная связь двух катушек с токами, расположенных вблизи друг от друга, обусловлена тем, что магнитный поток, вызванный током  $I_1$  первой катушки, сцеплен полностью или частично с витками обеих катушек. Предположим, что магнитного рассеяния нет, т. е. весь магнитный поток  $\Phi_1$  сцеплен с витками обеих катушек (см. рис. 3.4, а). В данном случае имеется собственное потокоцепление первой катушки

$$\Psi_{1.1} = \Phi_1 N_1 = L_1 I_1 \quad (3.12)$$

и взаимное потокоцепление

$$\Psi_{1.2} = \Phi_1 N_2 = M_{1.2} I_1, \quad (3.13)$$

которое, как и собственное, пропорционально току, создающему поток [формула (3.13) записана по аналогии с (3.12)].

Коэффициент пропорциональности  $M_{1.2}$  называют **взаимной индуктивностью**.

Аналогично выражаются собственное и взаимное потокоцепления, если они обусловлены током  $I_2$  второй катушки:

$$\Psi_{2.2} = \Phi_2 N_2 = L_2 I_2, \quad (3.14)$$

$$\Psi_{2.1} = \Phi_2 N_1 = M_{2.1} I_2. \quad (3.15)$$

*Взаимная индуктивность двух индуктивных катушек — величина, равная отношению потокоцепления взаимной индукции*

одной катушки к току в другой катушке, которым обусловлено это потокоосцепление.

На основе выражений (3.12) — (3.15) можно получить равенство  $M_{1,2}M_{2,1}=L_1 L_2$ , а используя принцип взаимности, доказать, что коэффициенты  $M_{1,2}$  и  $M_{2,1}$  одинаковы:  $M_{1,2}=M_{2,1}=M$ . Поэтому при отсутствии магнитного рассеяния, т. е. при полной магнитной связи,  $M=\sqrt{L_1 L_2}$ . В действительности некоторая часть линий магнитной индукции первой катушки не образует магнитной связи со второй катушкой. Этими линиями образуется магнитный поток рассеяния  $\Phi_s$ . В реальных устройствах, где используется магнитная (индуктивная) связь, магнитный поток рассеяния должен быть по возможности уменьшен. Однако потоки рассеяния уменьшить до нуля невозможно, поэтому взаимная индуктивность выражается формулой

$$M=k\sqrt{L_1 L_2}. \quad (3.16)$$

Коэффициент магнитной связи  $k$  практически всегда меньше единицы ( $k < 1$ ), хотя теоретически он может иметь величину от 0 до 1.

#### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Какие формулы из § 3.1 необходимо использовать, чтобы получить выражение (3.10) для определения индуктивности катушки?

2. Для определения собственной индуктивности служат формулы (3.9), (3.10), (3.11). После их анализа можно ли утверждать, что индуктивность не зависит от значений тока и потокоосцепления?

3. Понятия собственной индуктивности и электрической емкости имеют важное значение в электротехнике и радиотехнике. В чем состоит аналогия этих понятий и их основное различие?

4. Если нужно получить катушку без индуктивности, ее наматывают проводом, сложенным вдвое (бифилярная намотка). Почему такая катушка не имеет индуктивности?

5. Две обмотки, уложенные на одном сердечнике, электрически соединены последовательно, а магнитно их можно включить согласно или встречно. При каком варианте включения общая индуктивность системы будет меньше?

**Задача 3.3.** Определить индуктивность кольцевой катушки с числом витков  $N=500$ , намотанных на ферромагнитный сердечник, имеющий прямоугольное поперечное сечение  $S=6\text{ см}^2$ , внешний и внутренний радиусы 11 см и 9 см. При тех же размерах катушки ( $l, S$ ) определить число витков ее обмотки, если индуктивность  $L=1,2\text{ мГн}$ .

**Задача 3.4.** На кольцевой сердечник из ферромагнитного материала, диаметр которого (по средней линии)  $D=20\text{ см}$ , уложены две обмотки с числом витков  $N_1=800$ ,  $N_2=300$ . Определить магнитный поток в сердечнике и индуктивность при токе в обмотках  $I=5\text{ А}$  в двух случаях: а) обмотки включены согласно; б) обмотки включены встречно.

### § 3.3. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ

Интенсивность магнитного поля определяется током, которым это поле обусловлено. Это подтверждается выражением (3.3), из которого видно, что магнитная индукция в вакууме пропорциональна величине тока ( $\mu_0 = \text{const}$ ).

Если магнитное поле создается в веществе, то поле воздействует на вещество, а оно, в свою очередь, определенным образом изменяет магнитное поле.

Большие исследования проблем электромагнетизма, магнитных свойств веществ провел известный русский физик профессор Московского университета А. Г. Столетов (1839—1896). Из его работ в этой области отметим работу по изучению намагничивания железа, свойств и характеристик ферромагнитных материалов.

**Намагничивание.** Вещество, находящееся во внешнем магнитном поле (поле внешних токов), намагничивается и в нем возникает добавочное внутреннее магнитное поле. Оно связано с движущимися заряженными частицами (движение электронов по внутриатомным орбитам, или электронов и ядер атомов вокруг собственных осей). Движение заряженных частиц в данном случае можно рассматривать как элементарные круговые токи.

Магнитные свойства элементарного кругового тока (рис. 3.8) характеризуют магнитным моментом, величина которого выражается произведением элементарного кругового тока и площади описанного им круга  $m = iS$ , а его направление определяют по правилу буравчика.

При отсутствии внешнего магнитного поля элементарные токи внутри вещества ориентированы беспорядочно, поэтому общий (суммарный) магнитный момент даже малых объемов вещества равен нулю и в окружающем пространстве магнитное поле элементарных внутренних токов не обнаруживается.

Влияние внешнего магнитного поля на элементарные токи в веществе состоит в том, что изменяется ориентация осей вращения частиц так, что их магнитные моменты оказываются направленными в одну сторону. Интенсивность и характер намагничивания у различных веществ в одинаковом внешнем магнитном поле значительно отличаются. С этой точки зрения различают диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные вещества.

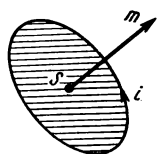


Рис. 3.8

Особенность *диамагнитных* веществ (вода, водород, кварц, серебро, медь и др.) состоит в том, что в них магнитное поле внутренних токов (вторичное) направлено против внешнего поля, поэтому результирующее поле слабее внешнего. В веществах *парамагнитных* (алюминий, кислород, воздух и т. д.) и *ферромагнит-*

ных (железо, кобальт, никель и некоторые их сплавы) магнитные моменты элементарных токов ориентируются в направлении внешнего магнитного поля, т. е. усиливают его. Ферромагнитные вещества имеют особо важное значение в электротехнике, поэтому их магнитные свойства далее рассмотрены подробно.

**Магнитная проницаемость.** Влияние свойств вещества на магнитное поле можно учесть, если в формулы (3.2); (3.3); (3.6), выражающие магнитную индукцию и магнитный поток в вакууме, ввести как множитель безразмерный коэффициент, который называется относительной магнитной проницаемостью:  $\mu_a = \mu_0 \mu_r$ . При таком обозначении на основе выражений (3.3) и (3.6) можно записать формулы магнитной индукции и магнитного потока катушки:

$$B = \frac{\mu_a IN}{l}; \quad (3.17)$$

$$\Phi = \frac{\mu_a INS}{l}. \quad (3.18)$$

Опытами установлено, что величина  $\mu_r$  диамагнитных и парамагнитных веществ очень мало отличается от единицы, поэтому в практических расчетах принимают для них  $\mu_r = 1$ , т. е. используют те же выражения, что и для вакуума. Ферромагнитные вещества имеют величину  $\mu_r \gg 1$ .

Это объясняется тем, что в них имеются области самопроизвольного намагничивания (домены), в пределах которых (объем  $10^{-2} - 10^{-6} \text{ см}^3$ ) элементарные магнитные моменты направлены одинаково. Складываясь, они образуют общие магнитные моменты доменов.

Несмотря на самопроизвольную намагниченность отдельных областей, магнитные свойства ферромагнитных тел в пространстве, окружающем их, не обнаруживаются, так как магнитные моменты доменов ориентированы в различных направлениях. Под действием внешнего магнитного поля магнитные моменты доменов ориентируются в одну сторону и образуют общий магнитный момент тела, направленный в ту же сторону, что и внешнее магнитное поле.

Эту важную особенность используют в практике, применяя ферромагнитные сердечники катушек, что позволяет резко усилить магнитную индукцию и магнитный поток при тех же значениях тока и числа витков или, иначе говоря, сконцентрировать магнитное поле в относительно малом объеме.

**Напряженность магнитного поля.** Особенность ферромагнитных веществ состоит также и в том, что их магнитная проницаемость — величина не постоянная, а изменяется в зависимости от

величины магнитной индукции. Это означает, что во многих случаях расчетов величина магнитной проницаемости сердечника заранее не известна и поэтому приведенные расчетные формулы [например, (3.17), (3.18)] для определения магнитной индукции или потока использовать нельзя.

Решение таких задач становится возможным, если в качестве характеристики магнитного поля наряду с магнитной индукцией ввести другую величину, не зависящую от свойств среды (материала сердечника), а определяемую только величиной тока в катушке и ее размерами (величины  $I$ ,  $S$ ,  $N$ ).

Для примера возьмем кольцевую катушку и в (3.17) разделим обе части равенства на  $\mu_a$ :  $B/\mu_a = IN/l$ . Величину в левой части равенства называют *напряженностью магнитного поля*

$$H = B/\mu_a. \quad (3.19)$$

Из этой формулы видно, что напряженность магнитного поля связана с магнитной индукцией и поэтому является характеристикой магнитного поля. Но ее можно определить, учитывая только конструктивные характеристики катушки ( $N$ ,  $l$ ) и значение тока в ее обмотке

$$H = IN/l, \quad (3.20)$$

где  $H$  — напряженность магнитного поля, А/м (ампер/метр).

У ферромагнитных веществ зависимость  $B = f(H)$  нелинейная, магнитная проницаемость непостоянна, а изменяется с изменением магнитной индукции ( $\mu_a \neq \text{const}$ ), поэтому по формуле (3.19) нельзя определить величину магнитной индукции  $B$  по известному значению напряженности магнитного поля  $H$  (или, наоборот, величину  $H$  по известному значению  $B$ ).

Решение такой задачи выполняют по кривой намагничивания  $B = f(H)$  материала сердечника (см. рис. 3.11 или табл. 3 приложения 2).

Вместе с тем формула (3.19) дает возможность определить величину абсолютной магнитной проницаемости  $\mu_a$  при заданном состоянии намагниченности сердечника, т. е. при известных величинах  $B$  и  $H$ .

*Абсолютная магнитная проницаемость — величина, характеризующая магнитные свойства вещества, равная отношению модуля магнитной индукции к модулю напряженности магнитного поля.*

Из формулы (3.20) следует равенство (3.21), которое соответствует закону полного тока (подробнее см. § 3.4):

$$IN = Hl. \quad (3.21)$$

**Ферромагнитные материалы и их свойства.** Способность намагничиваться и усиливать внешнее магнитное поле — это важное, но не единственное свойство ферромагнитных веществ. Для практики большое значение имеют и другие свойства, выявляемые в процессе намагничивания.

На рис. 3.9 показана схема установки для намагничивания ферромагнитного сердечника катушки. С увеличением тока в катушке пропорционально увеличивается напряженность магнитного поля [см. формулу (3.20)].

Если для ряда величин напряженности измерить соответствующие им величины магнитной индукции, то можно построить характеристику первоначального намагничивания  $B = f(H)$ , которая показана на рис. 3.10 (участок 0—1).

На участке  $0-1$  с увеличением напряженности  $H$  увеличивается магнитная индукция  $B$ . Это объясняется тем, что магнитные моменты доменов, ранее ориентированные произвольно, принимают направление внешнего магнитного поля. Затем прирост магнитной индукции за счет внутреннего магнитного поля уменьшается, а далее полностью прекращается, т. е. наступает состояние магнитного насыщения (после точки  $1$ ) при магнитной индукции  $B_s$ .

При уменьшении напряженности внешнего магнитного поля (при уменьшении тока в катушке) магнитная индукция уменьшается по кривой 1—2—3, которая не совпадает с кривой первоначального намагничивания, и при  $H=0$   $B=B_c$ .

Размагничивание сердечника как бы запаздывает по сравнению с уменьшением напряженности поля. Это явление называют магнитным гистерезисом, а величину  $B_r$  — остаточной магнитной индукцией.

Для того чтобы полностью размагнитить сердечник, надо изменить направление тока в катушке и, увеличивая его, довести напряженность поля до величины  $H_c$ , которую называют коэрцитивной (задерживающей) силой.

Изменяя ток в катушке по величине и направлению, можно по-

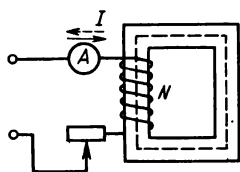


Рис. 3.9

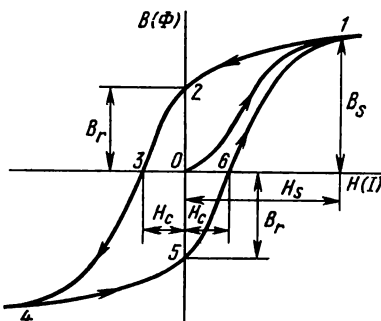


Рис. 3.10



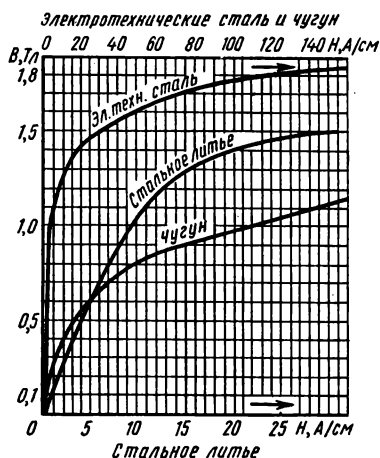


Рис. 3.11

материалы нагреваются, что свидетельствует о затрате энергии на перемагничивание.

Величина этих потерь энергии тем больше, чем больше площадь, ограниченная петлей магнитного гистерезиса.

В зависимости от химического состава ферромагнитных веществ отмеченные свойства проявляются в разной степени. В связи с этим различают две основные группы ферромагнитных материалов: магнитномягкие и магнитнотвердые.

**Магнитномягкие материалы** характеризуются большими величинами начальной и максимальной магнитной проницаемости и малыми величинами коэрцитивной силы ( $H_c \leq 400$  А/м), легко намагничиваются и размагничиваются, имеют узкую гистерезисную петлю (рис. 3.12, а, б) и поэтому отличаются малыми потерями энергии от гистерезиса.

Основные металлические магнитномягкие ма-

лучить данные для построения замкнутой кривой  $B = f(H)$ , которую называют петлей магнитного гистерезиса.

При технических расчетах используют основную кривую намагничивания данного материала, близкую к кривой первоначального намагничивания, но не совпадающую с ней. На рис. 3.11 изображены основные характеристики намагничивания некоторых ферромагнитных материалов. При циклическом перемагничивании с определенной частотой ферромагнитные ма-

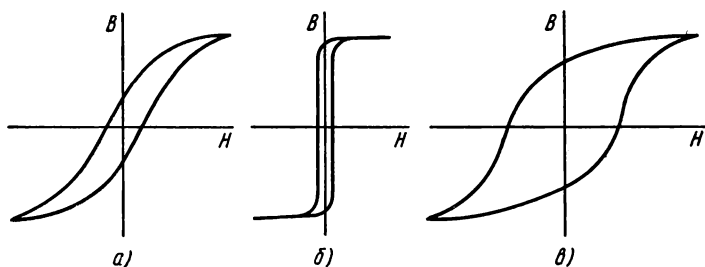


Рис. 3.12

материалы — низкоуглеродистые стали, чугун, которые применяются для магнитопроводов, работающих в постоянных магнитных полях; листовые электротехнические стали с повышенным содержанием кремния (до 4 %), которые идут для изготовления магнитопроводов устройств переменного тока (трансформаторов, электрических машин и аппаратов).

Железникичелевые сплавы — пермаллои, имеют высокую магнитную проницаемость, малую коэрцитивную силу (рис. 3.12, б), повышенное удельное сопротивление, малые потери от гистерезиса и вихревых токов и поэтому применяются в магнитных усилителях, в высокочастотных узлах радиоэлектронной аппаратуры.

Сплавы на основе железа и алюминия — альсиферы используются при изготовлении сердечников, предназначенных для работы в диапазоне частот до 50 000 кГц.

Присадка кремния в магнитномягких материалах увеличивает магнитную проницаемость, уменьшает коэрцитивную силу, увеличивает удельное сопротивление, чем уменьшает потери от вихревых токов (см. § 3.6); соединения окислов металлов — ферриты — изготовляют из порошкообразной смеси окиси железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) с окислами других металлов ( $\text{ZnO}$ ,  $\text{MnO}$  и т. д.) путем прессования и спекания при высоких температурах.

Магнитодиэлектрики — материалы, состоящие из смеси магнитномягкого материала (карбонильное железо, пермаллои, альсиферы) с каким-либо органическим или неорганическим диэлектриком (эпоксидная или бакелитовая смола, полистирол, жидкое стекло и др.).

Ферриты и магнитодиэлектрики имеют большие удельные сопротивления, малые потери от вихревых токов, что дает возможность применять их при высоких частотах. Эти материалы широко применяют для изготовления сердечников трансформаторов, аппаратуры проводной и радиосвязи, в вычислительных устройствах, автоматике. Некоторые ферриты имеют прямоугольную петлю магнитного гистерезиса, поэтому сердечники из таких материалов могут намагничиваться до насыщения при импульсе тока в обмотке и длительно оставаться намагниченными. Эти свойства позволяют применять их в запоминающих устройствах вычислительной техники.

Магнитотвердые материалы намагничиваются с трудом, но намагниченные надолго сохраняют намагниченность. Они имеют относительно большие величины остаточной магнитной индукции (0,2—2,25 Тл) и коэрцитивной силы (20 000—60 000 А/м), широкую петлю магнитного гистерезиса (рис. 3.12, в), поэтому их применяют для изготовления постоянных магнитов.

К магнитотвердым материалам относятся мартенситные

высокоуглеродистые, а также легированные стали (легирующие компоненты — хром, вольфрам, кобальт, молибден).

Более высокие магнитные характеристики имеют магнитно-твердые сплавы на основе железа, алюминия, никеля, легированных кобальтом, медью, титаном, ниобием. Магниты очень малых размеров или сложной формы изготавливают из металлокерамических материалов (прессование порошков и спекание при высокой температуре).

#### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Замкнутый сердечник катушки изготовлен из неферромагнитного материала, известна напряженность магнитного поля. Как найти магнитную индукцию в сердечнике?

2. Замкнутый сердечник катушки изготовлен из ферромагнитного вещества, известна магнитная индукция в сердечнике. Как найти напряженность магнитного поля?

3. Характеристика намагничивания  $B = f(H)$  ферромагнитного материала, из которого изготовлен сердечник катушки (см. рис. 3.3, б), известна. Какие величины необходимо знать еще, чтобы построить кривую намагничивания сердечника катушки  $\Phi = f(I)$ ?

4. Характеристики  $B = f(H)$  и  $\Phi = f(I)$  по предыдущему вопросу предполагается построить на одном чертеже так, что ось ординат — общая для  $B$  и  $\Phi$ , а ось абсцисс — общая для  $H$  и  $I$ . Можно ли масштабы величин подобрать так, чтобы вторая кривая во всех точках чертежа совпала с первой?

5. Свойства ферромагнитных материалов, выявляемые в процессе намагничивания, связаны с изменением ориентации магнитных моментов доменов. Как объяснить с этой точки зрения явления: магнитное насыщение, магнитный гистерезис, остаточную намагниченность?

**Задача 3.5.** На замкнутый сердечник, длина которого  $l = 30$  см и поперечное сечение  $S = 5$  см<sup>2</sup>, намотана обмотка  $N = 500$  вит. Определить индуктивность катушки и магнитный поток в сердечнике при токе в обмотке  $I = 3$  А, если сердечник изготовлен: а) из электротехнической стали; б) из неферромагнитного материала. Найти абсолютную магнитную проницаемость электротехнической стали при найденных величинах  $B$  и  $H$ .

**Задача 3.6.** Кольцевая катушка (см. рис. 3.3, б)  $N = 600$  вит имеет сердечник, радиус которого  $r = 5$  см и площадь поперечного сечения  $S = 6$  см<sup>2</sup>. Магнитный поток в сердечнике  $\Phi = 36 \cdot 10^{-6}$  Вб. Определить ток и индуктивность катушки в двух случаях: а) сердечник неферромагнитный; б) сердечник из электротехнической стали.

### **§ 3.4. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ**

Магнитные цепи служат для формирования рабочего магнитного потока в электрических машинах, трансформаторах, электроизмерительных приборах и других электромагнитных устройствах.

Часть электромагнитного устройства, содержащую ферромагнитные тела, в которой при наличии намагничивающей силы

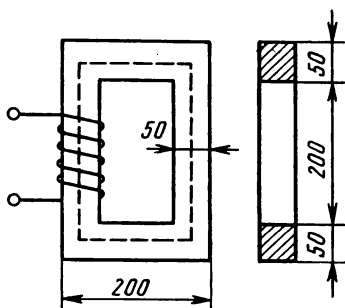


Рис. 3.13

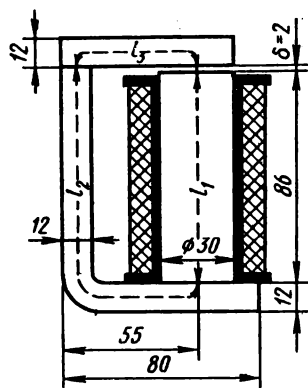


Рис. 3.14

возникает и вдоль которой замыкается магнитный поток, называют магнитной цепью.

Намагничивающую силу создают обмотки с электрическим током или постоянные магниты. Часть магнитной цепи, по которой замыкается магнитный поток, изготовляют в основном из ферромагнитных материалов и называют магнитопроводом.

Магнитные цепи выполняют неразветвленными (рис. 3.13, 3.14) и разветвленными (рис. 3.15). Различают также магнитные цепи однородные и неоднородные. Магнитопровод однородной цепи на всем его протяжении выполнен из одного материала и имеет одинаковое по форме и размерам поперечное сечение (рис. 3.13); в неоднородной цепи магнитопровод состоит из нескольких участков, отличающихся в общем случае по длине, поперечному сечению, материалам (рис. 3.14).

**Неразветвленные магнитные цепи.** При расчете и конструировании магнитных цепей выбирают их формы, размеры, материалы, расположение источников намагничивающей силы (обмоток с токами, постоянных магнитов). Полагая, что конструкция магнитной цепи известна, рассмотрим прямую и обрат-

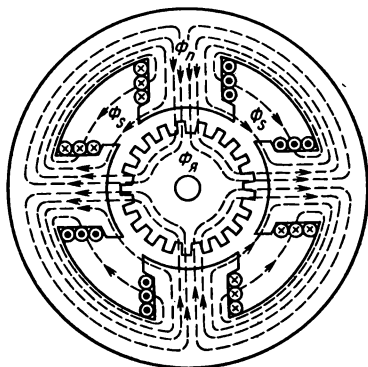


Рис. 3.15

ную задачи расчета сначала в простейшем случае для однородной цепи (см. рис. 3.13) без учета потоков рассеяния.

В прямой задаче задан магнитный поток  $\Phi$ , требуется определить намагничивающую силу, необходимую для создания этого потока.

Задачу решают следующим образом: 1) магнитная индукция  $B = \Phi/S$ ; 2) напряженность магнитного поля  $H$  в сердечнике определяют по кривой намагничивания  $B = f(H)$  материала сердечника (см. рис. 3.11 и табл. П. 3); 3) намагничивающая сила  $IN = Hl$ , где  $l$  — длина магнитопровода по средней линии без учета закруглений.

Обратную задачу, в которой по заданной намагничивающей силе определяют магнитный поток, решают в обратной последовательности: 1) напряженность магнитного поля  $H = IN/l$ ; 2) магнитная индукция — по кривой намагничивания; 3) магнитный поток  $\Phi = BS$ .

Для конкретных величин  $B$  и  $H$ , найденных при решении задачи, можно подсчитать статическую магнитную проницаемость данного материала сердечника по формуле (3.19)  $\mu_a = B/H$ . Тогда магнитная индукция  $B = \mu_a IN/l$ , а магнитный поток  $\Phi = \mu_a INS/l = IN/(l/\mu_a S)$ . Обозначив знаменатель этого выражения  $l/\mu_a S = R_m$ , получим для магнитного потока

$$\Phi = IN/R_m = F/R_m, \quad (3.22)$$

где  $F = IN$  — намагничивающая сила.

Формула (3.22) похожа на выражение закона Ома для электрической цепи (2.7).

По аналогии с э.д.с.  $E$  в электрической цепи намагничивающую силу  $F$  в магнитной цепи называют **магнитодвижущей силой** м.д.с., а  $R_m$  — магнитным сопротивлением.

Расчет магнитных цепей обычно проводят без определения магнитного сопротивления  $R_m$ . Это понятие используют в некоторых случаях при качественном рассмотрении явлений в магнитных цепях. Согласно формуле (3.21), намагничивающая сила для однородной магнитной цепи численно равна произведению напряженности магнитного поля и длины магнитопровода  $Hl$ . Эту величину называют **магнитным напряжением** и обозначают  $U_m$  ( $U_m = Hl$ ).

Отмеченная ранее аналогия между магнитными и электрическими цепями распространяется и на цепи с неоднородными магнитопроводами. Доказано, что для магнитной цепи можно составить уравнение по закону полного тока, по форме аналогичное контурному уравнению, составленному для электрической цепи согласно второму закону Кирхгофа.

В левую часть такого уравнения записывают алгебраическую

сумму намагничивающих сил, встречающихся при обходе данного магнитного контура (намагничивающую силу считают положительной, если ее направление совпадает с направлением обхода); в правую часть уравнения записывают алгебраическую сумму магнитных напряжений участков магнитопровода ( $H_n l_n = U_{mn}$ ), называют магнитным напряжением данного участка магнитной цепи, по аналогии с напряжением на участке электрической цепи, и считают его положительным, если направление магнитного потока на этом участке совпадает с направлением обхода

$$\sum_1^k F_k = \sum_1^n H_n l_n = \sum_1^n U_{mn}. \quad (3.23)$$

Это уравнение применяют для решения прямой задачи расчета неоднородной магнитной цепи. Неразветвленную цепь в этом случае делят на однородные участки и для каждого из них определяют магнитную индукцию  $B_n$ , а затем находят значения напряженности магнитного поля  $H_n$  и магнитного напряжения  $U_{mn}$ . По уравнению (3.23) определяют намагничивающую силу  $F$ , необходимую для получения заданного магнитного потока.

Обратную задачу — определение магнитного потока по заданным намагничивающим силам — нельзя решить так же просто, как для однородной цепи, так как неизвестно распределение магнитных напряжений между участками. Для решения обратной задачи применяют графоаналитические методы, которые здесь не рассматриваются.

**Разветвленные магнитные цепи.** В разветвленной магнитной цепи, по аналогии с электрической цепью, можно выделить контуры, ветви и отметить узлы. Магнитные потоки в общем случае различны в различных ветвях (рис. 3.15).

Для разветвленных магнитных цепей можно составить узловые уравнения ( $\sum \Phi = 0$ ) и контурные уравнения ( $\sum F = \sum Hl$ ). Алгебраическое решение системы узловых и контурных уравнений магнитной цепи обычными способами невозможно, так как эта система нелинейная. Поэтому в практике применяют графические и графоаналитические методы расчета разветвленных магнитных цепей.

Однако симметричную разветвленную магнитную цепь (рис. 3.15) условно можно разделить на контуры так, что во всех участках выделенного контура магнитный поток будет один и тот же. Кроме того, предполагается симметричное расположение обмоток с токами. Расчет симметричной магнитной цепи можно свести к расчету одного контура в том порядке, в котором рассматривают неразветвленные цепи.

### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Почему сердечники силовых трансформаторов, в том числе применяемых в бытовых электротехнических и радиотехнических устройствах, изготавливают из стали? Можно ли для этой цели применять алюминий?

2. Замкнутый сердечник катушки изготовлен из ферромагнитного вещества, известна напряженность магнитного поля в сердечнике. Как найти магнитную индукцию?

3. При изготовлении сердечника трансформатора из электротехнической стали в местах соединения его участков (между стержнем и ярмом) остается некоторый воздушный зазор. Почему этот зазор стремятся по возможности уменьшить?

4. Уравнение (3.23) является выражением закона полного тока, который при расчете магнитных цепей применяют к магнитным контурам. Какому уравнению для электрической цепи аналогично уравнение (3.23)?

5. Можно ли для определения магнитного потока в неразветвленной неоднородной магнитной цепи по заданной намагничивающей силе (обратная задача) применить формулу (3.22)? Объясните ваш ответ.

**Задача 3.7.** В сердечнике из листовой электротехнической стали марки 1311, размеры которого в миллиметрах показаны на рис. 3.13, требуется получить магнитный поток  $\Phi = 3,2 \cdot 10^{-3}$ . Определить ток в обмотке, имеющей  $N = 200$  витков.

**Задача 3.8.** Определить ток в обмотке по условию задачи 3.7, если в сердечнике выпилить воздушный зазор  $\delta = 2$  мм.

### **§ 3.5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИЛЫ. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

В технике широко применяют устройства, в основе работы которых лежит силовое действие магнитного поля (электродвигатели, реле и контакторы, тяговые и подъемные электромагниты, электроизмерительные приборы и др.). Электромагнитные силы приходится учитывать при расчете электрических аппаратов, проектировании распределительных устройств электрических станций и сетей и т. д.

**Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле.** Большой практический интерес представляет выражение электромагнитной силы, действующей на проводник с током  $I$  в равномерном магнитном поле с магнитной индукцией  $B$  (рис. 3.16). Прямолинейный отрезок провода расположен в пространстве между полюсами постоянного магнита или электромагнита (катушки со стальным сердечником) так, что между направлениями магнитной индукции и тока угол  $\alpha = 90^\circ$ .

В равномерном магнитном поле на одинаковые элементы длины провода действует одинаковая по величине и направлению электромагнитная сила  $\Delta F_m = B I \Delta l$ , что следует из формул (3.1)

и (3.2). Сложим элементарные силы по длине  $l$  той части провода, которая находится в магнитном поле, получим выражение электромагнитной силы

$$F_m = BIl. \quad (3.24)$$

При других значениях угла  $\alpha$  электромагнитную силу определяют по формуле

$$F_m = BIl \sin \alpha, \quad (3.25)$$

где  $l \sin \alpha$  — проекция отрезка  $l$  на направление, перпендикулярное направлению магнитной индукции.

Направление электромагнитной силы всегда перпендикулярно плоскости, в которой лежат провод и линии магнитной индукции, но его удобно определить по правилу левой руки: если левую руку расположить так, чтобы линии магнитной индукции «входили» в ладонь, а вытянутые четыре пальца показывали направление тока в проводе, то отогнутый в плоскости ладони большой палец покажет направление электромагнитной силы.

Рассмотрим проводящий контур прямоугольной формы, расположенный в равномерном магнитном поле, как показано на рис. 3.17.

При наличии тока  $I$  в контуре на его стороны  $ab$  и  $bc$  действуют электромагнитные силы  $F_m$ , которые образуют вращающий момент. Предположим, что ось вращения проходит через середину контура и он поворачивается из положения  $I$  в положение  $II$ . Некоторое промежуточное положение контура характеризуется углом  $\beta$ , отсчитанным от вертикальной плоскости (в положении  $I$  угол  $\beta = 0$ ).

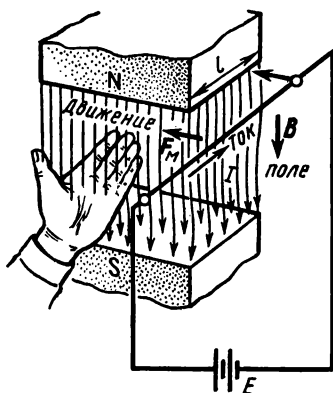


Рис. 3.16

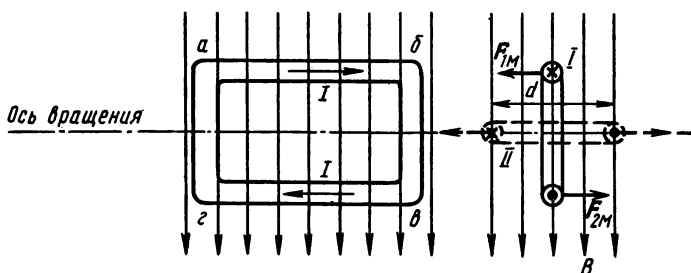


Рис. 3.17



Магнитный поток, сцепляющийся с контуром в процессе его поворота, изменяется по такому же закону, по какому изменяется проекция площади контура на плоскость, перпендикулярную линиям магнитной индукции (горизонтальная плоскость):  $S = ld \sin \beta$ ;  $\Phi = BS = Bld \sin \beta$ . Обозначив наибольшую величину магнитного потока  $Bld = \Phi_m$  (положение II,  $\beta = 90^\circ$ ), получим  $\Phi = \Phi_m \sin \beta$ .

В процессе поворота контура при постоянном токе  $I$  силы  $F_m$  сохраняют свое направление и величину. Одновременно с изменением магнитного потока, сцепляющегося с контуром, изменяется работа электромагнитных сил:  $\Delta A = 2Bil \frac{d}{2} \sin \beta = I \Phi_m \sin \beta$ . В начальном положении контура магнитный поток, сцепленный с ним, равен нулю, поэтому величина магнитного потока в промежуточном положении контура является изменением потока, т. е.  $\Phi_m \sin \beta = \Delta \Phi$ , а  $\Delta A = I \Delta \Phi$ .

Если проводящий контур содержит не один, а  $N$  витков, тогда работа электромагнитных сил увеличивается в  $N$  раз, т. е.  $\Delta A = I N \Delta \Phi$ . Учитывая, что  $N \Delta \Phi = \Delta \Psi$ , получим формулу

$$\Delta A = I \Delta \Psi. \quad (3.26)$$

Рассмотренные примеры являются иллюстрацией важных для практики свойств электромагнитных систем:

1. Изменение работы электромагнитных сил или энергии в электромагнитной системе выражается произведением тока и изменения магнитного потокосцепления.

2. Всякий проводящий контур с током в магнитном поле под действием электромагнитных сил стремится занять такое положение, при котором магнитный поток, сцепленный с контуром, будет наибольшим положительным. (При этом положительным считают магнитный поток, совпадающий по направлению внутри контура с потоком, созданным током этого контура.)

**Тяговое усилие электромагнита.** Приведенные положения подтверждаются также действием тяговых электромагнитов. Конструкции тяговых электромагнитов (рис. 3.18) разнообразны и определяются их назначением. Но все они имеют намагничивающую обмотку 3, стальной магнитопровод, состоящий из двух частей — неподвижной 1 и подвижной 2. Подвижная часть магнитопровода (якорь) намагничивается в магнитном поле обмотки с током и притягивается к неподвижной части с силой

$$F_m = B^2 S / 2\mu_0, \quad (3.27)$$

где  $B$  — магнитная индукция,  $S$  — площадь сечения полюса.

Магнитный поток при этом достигает наибольшего значения для данной электромагнитной системы, так как воздушный зазор

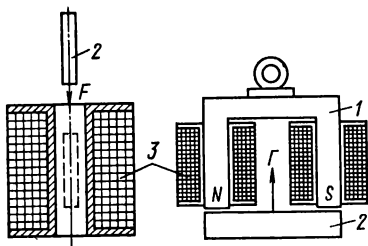


Рис. 3.18

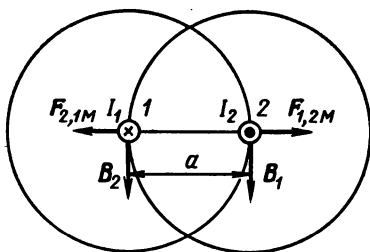


Рис. 3.19

между сердечником и якорем сокращается, а магнитное сопротивление становится наименьшим.

Аналогично действуют электромагниты с подвижным сердечником внутри катушки с током (см., например, конструкцию электромагнитного измерительного механизма рис. 6.8).

**Силы, действующие на параллельные провода с токами.** Параллельное расположение проводов с токами на практике встречается часто: например, при установлении шин распределительных устройств электрических станций и подстанций.

Для того чтобы правильно выбрать шины и изоляторы, на которых они закреплены, приходится определять электромагнитные силы, действующие на шины.

В подобном случае (рис. 3.19) провод 2 с током  $I_2$  находится в магнитном поле тока  $I_1$ . Магнитная индукция в месте расположения провода 2  $B_1 = \mu_0 I_1 / 2\pi a$ , где  $a$  — расстояние между осями проводов. Между направлениями магнитной индукции  $B_1$  и током  $I_2$  угол  $90^\circ$ , поэтому согласно формуле (3.24)

$$F_{м1,2} = B_1 I_2 l_2 = \mu_0 I_1 I_2 l_2 / 2\pi a.$$

Аналогично можно выразить силу  $F_{м2,1}$ , действующую на провод 1 в магнитном поле провода с током  $I_2$ .

Общее выражение для силы, действующей на равные по длине участки двух проводов,

$$F_m = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a}. \quad (3.28)$$

**Свободная заряженная частица в магнитном поле.** Действие магнитного поля на заряженные частицы, движущиеся вне проводника, например в вакууме, широко используется в технике. Примерами могут служить фокусировка или смещение электронного пучка (луча) в электроннолучевых трубках телевизоров, осциллографов, электронных микроскопов, ускорение заряженных частиц для исследования ядерных процессов и т. д.

Для определения силы, действующей на частицу с зарядом  $Q$ , движущуюся в равномерном магнитном поле перпендикулярно направлению магнитной индукции, можно использовать формулу (3.24). Подставим в нее выражение (2.1) и обозначим скорость движения частицы  $l/t = v$ , получим  $F_m = BQv$ .

В данном случае сила  $F_m$  согласно правилу левой руки направлена перпендикулярно направлениям магнитной индукции и скорости частицы. Из механики известно, что под действием постоянной по значению силы, направленной перпендикулярно направлению скорости, тело движется по окружности радиуса  $\rho = mv^2/F_m = mv/QB$ .

Если все величины правой части полученного уравнения постоянны, то заряженная частица движется по окружности радиуса  $\rho$  в плоскости, перпендикулярной направлению линий магнитной индукции.

Угловая скорость движения  $\omega_0 = v/\rho = QB/m$ .

**Энергия магнитного поля.** При возникновении электрического тока в проводящем контуре одна часть энергии источника питания расходуется на преодоление электрического сопротивления контура и превращается в теплоту, другая запасается в виде энергии магнитного поля. С увеличением тока растет энергия магнитного поля. Она может быть возвращена источнику или преобразована в другой вид энергии при уменьшении тока.

Для определения энергии магнитного поля воспользуемся формулой (3.26), принимая во внимание, что в процессе установления тока в контуре значение его изменится от 0 до  $I$  и вместе с тем изменяется потокосцепление [см. формулу (3.12)]. Следовательно, в формуле (3.26) оба множителя переменные, поэтому она дает основание определить только приращение энергии  $\Delta W_m$  за некоторый весьма малый промежуток времени, в течение которого ток в контуре изменяется на  $\Delta i$ , а потокосцепление — на  $\Delta \Psi$ . Если индуктивность контура постоянна, то зависимость между потокосцеплением и током изображается прямой линией (рис. 3.20). Изменение энергии при изменении тока на  $\Delta i$  выражается площадью трапеции (на рисунке заштрихована):  $\Delta W_m = i\Delta\Psi + \Delta i\Delta\Psi/2 \approx i\Delta\Psi$ . Энергию при токе  $I$  и потокосцеплении  $\Psi$  выражает сумма таких площадок, т. е. площадь  $S = \Psi I/2$  прямоугольного треугольника с катетами  $\Psi$ ,  $I$ . Учитывая еще и формулу (3.12), получим три выражения для энергии магнитного поля:

$$W_m = \Psi I/2 = LI^2/2 = \Psi^2/2L. \quad (3.29)$$

*Контрольные вопросы и задачи*

1. Заряженная частица помещена в равномерное магнитное поле. При каком условии она начнет движение под действием электромагнитной силы?

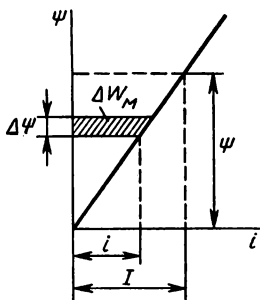


Рис. 3.20

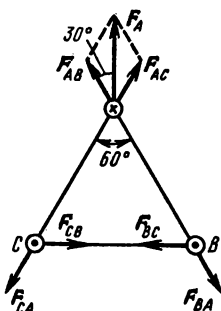


Рис. 3.21

2. Провод с током расположен в магнитном поле так, что направления тока и линий магнитной индукции а) противоположны, б) совпадают. Какова величина электромагнитной силы, действующей на провод, в обоих случаях?

3. Два провода воздушной линии расположены параллельно при некотором расстоянии между ними. Какое направление имеют токи в проводах линии, если они под действием электромагнитных сил а) притягиваются, б) отталкиваются?

4. Анализ рис. 3.17 показывает, что положение  $II$  контура устойчиво, так как момент пары электромагнитных сил равен нулю. При отклонении контура от этого положения в ту или другую сторону возникает момент, направленный против отклонения. Что можно предпринять, чтобы контур вращался непрерывно в одну сторону?

5. Как изменится направление электромагнитной силы, действующей на проводник в магнитном поле, если: а) изменить направление тока в проводнике, б) изменить направление магнитного поля на противоположное, в) изменить одновременно направления тока и магнитной индукции.

**Задача 3.9.** В равномерном магнитном поле с индукцией  $B = 1,2$  Тл находится прямолинейный проводник длиной  $l = 80$  см с током  $I = 20$  А. Определить силу, действующую на проводник в различных случаях его расположения по отношению к магнитному полю: между направлением тока и магнитной индукции угол  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\alpha = 60^\circ$ ;  $\alpha = 90^\circ$ .

**Задача 3.10.** В проводах воздушной линии, расположенных на одинаковом расстоянии  $l = 10$  см друг от друга (рис. 3.21), токи  $I_B = I_C = 6000$  А направлены в одну сторону, а ток  $I_A = 12\,000$  А противоположно. Определить силу, действующую на 1 м каждого провода.

### § 3.6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Явление электромагнитной индукции состоит в том, что в проводящем контуре возбуждается электродвижущая сила, если магнитный поток, сцепляющийся с этим контуром, изменяется.

На основе этого физического явления создаются и работают устройства для взаимного преобразования механической и электрической энергии (электрические генераторы и двигатели), переда-

чи и распределения электрической энергии (трансформаторы, реакторы), передачи и приема информации (радиопередатчики, радиоприемники) и многие другие. Явление и закон электромагнитной индукции необходимо знать также для изучения электрических цепей переменного тока.

Явление электромагнитной индукции открыл в 1831 г. английский физик М. Фарадей. В изучение и практическое использование этого явления существенный вклад внесли русские ученые Э. Х. Ленц, Б. С. Якоби (см. П. 1).

**Закон электромагнитной индукции.** Электродвижущая сила, возбуждаемая в проводящем контуре при изменении сцепленного с ним магнитного потока (индуктированная э.д.с.), количественно определяется по закону электромагнитной индукции.

**Электродвижущая сила, индуктируемая в проводящем контуре, равна скорости изменения магнитного потока, сцепляющегося с этим контуром**

$$e = -d\Phi/dt. \quad (3.30)$$

В катушке, имеющей  $N$  витков (контуров), э.д.с. в  $N$  раз больше, если все витки ее сцеплены с одинаковым потоком  $e = Nd\Phi/dt$ , где  $d\Phi/dt$  — скорость изменения магнитного потока. В общем случае витки катушки могут быть сцеплены с разными потоками, тогда общая э.д.с. определяется алгебраической суммой э.д.с. отдельных витков или скоростью изменения общего потокосцепления катушки

$$e = -d\Psi/dt. \quad (3.31)$$

Знак «минус» в формулах, выражающих э.д.с. электромагнитной индукции, соответствует правилу Ленца: **э.д.с., возбуждаемая при изменении магнитного потокосцепления, направлена всегда так, что своим действием препятствует этому изменению.**

**Э.д.с. самоиндукции и взаимной индукции.** При изменении потокосцепления самоиндукции или взаимной индукции также возбуждается э.д.с. Изменение собственного потокосцепления контура (или катушки) обычно является следствием изменения тока в этом же контуре (или катушке).

Индуктированная в данном случае электродвижущая сила называется э.д.с. самоиндукции. Учитывая (3.31) и (3.9), получим

$$e_L = -d\Psi_{1,1}/dt = -Ldi/dt. \quad (3.32)$$

Потокосцепление взаимной индукции изменяется при изменении тока или коэффициента связи.

Выражения э.д.с. взаимной индукции следуют из формул (3.31) и (3.15)

$$e_{m1} = -d\Psi_{2,1}/dt = -Mdi_2/dt, \quad (3.33)$$

$$e_{m2} = d\Psi_{1,2}/dt = -Mdi_1/dt. \quad (3.34)$$

Э.д.с. самоиндукции и взаимной индукции пропорциональны скорости изменения тока  $di/dt$ . Коэффициентом пропорциональности является индуктивность собственная [см. формулу (3.32)] или взаимная [см. формулы (3.33) и (3.34)]. В правой части этих формул, как и в формулах (3.30), (3.31), поставлен знак «минус», что указывает на соответствие направления э.д.с. правилу Ленца: э.д.с. самоиндукции или взаимной индукции противодействует изменению тока, т. е. замедляет увеличение или уменьшение тока, причем это противодействие тем сильнее, чем быстрее изменяется ток.

**Вихревые токи.** Примерами использования явления электромагнитной индукции является работа трансформатора (см. гл. 7), а также возникновение и использование вихревых токов.

Рассмотрим металлический сердечник внутри катушки с переменным током (рис. 3.22, *а, б*). В сердечнике можно мысленно выделить ряд замкнутых слоев, ось которых совпадает с осью сердечника. Каждый такой слой представляет собой замкнутый виток, в котором переменным магнитным потоком индуцируется э.д.с. и возникает ток, замыкающийся в плоскости, перпендикулярной оси магнитного потока. Рассматривая совокупность таких замкнутых контуров, можно представить себе в теле сердечника токи, замыкающиеся вокруг оси магнитного потока (вихревые токи).

Направление вихревых токов определяется правилом Ленца. В соответствии с законом Джоуля — Ленца, вследствие вихревых токов выделяется теплота в сердечнике. Это явление используется на практике для нагревания металлов (плавление стали, закалка и др.).

В магнитопроводах электрических машин, трансформаторов и электрических аппаратов тоже возникают вихревые токи. Но здесь они нежелательны, так как увеличивают общие потери энергии в устройствах и вызывают дополнительный их нагрев.

**Э.д.с. в проводнике, движущемся в магнитном поле.** В проводнике, движущемся под действием механической силы в магнитном поле так, что он пересекает линии магнитной индукции (рис. 3.23, *а, б*), возникает электродвижущая сила. Свободные электроны проводника *АБ* движутся вместе с ним со скоростью  $v$ . Электромагнитная сила действует на каждый электрон (силы Лоренца) и, согласно правилу левой руки, направлена вдоль проводника, а по величине определяется выражением (3.24), которое в применении к заряду электрона принимает вид  $F_{\text{л}} = Be_0v$ . Под действием этой силы электроны перемещаются к одному концу проводника, где создают избыточный отрицательный заряд, а на другом конце образуется такой же по величине положительный заряд. Разделение заря-

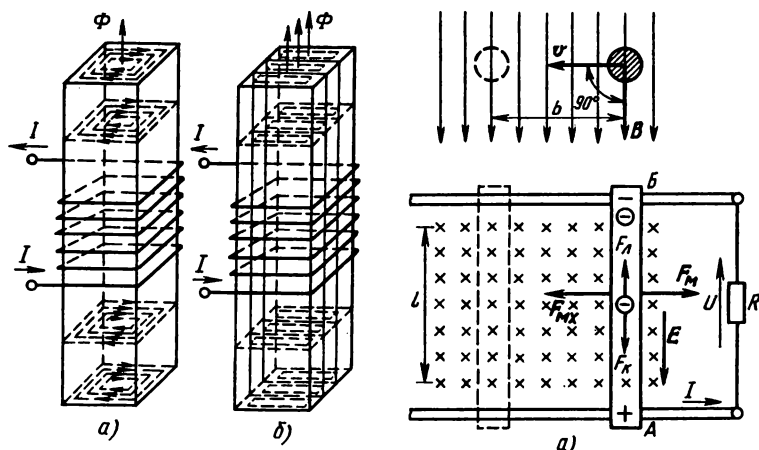


Рис. 3.22

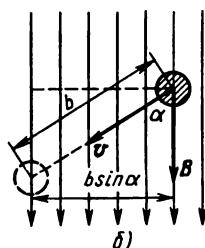


Рис. 3.23

дов приводит к возникновению электрического поля в проводнике и сил притяжения заряженных частиц  $F_K$  (силы Кулона), направленных против сил Лоренца.

Если проводник движется с постоянной скоростью, то величина сил Лоренца остается неизменной, а силы Кулона растут по мере накопления зарядов. Разделение зарядов прекращается при равенстве электромагнитных и электрических сил. Равенство сил означает наличие между концами проводника  $AB$  установившейся разности потенциалов  $V_A - V_B$ .

Предположим, что шины, по которым катится проводник  $AB$ , металлические и соединены между собой резистором  $R$ . Эти элементы вместе образуют замкнутый проводящий контур, в котором под действием разности потенциалов  $V_A - V_B$  появится электрический ток. При наличии тока заряды на концах проводника  $AB$  нейтрализуются, однако если движение его продолжается, то одновременно происходит разделение зарядов, т. е. установится непрерывный процесс, в результате которого в контуре поддерживаются постоянная электродвижущая сила  $E = V_A - V_B$  и постоянный электрический ток  $I$ .

Величину э.д.с. легко найти из условия равенства сил  $F_d = F_k$ , используя выражения (3.24), (1.2), (1.5), (1.6) и принимая угол между направлениями магнитного поля и движения проводника  $\alpha = 90^\circ$

$$Be_0 v = \frac{V_A - V_B}{l} e_0.$$

Отсюда следует формула для определения э.д.с.

$$E = Bvl. \quad (3.35)$$

При угле  $\alpha \neq 90^\circ$  в эту формулу вместо полной скорости вводится проекция ее на направление, перпендикулярное направлению магнитной индукции  $v \sin \alpha$ , и тогда получается более общая формула

$$E = Bvl \sin \alpha. \quad (3.36)$$

В данном случае для определения направления э.д.с. применяют правило правой руки (рис. 3.24): *правую руку надо расположить так, чтобы линии магнитной индукции упирались в ладонь, а большой палец, отогнутый в плоскости ладони перпендикулярно вытянутым четырем, показывал направление движения проводника, тогда вытянутые четыре пальца показывают направление э.д.с.*

**Взаимное преобразование механической и электрической энергии.** Электромагнитная индукция и силовое действие магнитного поля на проводник с током используется для преобразования механической энергии в электрическую, а также электрической энергии в механическую. Такие преобразования энергии происходят в электрических машинах, устройстве, характеристики, режимы работы которых изложены в гл. 8—9. Здесь же рассмотрим

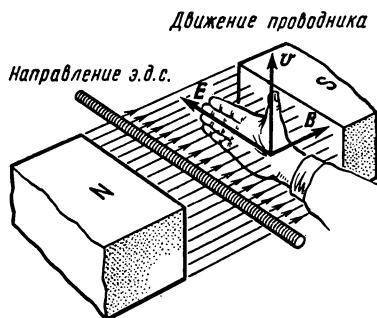


Рис. 3.24

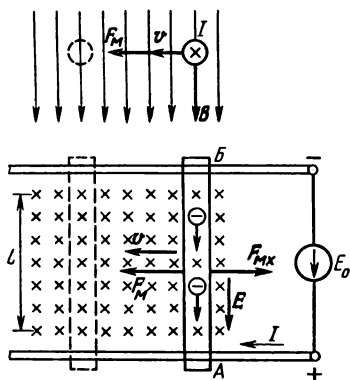


Рис. 3.25



принципы взаимного преобразования механической и электрической энергии, используя ту же схему на рис. 3.23.

Проводник  $AB$  движется в магнитном поле под действием силы  $F_{\text{мх}}$  с постоянной скоростью  $v$  за счет механической энергии какого-либо первичного двигателя (источника механической энергии), механическая мощность которого  $P_{\text{мх}} = F_{\text{мх}}v$ . В проводнике возбуждается э.д.с.  $E$  и ток  $I = E/(r + R)$ , где  $r$  — сопротивление проводника,  $R$  — сопротивление внешней части цепи (шины, электроприемника).

Проводник  $AB$  в данном случае является источником э.д.с., электрическая мощность которого  $P = EI$ . С появлением тока возникает электромагнитная сила  $F_{\text{м}}$ , которая согласно правилу левой руки действует на проводник  $AB$  противоположно силе  $F_{\text{мх}}$  ( $F_{\text{мх}}$  — сила движущая,  $F_{\text{м}}$  — сила тормозная). При постоянной скорости (установившееся движение)  $F_{\text{мх}} = F_{\text{м}}$ . Учитывая это равенство и формулы (3.24), (3.35), получим:  $P_{\text{мх}} = F_{\text{мх}}v = BIlv = EI = P$ . Следовательно, механическая мощность первичного двигателя равна электрической мощности источника, т. е. при движении проводника в магнитном поле под действием внешней механической силы механическая энергия полностью превращается в электрическую. Напряжение  $U_{AB}$  на концах проводника одновременно приложено и к внешней части цепи. Оно меньше э.д.с. на величину внутреннего падения напряжения:

$$U_{AB} = E - Ir = IR.$$

Обратный процесс — преобразование электрической энергии в механическую можно показать на том же проводнике  $AB$ , изменив несколько электрическую цепь, в которую он входит (рис. 3.25). Вместо приемника электрической энергии в цепь включен источник э.д.с.  $E_0$ , под действием которого в проводнике  $AB$  возникает ток  $I$ . В результате взаимодействия магнитного поля и тока на проводник  $AB$  действует электромагнитная сила  $F_{\text{м}}$  и он движется со скоростью  $v$ . В проводнике  $AB$ , движущемся в магнитном поле, индуцируется э.д.с.  $E$ , направленная противоположно току (противо-э.д.с.). По второму закону Кирхгофа,  $U_{AB} - E = Ir$ ; отсюда ток  $I = (U_{AB} - E)/r$ . В данном случае, в отличие от схемы рис. 3.23, электромагнитная сила  $F_{\text{м}}$  движущая, а противодействие движению оказывает механическая сила  $F_{\text{мх}}$  (например, сила трения). При равенстве этих сил  $F_{\text{м}} = F_{\text{мх}}$  скорость движения проводника  $v = \text{const}$ . Составим баланс мощностей для данной электрической цепи.

Проводник  $AB$  является электроприемником и его мощность  $P = U_{AB}I$ , но  $U_{AB} = E + Ir$ , поэтому  $P = EI + I^2r$ . С учетом выражения (3.35)  $P = BvIl + I^2r$ . Первое слагаемое в этой сумме выражает механическую мощность движущегося проводника, а второе —

мощность тепловых потерь в проводнике  $AB$  (по закону Джоуля — Ленца).

### Контрольные вопросы и задачи

1. Внутри цилиндрической катушки, концы которой соединены с гальванометром (рис. 3.26,  $a$ ), с некоторой скоростью движется постоянный магнит. Стрелка гальванометра отклоняется, обнаруживая ток в катушке. В какую сторону направлен ток в катушке, если постоянный магнит а) вводится внутрь катушки? б) удаляется из катушки, с той же стороны?

2. Две обмотки расположены на общем сердечнике (рис. 3.26, б). Как направлен ток во второй обмотке, если выключатель  $K$  замыкается и затем размыкается?

3. Возникновение тока в цепи с гальванометром означает, что в этой цепи возникает электрическая энергия, которая при наличии сопротивления превращается в теплоту. Из какого вида энергии получается электрическая энергия в схемах опытов рис. 3.26,  $a$  и 3.26, б?

4. Ток в обмотке изменяется вследствие изменения приложенного к ней напряжения. В какую сторону по отношению к напряжению направлена э.д.с. самоиндукции в обмотке, если ток в обмотке: а) увеличивается? б) уменьшается?

5. Почему уменьшаются потери энергии в трансформаторе, если его сердечник собирают из отдельных изолированных листов электротехнической стали? Если электротехническая сталь имеет повышенное содержание кремния?

**Задача 3.11.** Магнитный поток в сердечнике катушки, создаваемый током в ее обмотке, изменяется по графику рис. 3.27. Построить график э.д.с., индуцированной в обмотке с числом витков  $N=15$ .

**Задача 3.12.** Катушка с индуктивностью  $L=30$  мГн включается к источнику постоянного напряжения 50 В. Определить сопротивление  $R$  катушки, если известно, что в момент, когда ток достиг значения 10 А, скорость его нарастания составляла 1000 А/с.

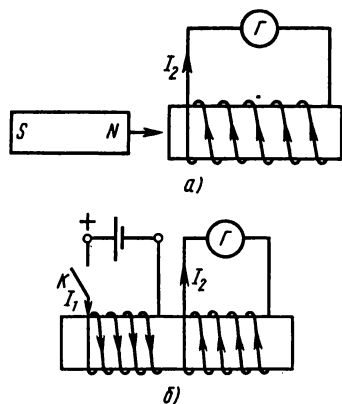


Рис. 3.26

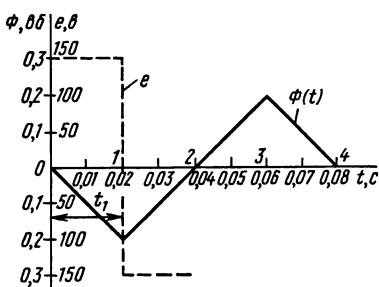


Рис. 3.27

## ГЛАВА 4

# ОДНОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В настоящее время для получения, передачи и распределения электрической энергии применяют в основном устройства и сооружения переменного тока: генераторы, трансформаторы, линии электропередачи, распределительные электросети. Большинство электроприемников работает на переменном токе. Электрический ток, изменяющийся с течением времени, называют переменным током.

В практике, говоря о переменном токе, обычно имеют в виду синусоидальный электрический ток — периодический электрический ток, являющийся синусоидальной функцией времени. В некоторых случаях ток изменяется по периодическому несинусоидальному закону.

### § 4.1. СИНУСОИДАЛЬНЫЕ Э.Д.С. И ТОК

В линейных электрических цепях переменный синусоидальный ток возникает под действием э.д.с. такой же формы. Поэтому для изучения цепей переменного тока необходимо рассмотреть получение синусоидальной э.д.с. и основные понятия, относящиеся к величинам, которые изменяются по синусоидальному закону.

**Э.д.с. генератора переменного тока.** Магнитная система генератора переменного тока конструктивно оформлена так, что магнитное поле в воздушном зазоре между магнитными полюсами и ротором (рис. 4.1, а) направлено по радиусам окружности ротора (радиальное поле), а вдоль воздушного зазора магнитная индукция распределена по синусоиде (рис. 4.1, б).

В любой точке воздушного зазора, положение которой определяется углом  $\beta$ , отсчитанным от нейтральной плоскости (нейтра-

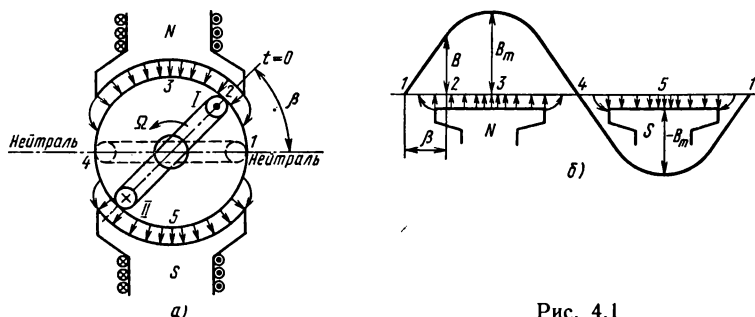


Рис. 4.1

ли) против движения часовой стрелки, магнитная индукция выражается уравнением  $B = B_m \sin \beta$ .

Нейтральная плоскость перпендикулярна оси полюсов и делит магнитную систему на симметричные части, из которых одна относится к северному, а другая — к южному полюсам.

Наибольшее значение  $B_m$  магнитная индукция имеет под серединой полюсов, т. е. при углах  $\beta = 90^\circ$ ,  $\beta = 270^\circ$ , а на нейтрали (при  $\beta = 0$ ,  $\beta = 180^\circ$ ) она равна нулю.

При равномерном вращении ротора с угловой скоростью  $\Omega$  в его обмотке (на рис. 4.1, *a* в витке) наводится э.д.с.  $e = Bv2l$  [см. формулу (3.35)]. Подставляя выражение магнитной индукции, получим  $e = 2B_m v l \sin \beta$ . При  $\beta = 90^\circ$ , т. е. в положении витка под серединой полюса, наводится наибольшая э.д.с.  $E_m = 2B_m v l$ .

Учитывая выражение угла  $\beta = \Omega t$ , получим зависимость э.д.с. от времени

$$e = E_m \sin \Omega t. \quad (4.1)$$

При этом начальным ( $\beta = 0$ ) принято положение 1 витка, когда его плоскость совпадает с нейтралью (см. рис. 2.1, *a*).

**Уравнения и графики синусоидальных э.д.с. и тока.** В прямоугольной системе координат можно изобразить график э.д.с. в функции угла  $\Omega t$  или времени  $t$  (рис. 4.2). Кривая 1 построена по уравнению (4.1). В первой половине ее (в интервале от  $\Omega t = 0$  до  $\Omega t = 180^\circ$ ) э.д.с. положительна, что соответствует движению проводника 1 в зоне северного, а проводника 11 в зоне южного полюсов. Далее проводники меняются местами (вторая половина кривой 1 в интервале от  $\Omega t = 180$  до  $\Omega t = 360^\circ$ ).

На рис. 4.3 показана схема устройства четырехполюсного генератора переменного тока, у которого полюса расположены на роторе, а проводники обмотки, где наводится э.д.с., помещены в пазах сердечника статора.

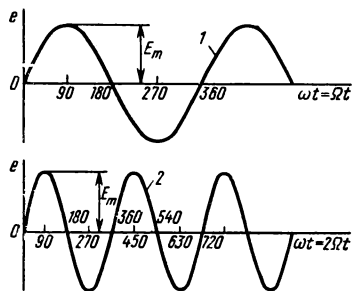


Рис. 4.2

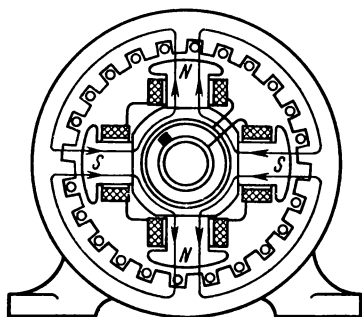


Рис. 4.3

В отличие от двухполюсного генератора за один оборот ротора каждый проводник обмотки дважды оказывается против середины полюса одинаковой полярности.

Следовательно, при такой же угловой скорости вращения ротора ( $\Omega$ ) в течение полуоборота э.д.с. совершит полный цикл изменения, а за полный оборот ротора — два таких цикла. Этому соответствует уравнение  $e = E_m \sin 2\Omega t$  и кривая 2 на рис. 4.2. Если генератор имеет любое число пар полюсов  $p$ , то уравнение его э.д.с.  $e = E_m \sin p\Omega t$ .

Синусоидальную форму изменения напряжения можно получить с помощью электронного генератора, который не имеет вращающихся частей и магнитных полюсов. Поэтому в уравнении э.д.с. вместо  $\Omega$  надо ввести такую величину, которая характеризует скорость изменения э.д.с. независимо от способа ее получения. Такой величиной является угловая частота  $\omega$ , которая применительно к электромашинному генератору выражается равенством  $\omega = p\Omega$ , а при  $p = 1$   $\omega = \Omega$ . Тогда

$$e = E_m \sin \omega t. \quad (4.2)$$

Если к обмотке генератора подключить приемник с постоянным сопротивлением  $R$ , то в образовавшейся электрической цепи возникнет ток, повторяющий по форме кривую э.д.с.

$$i = e/R = \frac{E_m}{R} \sin \omega t.$$

Обозначим  $E_m/R = I_m$ , получим

$$i = I_m \sin \omega t. \quad (4.3)$$

Уравнение (4.2) записано для случая, когда начало отсчета времени  $\omega t = 0$  совпадает с моментом прохождения витка через нейтраль (на рис. 4.1, а положение 1).

Предположим, что на роторе генератора расположены несколько витков, сдвинутых в пространстве по окружности ротора (на рис. 4.4, а три витка).

В начальный момент  $\omega t = 0$  положение каждого из них определяется углом, отсчитанным от нейтрали до плоскости витка: для первого витка  $\Psi_1 = 0$ , для второго  $\Psi_2 < 0$  и третьего  $\Psi_3 > 0$  (угол, отсчитанный в направлении вращения ротора, т. е. против движения часовой стрелки, считается положительным). При вращении ротора э.д.с. наводятся во всех витках, но уравнения их не одинаковы, что видно из сопоставления величин э.д.с. в начальный момент времени ( $t = 0$ ):  $e_{1,0} = 0$ ;  $e_{2,0} < 0$ ;  $e_{3,0} > 0$ . Эта зависимость э.д.с. от начального положения витка учитывается введением в уравнение начального угла  $\psi$ :  $e_1 = E_m \sin \omega t$ ;  $e_2 = E_m \sin (\omega t - \psi_2)$ ;  $e_3 = E_m \sin (\omega t + \psi_3)$ . Таким образом, в общем виде уравнение э.д.с.

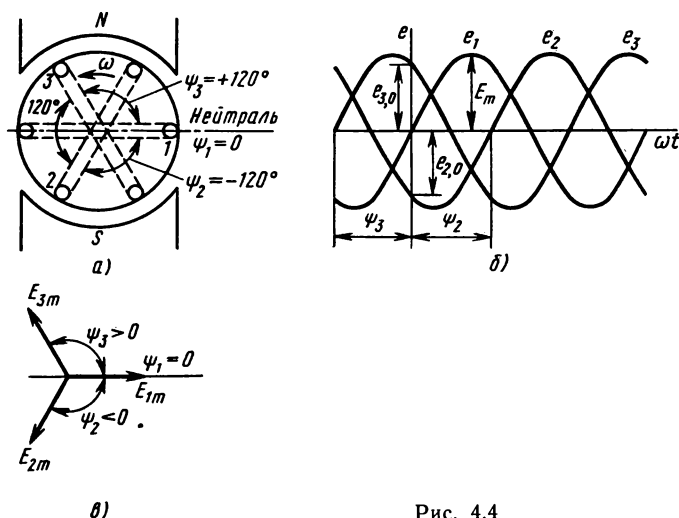


Рис. 4.4

должно быть записано в виде

$$e = E_m \sin (\omega t \pm \psi_u), \quad (4.4)$$

а уравнение тока

$$i = I_m \sin (\omega t \pm \psi_i). \quad (4.5)$$

**Характеристики синусоидальных величин.** Определения характеристик синусоидальной величины далее даны применительно к току [в общем виде уравнение (4.5)], но они аналогичны и для других величин э.д.с., напряжения, магнитного потока и др.

В качестве примера возьмем конкретное уравнение тока  $i = 100 \sin (314t + 60^\circ)$  и его график на рис. 4.5.

Амплитуда  $I_m$  — наибольшая абсолютная величина, которую принимает периодически изменяющийся электрический ток. В данном примере из уравнения и графика непосредственно видно, что  $I_m = 100$  А.

Мгновенный электрический ток  $i$  — величина электрического тока в рассматриваемый момент времени. Например, в начальный момент времени  $t = 0$  мгновенный ток

$$i_0 = 100 \sin 60^\circ = 86,5 \text{ А};$$

$$\text{при } t_1 = 0,005 \text{ с}$$

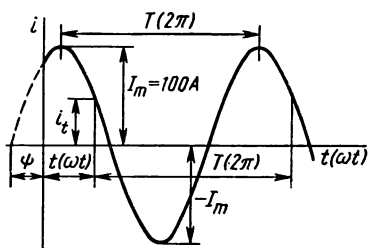


Рис. 4.5

$$i_1 = 100 \sin (314 \cdot 0,005 + \pi/3) = 100 \sin (\pi/2 + \pi/3) = \text{ок:} 0$$

Частота  $f$  — величина, обратная периоду электрического тока

$$f = 1/T = \omega/2\pi. \quad (4.6)$$

В данном примере  $T = 2\pi/314 = 0,02$  с;  $f = 1/T = 1/0,02 = 50$  Гц (герц).

Фаза — аргумент синусоидального тока, отсчитываемый от точки перехода тока через нуль к положительному значению. Фаза (фазовый угол) в любой момент времени определяет стадию изменения синусоидального тока. Общее выражение фазы в данном примере  $(314t + 60^\circ)$ , а в момент времени  $t_1 = 0,005$  с фаза имеет величину  $(314 \cdot 0,005 + \pi/3) = \frac{5}{6} \pi$ .

Начальная фаза  $\Psi$  — значение фазы синусоидального тока в начальный момент времени. Начальная фаза соответствует моменту времени  $t = 0$ . В данном случае  $\psi = \pi/3 = 60^\circ$ .

О синусоидальных величинах, имеющих разные по значению начальные фазы, говорят, что они сдвинуты по фазе. Сдвиг фаз  $\varphi$  — алгебраическая величина, определяемая разностью начальных фаз двух синусоидальных функций  $\varphi = \psi_1 - \psi_2$ . На рис. 4.4, б сдвиг фаз между э.д.с. составляет  $2/3\pi = 120^\circ$ .

Угловая частота  $\omega$  — скорость изменения фазы тока.

Из определения угловой частоты следует, что ее можно выразить производной от фазы по времени  $\frac{d(\omega t \pm \psi)}{dt} = \omega$ .

В данном примере  $\omega = 314$  рад/с, что видно непосредственно при сопоставлении уравнения (4.5) и конкретного уравнения тока.

Период  $T$  — наименьший интервал времени, по истечении которого мгновенные значения периодического электрического тока повторяются.

Фазовый угол, соответствующий периоду, составляет  $2\pi$ . Эту величину получим, если скорость изменения фазы  $\omega$  умножим на период  $T$ , т. е.  $2\pi = \omega T$ ; отсюда

$$T = 2\pi/\omega. \quad (4.7)$$

Действующий ток  $I$  — среднее квадратичное значение электрического тока за период.

Действующее значение переменного тока определяют, учитывая какое-либо действие тока в электрической цепи, например тепловое. Выразим количество теплоты, выделяемой в элементе цепи с сопротивлением  $R$  за время, равное периоду  $T$ : при постоянном

токе  $I$ :  $Q_- = I^2 RT$ ; при переменном токе  $i = I_m \sin \omega t$ :  $Q_- = \int_0^T i^2 R dt$ .

Действующее значение  $I$  переменного тока определяется из условия  $Q_- = Q_+$ , т. е.

$$I^2 RT = \int_0^T i^2 R dt, \text{ или } I^2 T = \int_0^T i^2 dt.$$

Выражение в правой части можно найти графически (рис. 4.6), если вместе с графиком  $i(t)$  изобразить график  $i^2(t)$ . Для этого ординаты кривой тока следует возвести в квадрат, а затем построить прямоугольник с основанием  $T$ , площадь которого равновелика с площадью, ограниченной кривой  $i^2(t)$  и осью абсцисс в пределах периода  $T$ . Высота этого прямоугольника, как видно из приведенного равенства, составляет  $I^2$ , а из графика следует, что она также равна  $I_m^2/2$ , т. е.  $I^2 = I_m^2/2$ . Отсюда получают формулу для определения действующего значения переменного тока через его амплитуду

$$I = I_m / \sqrt{2}. \quad (4.8)$$

Действующие ток или напряжение измеряются соответствующими измерительными приборами; номинальные токи и напряжения электротехнических устройств выражаются действующими значениями.

Среднее значение переменного тока ( $I_{cp}$ ) — среднее арифметическое из всех мгновенных значений тока за полупериод.

Согласно этому определению среднее значение синусоидального тока можно выразить высотой прямоугольника с основанием  $T/2$ , площадь которого равновелика с площадью, ограниченной кривой тока и осью абсцисс в пределах полупериода (см. рис. 4.6).

Это соответствует выражению

$$I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt.$$

Отсюда

$$I_{cp} = 2I_m / \pi. \quad (4.9)$$

**Векторные диаграммы.** На рис. 4.4, б в соответствии с уравнением (4.4) построены графики э.д.с. трех витков, отличаю-

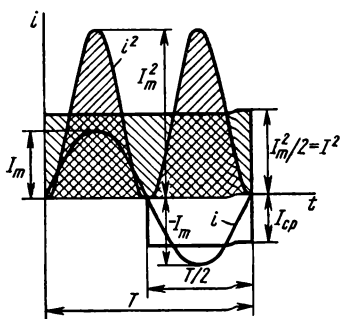


Рис. 4.6



щихся в момент начала отсчета времени расположением относительно нейтрали (при  $\psi_1=0$ ;  $\psi_2<0$ ;  $\psi_3>0$ ), и соответствующая этим графикам векторная диаграмма (см. рис. 4.4, в). Уже при первом взгляде на рис. 4.4, б, в можно заметить, что изображение синусоидальных значений с помощью векторов отличается простотой и наглядностью. Однако векторные диаграммы применяют главным образом потому, что сложение и вычитание одноименных синусоидальных величин, неизбежные при расчете электрических цепей переменного тока, наиболее просто выполняются в векторной форме.

По уравнениям или графикам синусоидальных величин векторную диаграмму построить несложно. На рис. 4.4, в из точки пересечения двух взаимно-перпендикулярных осей для каждой синусоидальной функции (в данном случае трех э.д.с.) проведен вектор по двум условиям: длина вектора в определенном масштабе  $M_e$  выражает амплитуду э.д.с.  $|\mathbf{E}|_m = E_m/M_e$ , где  $\mathbf{E}_m$  — вектор э.д.с., см;  $E_m$  — значение э.д.с., В;  $M_e$  — масштаб э.д.с., В/см.

Направление вектора составляет с положительным направлением горизонтальной оси (начальное направление) угол, равный начальной фазе ( $\psi_1=0$ ;  $\psi_2<0$ ;  $\psi_3>0$ ), причем положительные углы отсчитываются от начальной оси (горизонтальная ось справа) против хода, а отрицательные — по ходу часовой стрелки.

В данных условиях проекция вектора на вертикальную ось в том же масштабе выражает величину э.д.с. в начальный момент времени:

$$e_{1.0} = E_{m1} \sin \psi_1 = 0; \quad e_{2.0} = E_{m2} \sin \psi_2 < 0; \quad e_{3.0} = E_{m3} \sin \psi_3 > 0.$$

Если представить себе, что вектор вращается против хода часовой стрелки с угловой скоростью  $\omega$ , то положение его в любой момент времени определяется углом  $\omega t$ , а величина э.д.с. в этот момент времени равна проекции вектора на ту же вертикальную ось:  $e = E_m \sin (\omega t \pm \psi)$ . Таким образом, проекция вращающегося вектора изменяется согласно такому же уравнению (4.4) и по такому же графику (рис. 4.4, б), что и первоначально заданная э.д.с. Этим подтверждается возможность изображения синусоидально изменяющегося значения (э.д.с., тока и т. д.) вращающимся вектором, если его нанести на чертеж в начальном положении.

Учитывая, что отношение между действующим значением и амплитудой синусоидальной величины постоянно [см. формулу (4.8)], на векторной диаграмме вместо амплитуд откладывают действующие значения.

#### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Э.д.с. и ток в некоторой электрической цепи выражены уравнениями:  $e = E_m \sin \omega t$ ;  $i = I_m \sin (\omega t + \pi/2)$ . Какое значение имеет э.д.с. в момент,

когда ток  $i=0$ ? Какое значение имеет ток, когда э.д.с.  $e=E_m$ ? Какая величина отстает по фазе от другой?

2. На электростанциях применяют электрогенераторы с приводом от тихоходных гидротурбин (гидрогенераторы) и от быстроходных паровых турбин (турбогенераторы). Какой тип генератора имеет на роторе больше пар полюсов, если угловая частота их э.д.с. одинакова?

3. Токи выражены уравнениями:  $i_1=6 \sin(314t-180^\circ)$ ;  $i_2=10 \sin(628t+180^\circ)$ ;  $i_3=8 \sin 314t$ . Какие из них можно сложить с помощью векторной диаграммы? Какие из них изменяются в противофазе?

4. На какой угол сдвинуты по фазе токи  $i_1$  и  $i_3$ , уравнения которых записаны в вопросе 3?

5. Чему равна амплитуда тока, который является суммой двух токов  $i_4=i_1+i_3$ ? разностью токов  $i_5=i_3-i_1$ ? ( $i_1$  и  $i_3$  заданы в вопросе 3).

**Задача 4.1.** Построить в прямоугольной системе координат график э.д.с.  $e=f(\omega t)$  в пределах промежутка времени от  $t_0=0$  до  $t_k=0,02$  с, если уравнение э.д.с.  $e=100 \sin 314t$ .

**Задача 4.2.** Две обмотки расположены на роторе двухполюсного генератора и соединены, как показано на рис. 4.7, а, б. Амплитуды э.д.с. обмоток  $E_{1m}=60$  В,  $E_{2m}=80$  В. Частота вращения ротора  $n=3000$  об/мин. Определить показания вольтметров при согласном и встречном соединении обмоток.

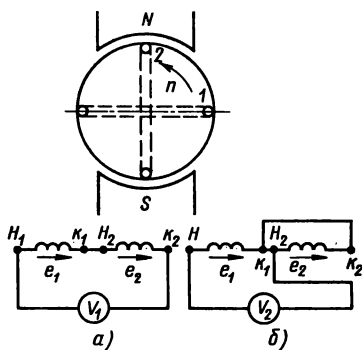


Рис. 4.7

## § 4.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С АКТИВНЫМ ИЛИ РЕАКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Параметрами электрических цепей переменного тока являются активное сопротивление  $R$ , индуктивность  $L$  и емкость  $C$ . Реальные элементы электрических цепей обладают всеми перечисленными параметрами. Но иногда из расчетной схемы исключают те из них, влияние которых на значение тока в цепи незначительно. Например, электрические лампы накаливания, электропечи сопротивления, резисторы в расчетных схемах представлены только сопротивлением  $R$ , трансформатор на холостом ходу — индуктивностью  $L$ , кабель без нагрузки — емкостью  $C$ .

Таким образом, схема электрической цепи переменного тока характеризуется одним из параметров ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ) или комбинацией их при различных способах соединения элементов.

Рассмотрим сначала идеализированные цепи, параметрами

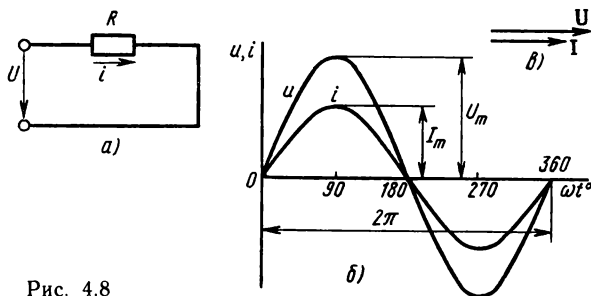


Рис. 4.8

которых являются отдельно активное сопротивление  $R$ , индуктивность  $L$  или емкость  $C$ .

**Цепь с активным сопротивлением.** Для схемы такой цепи (рис. 4.8, а) задано сопротивление  $R$  и напряжение, изменяющееся согласно уравнению

$$u = U_m \sin \omega t. \quad (4.10)$$

Требуется определить ток и мощность цепи.

Для мгновенных значений напряжения и тока по закону Ома [см. формулу (2.7)]

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t, \quad (4.11)$$

где  $I_m = U_m/R$  — амплитуда тока.

Разделим это равенство на  $\sqrt{2}$  и, учитывая выражения (4.8), получим формулы для определения действующего значения тока

$$I = U/R; \quad I = UG. \quad (4.12)$$

Приведенные рассуждения и полученные формулы показывают, что в цепи с активным сопротивлением напряжение и ток совпадают по фазе (это показано на графиках и векторной диаграмме рис. 4.8, б, в); действующий ток определяется отношением действующего напряжения к сопротивлению.

При непрерывном изменении напряжения и тока мощность изменяется согласно уравнению

$$p = ui = U_m \sin \omega t I_m \sin \omega t = U_m I_m \sin^2 \omega t.$$

Из тригонометрии:  $\sin^2 \omega t = (1 - \cos 2\omega t)/2$ ;

$$\cos 2\omega t = \sin(2\omega t - \pi/2).$$

Учитывая эти выражения и то, что  $U_m I_m/2 = UI$ , получим уравнение мгновенной мощности в виде

$$p = UI + UI \sin(2\omega t - \pi/2).$$

Наглядное представление о характере изменения мощности дает график на рис. 4.9, который построен после умножения ординат кривых напряжений и тока, соответствующих ряду значений их общего аргумента — времени  $t$ .

Анализируя график мгновенной мощности, нетрудно заметить, что мощность в течение периода  $T$  остается положительной, хотя напряжение и ток меняют свой знак. Это говорит о том, что направление потока энергии в течение периода остается одинаковым, в данном случае от сети (от источника энергии) к приемнику с сопротивлением  $R$ , где электрическая энергия преобразуется в другой вид энергии. Электрическая энергия в этом случае называется активной.

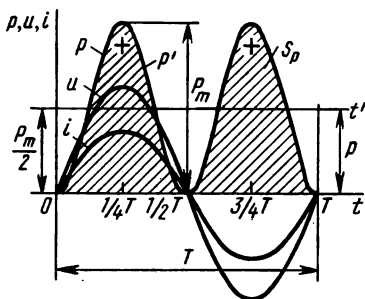


Рис. 4.9

В качестве характеристики энергетического процесса в цепи переменного тока определяют среднюю мощность за период, используя график мгновенной мощности  $p(t)$  (см. рис. 4.9).

В принятом масштабе среднюю мощность выражает высота прямоугольника с основанием  $T$ , площадь которого равновелика площади, ограниченной кривой  $p(t)$  и осью абсцисс (на рисунке площадь заштрихована).

Площади эти равны, если высота прямоугольника  $P$  составляет половину наибольшего значения мгновенной мощности  $P = P_m/2$ . В этом случае часть заштрихованной площади (+), находящаяся выше прямоугольника, точно укладывается в незаштрихованную его часть.

Поэтому  $P = P_m/2 = U_m I_m/2$ , откуда с учетом выражений (4.8) и (4.12) следуют формулы для определения средней мощности за период, которую называют активной:

$$P = UI; \quad P = I^2 R. \quad (4.13)$$

Активная мощность в цепи переменного тока с активным сопротивлением равна произведению действующих значений напряжения и тока. Активное сопротивление  $R$ , как параметр цепи, определяется отношением активной мощности к квадрату действующего значения тока этой цепи  $R = P/I^2$ .

**Цепи с реактивным сопротивлением.** Реактивные сопротивления в цепи переменного тока имеют элементы, особым свойством которых является изменение запаса энергии в магнитном или электрическом поле. Такими элементами являются, в частности, ин-

дуктивная катушка и конденсатор. В связи с изменением энергии в полях эти элементы в схемах замещения представлены индуктивностью  $L$  или емкостью  $C$ .

Сначала рассмотрим идеализированные цепи: цепь с индуктивной катушкой без потерь энергии (индуктивность  $L$ , активное сопротивление  $R=0$ ); цепь с конденсатором без потерь энергии (емкость  $C$ , активная проводимость  $G=0$ ).

Анализ той и другой во многом аналогичен, поэтому проведем его параллельно, обращая при этом внимание не только на сходство, но и на различие этих цепей.

Цепь с индуктивной катушкой  
(рис. 4.10, а).

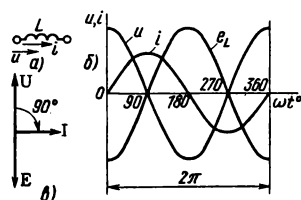


Рис. 4.10

Дано: индуктивность  $L$ , ток, изменяющийся по закону

$$i = I_m \sin \omega t.$$

Требуется определить напряжение на зажимах катушки  $U$ , мощность цепи  $Q_L$ . При изменении тока в катушке наводится э.д.с. самоиндукции

$$e_L = -L \frac{di}{dt}$$

[см. формулу (3.32)].

Если  $R=0$ , падение напряжения  $iR=0$ , приложенное к катушке напряжение уравнивается только э.д.с. самоиндукции, поэтому

$$u = L \frac{di}{dt}. \quad (4.14)$$

Цепь с конденсатором  
(рис. 4.11, а).

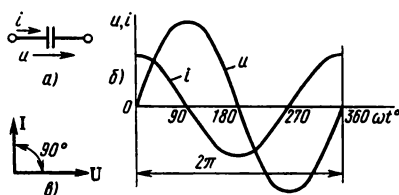


Рис. 4.11

Дано: емкость  $C$ , напряжение, изменяющееся по закону

$$u = U_m \sin \omega t.$$

Требуется определить ток в конденсаторе  $I$ , мощность цепи  $Q_C$ .

При изменении напряжения между обкладками конденсатора образуется ток смещения

$$i = \frac{dQ}{dt}; \quad dQ = CdU$$

[см. формулы (2.1), (1.8)].

Если  $G=0$ , ток проводимости  $uG=0$ , ток в конденсаторе является только током смещения, поэтому

$$i = C \frac{du}{dt}. \quad (4.15)$$

Уравнения напряжения на катушке и тока в конденсаторе можно получить, выразив производные:

$$\begin{aligned}\frac{di}{dt} &= \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = \omega I_m \cos \omega t = \omega I_m \sin(\omega t + \pi/2) \\ \frac{du}{dt} &= \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = \omega U_m \cos \omega t = \omega U_m \sin(\omega t + \pi/2).\end{aligned}$$

Подставляя полученные выражения соответственно в (4.14) и (4.15), получим уравнения напряжения на зажимах катушки и тока в конденсаторе, которые далее записаны рядом с исходными уравнениями тока в катушке и напряжения на конденсаторе:

$$u = U_m \sin(\omega t + \pi/2), \quad (4.16) \quad i = I_m \sin(\omega t + \pi/2), \quad (4.17)$$

$$i = I_m \sin \omega t, \quad (4.18) \quad u = U_m \sin \omega t, \quad (4.19)$$

$$U_m = \omega L I_m, \quad (4.20) \quad I_m = \omega C U_m. \quad (4.21)$$

$U_m$  — амплитуда напряжения на зажимах катушки.

$I_m$  — амплитуда тока в конденсаторе.

Сопоставляя уравнения токов и напряжений, можно сделать следующие выводы: *в идеальной катушке ток отстает по фазе от напряжения на четверть периода; в идеальном конденсаторе напряжение отстает по фазе от тока на четверть периода.*

Эти выводы наглядно подтверждают векторные диаграммы и графики для цепей с индуктивной катушкой и конденсатором без потерь (рис. 4.10, б, в и 4.11, б, в).

Выражения (4.20) и (4.21) разделим на  $\sqrt{2}$ , получим:

$$\begin{aligned}U_m/\sqrt{2} &= \omega L I_m/\sqrt{2} \text{ или } U = \omega L I \\ I_m/\sqrt{2} &= \omega C U_m/\sqrt{2} \text{ или } I = \omega C U\end{aligned}$$

Величину  $\omega L$  обозначают  $X_L$  и называют индуктивным сопротивлением, а обратную величину  $1/\omega L$  обозначают  $B_L$  и называют индуктивной проводимостью

$$X_L = \omega L, \quad (4.22)$$

$$B_L = 1/\omega L. \quad (4.24)$$

Величину  $\omega C$  обозначают  $B_C$  и называют емкостной проводимостью, а обратную величину  $1/\omega C$  обозначают  $X_C$  и называют емкостным сопротивлением

$$B_C = \omega C, \quad (4.23)$$

$$X_C = 1/\omega C. \quad (4.25)$$

С учетом принятых обозначений выразим напряжение и ток катушки:

$$U = IX_L = I/B_L, \quad (4.26)$$

$$I = U/X_L = UB_L. \quad (4.28)$$

С учетом принятых обозначений выразим ток и напряжение конденсатора:

$$I = UB_C = U/X_C, \quad (4.27)$$

$$U = I/B_C = IX_C. \quad (4.29)$$

Полученные выражения напряжений и токов в катушке [см. (4.26), (4.28)] и в конденсаторе [см. (4.27), (4.29)] по форме совпадают с выражением закона Ома [см. формулы (2.7), (2.5)], но на месте активного сопротивления (или проводимости) находится реактивное сопротивление (или проводимость), которое применительно к катушке называют индуктивным, а применительно к конденсатору — емкостным.

Уравнение мгновенной мощности оказывается одинаковым для катушки [исходные уравнения (4.16) и (4.18)] и для конденсатора [исходные уравнения (4.17) и (4.19)]

$$p = ui = U_m I_m \sin \omega t \sin (\omega t + \pi/2) = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t.$$

График изменения мощности (рис. 4.12, а) представляет собой синусоиду двойной частоты с амплитудой  $Q = \frac{U_m I_m}{2} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \frac{I_m}{\sqrt{2}}$  или

$$Q = UI = I^2 X, \quad (4.30)$$

где  $Q$  — наибольшая величина мгновенной мощности или реактивная мощность.

Особенности энергетических процессов в катушке и конденсаторе без потерь видны на этом графике.

Мгновенная мощность в течение периода четыре раза меняет знак (в моменты времени  $T/4$ ;  $T/2$ ;  $3T/4$ ;  $T$ ). Это указывает на то,

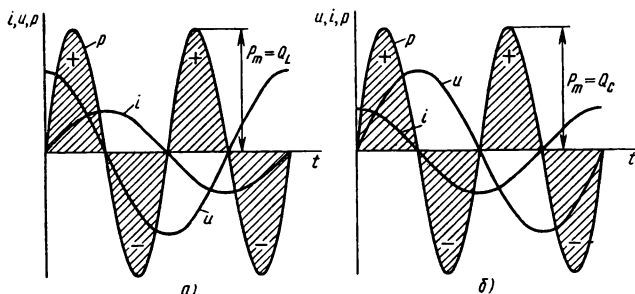


Рис. 4.12

что поток энергии меняет свое направление. В первую четверть периода ( $0—T/4$ ), когда увеличивается ток в катушке или напряжение на конденсаторе, энергия накапливается в магнитном поле катушки или электрическом поле конденсатора; катушка и конденсатор в это время являются приемниками энергии. Во вторую четверть периода ( $T/4—T/2$ ) ток в катушке и напряжение на конденсаторе уменьшаются, а энергия в том же количестве возвращается в сеть (источнику); катушка и конденсатор при этом играют роль источников энергии. В следующую половину периода процесс повторяется.

Скорость накопления и убыли энергии магнитного или электрического поля меняется по гармоническому закону. Характеристикой этого энергетического процесса является наибольшая величина (амплитуда) мгновенной мощности, которая называется реактивной мощностью.

Реактивные мощности катушки без потерь (индуктивная мощность  $Q_L$ ) и конденсатора без потерь (емкостная мощность  $Q_C$ ) выражаются произведением действующих значений напряжения и тока.

В отличие от активной мощности единицу измерения реактивной мощности называют вольт-ампер реактивной (вар).

#### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Напряжение и ток индуктивной катушки без потерь связаны формулой (4.28), а конденсатора без потерь — формулой (4.29). В чем сходство и различие этих формул?

2. Зависимость реактивных сопротивлений и проводимостей от частоты можно изобразить графически. В чем отличие и сходство этих графиков для индуктивной катушки и конденсатора без потерь?

3. Катушка индуктивности и конденсатор (оба элемента без потерь) имеют равные реактивные сопротивления  $X_L = X_C$  и включены в электрическую цепь переменного тока последовательно. Чему равна мощность на этом участке: активная? реактивная?

4. Согласно графику на рис. 4.12, *а, б* в третьей четверти периода ( $T/2—3T/4$ ) ток в индуктивной катушке и напряжение на конденсаторе отрицательны. Почему в этом промежутке времени в катушке и конденсаторе накапливается энергия?

5. Согласно графику на рис. 4.12, *а, б*, в четвертой четверти периода ( $3T/4—T$ ) напряжение на зажимах катушки и ток в конденсаторе увеличиваются. Почему в этом промежутке времени катушка и конденсатор теряют ранее запасенную энергию?

**Задача 4.3.** Группа электрических ламп накаливания общей мощностью  $P = 1200$  Вт включена в сеть переменного тока с напряжением  $U = 120$  В, частотой  $f = 50$  Гц. Определить: действующее значение тока и активное сопротивление всей цепи; написать уравнения тока и напряжения, приняв начальную фазу тока  $\psi_i = 60^\circ$ ; найти мгновенную мощность в момент времени  $t_1 = 0,01$  с от начала отсчета.



**Задача 4.4.** Индуктивность катушки  $L=15,9$  мГн, активное сопротивление  $R=0$ . Емкость конденсатора  $C=637$  мкФ, активная проводимость  $G=0$ . Определить мощность катушки и конденсатора, если напряжение на каждом из этих элементов цепи  $U=100$  В при частоте  $f=50$  Гц.

### § 4.3. ЦЕПИ С АКТИВНЫМ И РЕАКТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТАМИ

Индуктивная катушка и конденсатор в реальном исполнении отличаются от идеальных тем, что в них при переменном токе наряду с изменением энергии поля часть электрической энергии преобразуется в другой вид энергии. В частности, в проводе катушки электрическая энергия преобразуется в теплоту согласно закону Джоуля — Ленца (о потерях энергии в катушке с ферромагнитным сердечником см. § 3.3). В конденсаторе кроме тока смещения есть небольшие токи проводимости (объемный и поверхностный), которые вместе с изменением поляризации вызывают потери энергии и выделение теплоты.

Процесс преобразования энергии характеризуется активной мощностью  $P$ , а соответствующими ей параметрами в схемах замещения являются активное сопротивление катушки  $R$  и активная проводимость конденсатора  $G$ .

Рассматривая далее цепи с активным и реактивным элементами, надо иметь в виду, что индуктивная катушка является здесь представителем большой группы устройств переменного тока (трансформаторы, электродвигатели, электромагниты различного назначения), для которых обычно применяют схему замещения с последовательным соединением схемных элементов: активного  $R=P/I^2$  и индуктивного  $X_L=\omega L=Q_L/I^2$  сопротивлений (рис. 4.13, а).

Для конденсатора с потерями энергии и некоторых других устройств в цепях переменного тока (например, электрический ка-

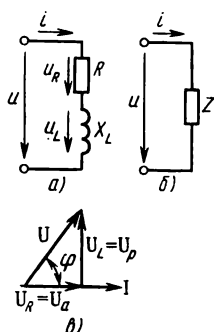


Рис. 4.13

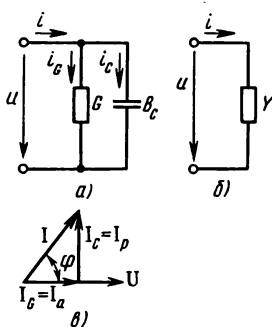


Рис. 4.14

бель) более удобна схема с параллельным соединением схемных элементов: с активной проводимостью  $G = P/U^2$  и емкостной  $B_C = \omega C = Q_C/U^2$  (рис. 4.14, а).

### Векторные диаграммы

Приложенное к катушке напряжение  $u$  можно представить состоящим из двух слагаемых, одна  $u_R$  равна падению напряжения в активном элементе, а другая  $u_L$  уравнивает э.д.с. самоиндукции:

$$u_L = L \frac{di}{dt}.$$

По второму закону Кирхгофа можно написать для мгновенных напряжений равенство

$$u = u_R + u_L, \quad (4.31)$$

а для действующих значений векторное равенство

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_R + \mathbf{U}_L. \quad (4.32)$$

Действующие значения составляющих напряжения на катушке определяют по формулам

$$U = IR; \quad U = IX_L. \quad (4.35)$$

Для определения вектора  $\mathbf{U}$  построим векторную диаграмму (см. рис. 4.13, в).

Первым на диаграмме отложен вектор тока  $\mathbf{I}$ . Направление его совпадает с положительным направлением оси, от которой отсчитывают фазовые углы (начальная фаза тока  $\psi_i = 0$ ).

Вектор  $\mathbf{U}_R$  по направлению совпадает с вектором тока  $\mathbf{I}$ , а вектор  $\mathbf{U}_L$  опережает его на  $90^\circ$ .

Ток в конденсаторе  $i$  можно считать состоящим из двух слагаемых, одно из которых  $i_G$  — ток в активном элементе, а другое  $i_C$  равно току смещения:

$$i_C = C \frac{du}{dt}.$$

По первому закону Кирхгофа можно написать для мгновенных токов равенство

$$i = i_G + i_C, \quad (4.32)$$

а для действующих величин векторное равенство

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_G + \mathbf{I}_C. \quad (4.34)$$

Действующие величины составляющих тока в конденсаторе определяют по формулам

$$I_G = UG; \quad I_C = UB_C. \quad (4.36)$$

Для определения вектора  $\mathbf{I}$  построим векторную диаграмму (см. рис. 4.14, в).

Первым на диаграмме отложен вектор напряжения  $\mathbf{U}$ . Направление его совпадает с положительным направлением оси, от которой отсчитывают фазовые углы (начальная фаза напряжения  $\psi_u = 0$ ).

Вектор  $\mathbf{I}_G$  по направлению совпадает с вектором напряжения  $\mathbf{U}$ , а вектор  $\mathbf{I}_C$  опережает его на  $90^\circ$ .

## Треугольники напряжений и токов

На векторной диаграмме (рис. 4.13, а) видно, что вектор напряжения на индуктивной катушке опережает по фазе вектор тока на угол  $\varphi$ , что

$$|0| < |\varphi| < |90^\circ|.$$

При заданном уравнении тока

$$i = I_m \sin \omega t \quad (4.37)$$

уравнение напряжения можно записать на основе векторной диаграммы

$$u = U_m \sin (\omega t + \varphi). \quad (4.39)$$

Значение напряжения выражает гипотенузу прямоугольного треугольника, катетами которого являются векторы падения напряжения в активном и индуктивном элементах схемы

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}. \quad (4.41)$$

Если величины  $U_R$  и  $U_L$  из (4.35) подставить в формулу (4.41), то легко получить выражения, которые связывают действующие ток и напряжение индуктивной катушки

$$U = I \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad (4.43)$$

$$U = IZ; \quad I = U/Z. \quad (4.45)$$

Величину  $Z$  называют полным сопротивлением индуктивной катушки (рис. 4.13, б)

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}. \quad (4.47)$$

На векторной диаграмме рис. 4.14, а видно, что вектор тока  $I$  в конденсаторе опережает вектор напряжения на угол  $\varphi$  так, что

$$|0| < |\varphi| < |90^\circ|.$$

При заданном уравнении напряжения

$$u = U_m \sin \omega t \quad (4.38)$$

уравнение тока можно записать на основе векторной диаграммы

$$i = I_m \sin (\omega t + \varphi). \quad (4.40)$$

Значение тока выражает гипотенузу прямоугольного треугольника, катетами которого являются векторы токов в активном и емкостном элементах схемы:

$$I = \sqrt{I_G^2 + I_C^2}. \quad (4.42)$$

Если величины  $I_G$  и  $I_C$  из (4.36) подставить в формулу (4.42), то легко получить выражения, которые связывают действующие напряжение и ток конденсатора

$$I = U \sqrt{G^2 + B_C^2}, \quad (4.44)$$

$$I = UY; \quad U = I/Y. \quad (4.46)$$

Величину  $Y$  называют полной проводимостью конденсатора (рис. 4.14, б)

$$Y = \sqrt{G^2 + B_C^2}. \quad (4.48)$$

Возвращаясь к векторным диаграммам индуктивной катушки и конденсатора (рис. 4.13, а; 4.14, а), отметим, что проекцию

вектора напряжения на направление вектора тока называют активной составляющей вектора напряжения  $U_a$ , а на направление, перпендикулярное току, — реактивной составляющей вектора напряжения  $U_p$ ;  $U_a = U \cos \varphi$ ;  $U_p = U \sin \varphi$  (для катушки  $U_a = U_R$ ;  $U_p = U_L$ ).

Проекцию вектора тока на направление вектора напряжения называют активной составляющей вектора тока  $I_a$ , а на направление, перпендикулярное напряжению, — реактивной составляющей вектора тока  $I_p$ ;  $I_a = I \cos \varphi$ ;  $I_p = I \sin \varphi$  (для конденсатора  $I_a = I_G$ ;  $I_p = I_C$ ).

### Треугольники сопротивлений и проводимостей

Стороны треугольника напряжений (выраженные в единицах напряжения) разделим на ток  $I$ . Получим подобный треугольник сопротивлений (рис. 4.15, а), катетами которого являются активное сопротивление  $R = U_R/I$  и реактивное (индуктивное) сопротивление  $X_L = U_L/I$ , а гипотенузой — величина  $Z = U/I$  — полное сопротивление цепи.

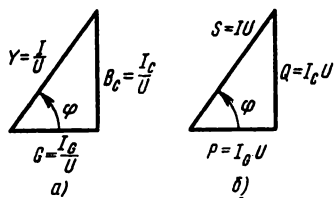


Рис. 4.15

Из треугольника сопротивлений следует

$$Z = U/I = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad (4.49)$$

$$R = Z \cos \varphi, \quad (4.51)$$

$$X_L = Z \sin \varphi. \quad (4.53)$$

Стороны треугольника токов, выраженные в единицах тока, разделим на напряжение  $U$ . Получим подобный треугольник проводимостей (рис. 4.16, а), катетами которого являются активная проводимость  $G = I_G/U$  и реактивная (емкостная) проводимость  $B_C = I_C/U$ , а гипотенузой — величина  $Y = I/U$  — полная проводимость цепи.

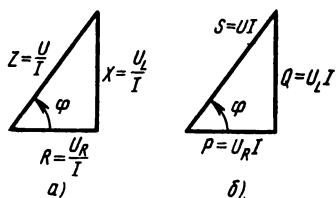


Рис. 4.16

Из треугольника проводимостей следует

$$Y = I/U = \sqrt{G^2 + B_C^2}, \quad (4.50)$$

$$G = Y \cos \varphi, \quad (4.52)$$

$$B_C = Y \sin \varphi. \quad (4.54)$$

**Треугольник мощностей.** Стороны треугольника напряжений (выраженные в единицах напряжения) умножим на ток  $I$ , а сторо-

ны треугольника токов (выраженные в единицах тока) на напряжение  $U$ .

В обоих случаях получим треугольник мощностей, у которого один катет выражает активную мощность  $P = U_R I$  или  $P = I_G U$ ; другой — реактивную мощность  $Q_L = U_L I$  или  $Q_C = I_C U$ , а гипотенуза — величину  $S = UI$ , называемую полной мощностью (см. рис. 4.15, б и 4.16, б).

Из треугольника мощностей следует

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad (4.55)$$

$$P = UI \cos \varphi; \quad (4.56)$$

$$Q = UI \sin \varphi; \quad (4.57)$$

$$\cos \varphi = P/S; \quad (4.58)$$

$$\sin \varphi = Q/S. \quad (4.59)$$

**Графики мгновенной мощности.** Мгновенная мощность, как и ранее, определяется произведением  $p = ui$  или в данном случае уравнением  $p = U_m I_m \sin \omega t \sin (\omega t + \varphi)$ .

На рис. 4.17, а, б в том же порядке, что и в случае идеальных элементов, построены графики мгновенной мощности катушки и конденсаторов с потерями. Из них видно, что в течение периода тока мощность четыре раза меняет знак. Скорость необратимого процесса преобразования энергии оценивается средней мощностью за период или активной мощностью  $P$ , скорость обменного процесса характеризуется реактивной мощностью  $Q$ .

В связи с этим одной из характеристик приемников энергии в цепях переменного тока является отношение активной мощности к полной [см. формулу (4.58)], которое называют коэффициентом мощности.

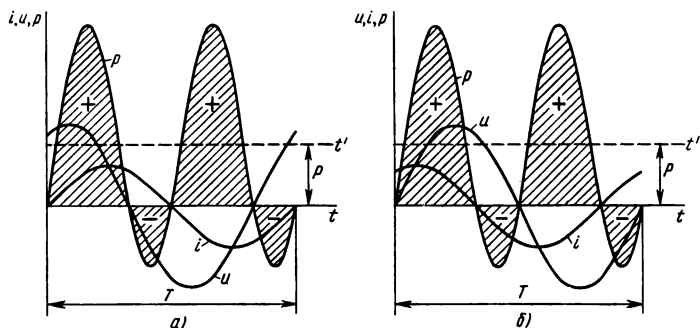


Рис. 4.17

В заключение отметим, что реальные конденсаторы имеют незначительные потери энергии, т. е. их активная проводимость очень мала. Поэтому в схемах замещения конденсаторы в большинстве случаев представлены только своей емкостью  $C$  или соответствующими ей емкостной проводимостью  $B_C = \omega C$ , емкостным сопротивлением  $X_C = 1/\omega C$ .

### Контрольные вопросы и задачи

1. Напряжение на индуктивной катушке можно представить суммой его составляющих [см. формулы (4.31), (4.33)]. Почему мгновенное напряжение определяется алгебраической суммой составляющих, а для определения действующего значения надо построить векторную диаграмму?

2. Ток в индуктивной катушке выражает уравнение (4.37), а напряжение на конденсаторе — (4.38). Как в общем виде следует написать уравнения напряжений  $u_R$ ,  $u_L$ , и для цепи с индуктивной катушкой? уравнения токов  $i_C$ ,  $i_C$ ,  $i$  для цепи с конденсатором?

3. Действующие значения тока и напряжения в индуктивной катушке связаны между собой выражениями (4.45), а в конденсаторе — формулами (4.46). В чем состоит сходство и различие этих выражений, если их сопоставить соответственно с формулами (4.26) и (4.27), а также с выражениями закона Ома в цепи постоянного тока (2.7) и (2.5)?

4. Графики мгновенной мощности индуктивной катушки (рис. 4.17, а) и конденсатора (рис. 4.17, б) показывают, что в течение периода тока (напряжения) направление потока энергии между источником и приемником меняется четыре раза. В каком направлении поток энергии больше: в цепи с индуктивной катушкой (см. рис. 4.17, а)? в цепи с конденсатором (см. рис. 4.17, б)?

5. Величина коэффициента мощности приемников энергии в цепи переменного тока находится в пределах от 0 до 1. К какому из этих значений ближе коэффициент мощности цепи, график мгновенной мощности которой изображен на рис. 4.17, а? на рис. 4.17, б?

**Задача 4.5.** Для определения параметров индуктивной катушки ее включили к источнику постоянного тока (рис. 4.18, а), а затем в сеть переменного тока (рис. 4.18, б). Показания измерительных приборов при постоянном токе  $I = 4$  А,  $U = 12$  В; при переменном токе  $I_2 = 5$  А;  $U_2 = 25$  В. Определить активное сопротивление и индуктивность катушки; активную, реактивную и полную мощности катушки в цепи переменного тока.

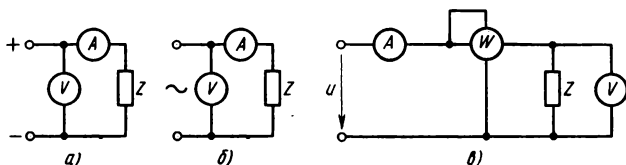


Рис. 4.18

**Задача 4.6.** В цепи переменного тока (рис. 4.18, в) приборы показывают: амперметр 6 А, вольтметр 180 В, ваттметр 360 Вт. Определить соответствующие показаниям приборов активное и реактивное сопротивления, полную и реактивную мощности, если электроприемник имеет параметры: а)  $R, L$ ; б)  $R, C$ .

#### § 4.4. НЕРАЗВЕТВЛЕННАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В неразветвленной цепи все элементы соединены последовательно. На рис. 4.19, а показана схема цепи, в которую входят три элемента: резистор  $R_1$ , конденсатор  $C_2$ , индуктивная катушка  $R_3, L_3$ . На этом примере рассмотрим особенности неразветвленных цепей и найдем формулы для их расчета.

**Векторная диаграмма.** Предположим, что ток в цепи выражается уравнением  $i = I_m \sin \omega t$ .

Мгновенное значение общего напряжения по второму закону Кирхгофа равно сумме мгновенных напряжений на элементах схемы:  $u = u_{1a} + u_{2p} + u_{3p} + u_{3a}$  (цифра индекса указывает номер элемента, буква — характер элемента: а — активный, р — реактивный).

Учитывая несовпадение по фазе слагаемых в правой части равенства, действующее значение общего напряжения выразим векторной суммой

$$U = U_{1a} + U_{2p} + U_{3p} + U_{3a}.$$

Для построения векторной диаграммы находим величины:

$$U_{1a} = IR_1; \quad U_{2p} = IX_2; \quad U_{3p} = IX_3; \quad U_{3a} = IR_3,$$

где  $X_3 = \omega L_3$ ;  $X_2 = 1/\omega C_2$ .

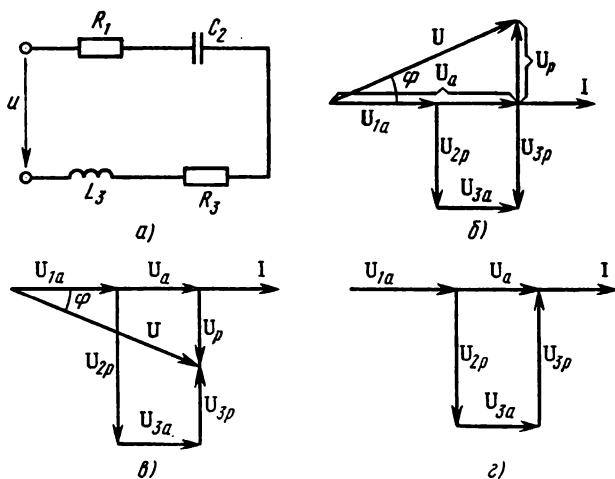


Рис. 4.19

Векторная диаграмма на рис. 4.19, б соответствует этому уравнению. При ее построении первым нанесен вектор тока, а затем проведены векторы падения напряжения на каждом участке схемы, причем направления их относительно вектора тока определены по характеру сопротивления: активные напряжения  $U_{1a}$  и  $U_{3a}$  совпадают по фазе с током, индуктивное напряжение  $U_{3L} = U_{3p}$  опережает ток на  $90^\circ$ , емкостное напряжение  $U_{2C} = U_{2p}$  отстает от тока на такой же угол.

На векторной диаграмме видно, что активные напряжения  $U_{1a}$  и  $U_{3a}$  направлены одинаково, вдоль вектора тока, поэтому векторное сложение их можно заменить арифметическим и найти активную составляющую вектора напряжения всей цепи:  $U_a = U_{1a} + U_{3a}$ .

Векторы реактивных напряжений  $U_{2p}$  и  $U_{3p}$  перпендикулярны вектору тока, причем индуктивное напряжение направлено в одну сторону, а емкостное — в другую. Поэтому векторную сумму их можно заменить алгебраической суммой, в которой индуктивное напряжение принимают положительным, а емкостное — отрицательным:  $U_p = U_{3p} - U_{2p} = U_{3L} - U_{2C}$ .

**Расчетные формулы.** Векторы активного, реактивного и полного напряжений цепи на диаграмме рис. 4.19, б образуют прямоугольный треугольник, аналогичный изображенному на рис. 4.13, в для индуктивной катушки.

По аналогии можно написать и расчетные формулы для любой неразветвленной цепи с одним источником питания и произвольным составом резисторов, индуктивных катушек и конденсаторов. Для этого в формулах, полученных в § 4.3, следует заменить величины, относящиеся к индуктивной катушке ( $U_R$ ;  $U_L$ ;  $R$ ;  $X_L$ ;  $P$ ;  $Q_L$ ), одноименными величинами, относящимися к неразветвленной цепи в целом (соответственно:  $U_a = \sum U_R$ ;  $U_p = \sum U_L - \sum U_C$ ;  $R = \sum R_n$ ;  $X = \sum X_L - X_C$ ;  $P = \sum P_n$ ;  $Q = \sum Q_L - \sum Q_C$ ).

В зависимости от соотношения индуктивного и емкостного сопротивлений для схемы рис. 4.19, а возможны три случая. В первом случае  $X_L > X_C$ ; векторная диаграмма уже рассмотрена на рис. 4.19, б. В данном случае  $U_L > U_C$ , поэтому общее напряжение опережает по фазе ток на угол  $\varphi > 0$  (фазовые углы отсчитывают от вектора тока).

При  $X_L < X_C$   $U_L < U_C$ , поэтому общее напряжение отстает от тока на угол  $\varphi < 0$  (см. векторную диаграмму на рис. 4.19, в).

**Резонанс напряжений.** В электрических цепях переменного тока, в которых имеются участки с индуктивностью и емкостью, при определенных условиях наблюдается явление резонанса.

Рассмотрим третий случай для цепи рис. 4.19, а при  $X_L = X_C$ . Ток во всех элементах один и тот же, поэтому реактивные напряже-



ния  $U_L$  и  $U_C$  равны по величине, но находятся в противофазе (рис. 4.19, з), т. е. взаимно скомпенсированы. Реактивная составляющая напряжения, реактивное сопротивление и реактивная мощность всей цепи равны нулю, полное сопротивление  $Z = R$ , а ток  $I = U/R$ ; на входе цепи напряжение и ток совпадают по фазе ( $\varphi = 0$ ). В данном случае рассматриваемая цепь находится в режиме резонанса напряжений. Явление резонанса в участке электрической цепи, содержащем индуктивный и емкостный элементы, соединенные последовательно, называется резонансом напряжений.

Резонанс возникает при определенной частоте источника, которую называют резонансной частотой  $\omega_p$ .

Из условия резонанса напряжений  $X_L = X_C$  или  $\omega_p L = 1/\omega_p C$  следуют выражения резонансной частоты:

$$\omega_p = 1/\sqrt{LC}; \quad f_p = 1/2\pi \sqrt{LC}. \quad (4.60)$$

Режим резонанса напряжений можно установить изменением параметров  $L$  и  $C$  при постоянной частоте источника  $\omega$  или изменением частоты источника энергии при постоянных параметрах  $L$  и  $C$ . При увеличении частоты  $X_L = \omega L$  увеличивается пропорционально частоте,  $X_C = 1/\omega C$  — уменьшается по закону обратной пропорциональности (рис. 4.20, а).

Полное сопротивление цепи  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$  имеет наименьшее значение  $Z_p = R$  при резонансной частоте, так как  $X_L = X_C$ , а при отклонениях частоты от резонансной в ту и другую сторону

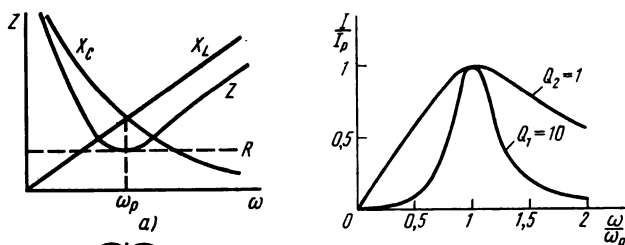


Рис. 4.21

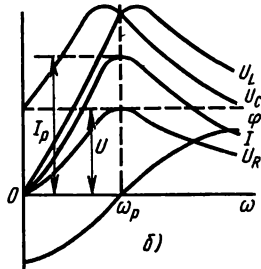


Рис. 4.20

увеличивается с ростом этого отклонения. Зависимость тока и других величин от частоты показана на рис. 4.20, б.

Величина реактивного сопротивления (индуктивного или емкостного) при резонансе напряжений является одной из характеристик колебательной системы. Ее называют волновым сопротивлением  $Z_b$ :

$$\omega_p L = 1/\omega_p C = \sqrt{L/C} = Z_b;$$

$$U_L = U_C = I Z_b = U Z_b / R.$$

При  $Z_b > R$  реактивные напряжения больше активного. Превышение может оказаться значительным, если реактивные сопротивления много больше активного и изоляция катушки или конденсатора может быть пробита.

На практике подобный случай возможен, если на конце кабельной линии включается электроприемник с индуктивностью.

Резонансные явления широко используются в радиотехнике. Качество последовательного резонансного контура считается тем выше, чем больше отношение  $Q = Z_b/R$ , которое называют добротностью контура. Чем больше мощность потерь энергии в контуре (этому соответствует меньшее значение  $R$ ), тем больше добротность, тем острее резонансная кривая. На рис. 4.21 показаны в относительном выражении резонансные кривые при двух значениях добротности.

#### *Контрольные вопросы и задачи*

1. В неразветвленной цепи  $R, L, C$  в течение полупериода тока (или напряжения) запасается энергия магнитного и электрического полей. Какой энергии запасается больше при  $X_L > X_C$ ? при  $X_L < X_C$ ? при  $X_L = X_C$ ?

2. При определении полного сопротивления неразветвленной цепи переменного тока применяют формулу  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ , а общую величину реактивного сопротивления цепи  $X$  находят алгебраическим сложением индуктивных и емкостных сопротивлений участков. Почему в данном случае при определении  $X$  и  $Z$  сопротивления не складывают арифметически?

3. Как следует записать расчетные формулы для неразветвленной цепи с произвольным количеством элементов (резисторов, индуктивных катушек, конденсаторов) по аналогии с формулами для индуктивной катушки (см. § 4.3)?

4. Характер изменения тока в неразветвленной цепи с параметрами  $R, L, C$  в зависимости от частоты источника показаны на рис. 4.20, б. Как можно обнаружить состояние резонанса в указанной цепи с помощью электроизмерительных приборов?

5. На рис. 4.20 показаны частотные характеристики последовательного резонансного контура, в том числе зависимость от частоты угла сдвига фаз между напряжением и током. Как объяснить характер изменения угла  $\varphi$  от частоты?

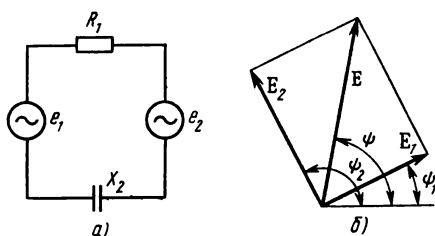


Рис. 4.22

**Задача 4.7.** В сеть переменного тока с напряжением  $U = 220$  В и частотой  $f = 50$  Гц включены последовательно резистор  $R_1 = 5$  Ом, индуктивная катушка  $R_2 = 3$  Ом,  $L_2 = 38$  мГн и конденсатор  $C_3 = 530$  мкФ. Определить активную, реактивную и полную мощности резистора, индуктивной катушки, конденсатора и всей цепи.

**Задача 4.8.** Определить ток и составить баланс мощностей для цепи, схема которой изображена на рис. 4.22, а. Дано:  $R_1 = 20$  Ом,  $X_2 = 15$  Ом;  $e_1 = 169 \sin(314t + 30^\circ)$ ;  $e_2 = 226 \sin(314t + 120^\circ)$ . На рис. 4.22, б показано определение общей э.д.с.  $E$  в цепи.

#### § 4.5. РАЗВЕТВЛЕННАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Разветвленная цепь содержит ветви, соединенные параллельно. Для примера рассмотрим цепь (рис. 4.23, а), в которой параллельно соединены резистор  $R_1$ , индуктивная катушка  $R_3$ ,  $L_3$ , конденсатор без потерь  $C_2$ , т. е. те же элементы, которые в схеме рис. 4.22, а соединены последовательно.

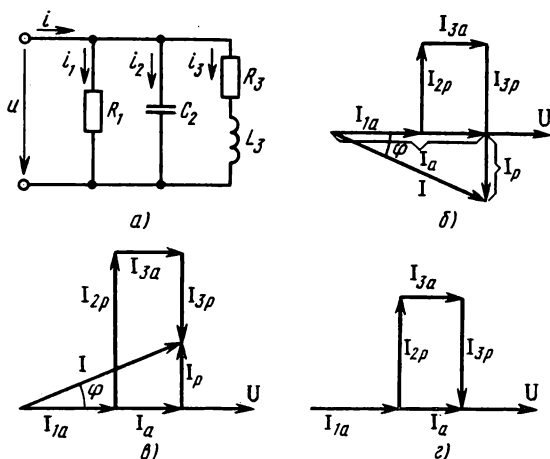


Рис. 4.23

**Векторная диаграмма.** Предположим, что напряжение в цепи выражается уравнением  $u = U_m \sin \omega t$ .

Мгновенное значение общего тока (в неразветвленной части цепи) равно сумме мгновенных значений токов в ветвях (по первому закону Кирхгофа):  $i = i_1 + i_2 + i_3 = i_{1a} + i_{2p} + i_{3a} + i_{3p}$ . Для действующих значений запишем векторную сумму  $\mathbf{I} = \mathbf{I}_{1a} + \mathbf{I}_{2p} + \mathbf{I}_{3a} + \mathbf{I}_{3p}$ . Для построения векторной диаграммы находим значения токов

$$I_{1a} = I_1 = U/R_1 = UG_1; \quad I_{3a} = I_3 \cos \varphi_3 = UR_3/Z_3^2 = UG_3;$$

$$I_{3p} = I_3 \sin \varphi_3 = UX_3/Z_3^2 = UB_3; \quad I_{2p} = I_2 = U/X_2 = UB_2,$$

где  $G_1 = 1/R_1$  — активная проводимость первой ветви;  $B_2 = 1/X_2$  — реактивная (емкостная) проводимость второй ветви;  $G_3 = R_3/Z_3^2$  — активная проводимость третьей ветви;  $B_3 = X_3/Z_3^2$  — реактивная (индуктивная) проводимость третьей ветви.

Векторная диаграмма на рис. 4.23, б соответствует полученному векторному уравнению токов. При ее построении первым нанесен вектор напряжения, а затем проведены векторы активных и реактивных токов, причем направления их относительно векторов напряжения определены по характеру проводимостей: активные токи  $I_{1a}$ ,  $I_{3a}$  совпадают по фазе с напряжением, индуктивный ток  $I_1 = I_{3p}$  отстает от напряжения, а емкостный ток  $I_{2c} = I_{2p}$  опережает напряжение на  $90^\circ$ .

На векторной диаграмме видно, что активные токи  $\mathbf{I}_{1a}$ ,  $\mathbf{I}_{3a}$  направлены одинаково, вдоль вектора напряжения, поэтому векторное сложение их можно заменить арифметическим и найти активную составляющую вектора общего тока:  $I_a = I_{1a} + I_{3a}$ .

Векторы реактивных токов  $\mathbf{I}_{2p}$  и  $\mathbf{I}_{3p}$  перпендикулярны вектору напряжения, но направлены в противоположные стороны. Поэтому векторная сумма их равна алгебраической сумме, в которой индуктивный ток принимают положительным, а емкостный — отрицательным:  $I_p = I_{3p} - I_{2p} = I_{3L} - I_{2C}$ .

**Расчетные формулы.** Векторы активного, реактивного и полного токов цепи образуют прямоугольный треугольник, аналогичный изображенному на рис. 4.14, в для конденсатора с потерями энергии. По аналогии можно написать и расчетные формулы для любой разветвленной цепи с двумя узловыми точками, одним источником питания и произвольным количеством ветвей, содержащих резисторы, индуктивные катушки и конденсаторы. Для этого в формулах, полученных в § 4.3, следует заменить величины, относящиеся к конденсатору с потерями энергии ( $I_G$ ;  $I_C$ ;  $G$ ;  $B_C$ ;  $P$ ;  $Q_C$ ), одноименными величинами, относящимися к неразветвленной цепи

в целом (соответственно:  $I_a = \sum I_G$ ;  $I_p = \sum I_L - \sum I_C$ ;  $G = \sum G_n$ ;  $B = \sum B_L - \sum B_C$ ;  $P = \sum P_n$ ;  $Q = \sum Q_L - \sum Q_C$ ).

В зависимости от соотношения индуктивной и емкостной проводимости для схемы рис. 4.23, а возможны три случая.

В первом из них  $B_L > B_C$ , векторная диаграмма уже рассмотрена по рис. 4.23, б. В данном случае  $I_L > I_C$ , поэтому общий ток отстает по фазе от напряжения на угол  $\varphi > 0$  (фазовые углы отсчитывают от вектора тока). При  $B_L < B_C$   $I_L < I_C$ , поэтому общий ток опережает напряжение на угол  $\varphi < 0$  (см. векторную диаграмму на рис. 4.23, в).

**Резонанс токов.** В третьем случае  $B_L = B_C$ . Напряжение во всех ветвях одно и то же, поэтому реактивные токи ветвей  $I_L$  и  $I_C$  равны по величине, но находятся в противофазе (рис. 4.23, з). Реактивный ток, проводимость и мощность всей цепи равны нулю; полная проводимость  $Y = G$ , а напряжение  $U = I/G$ ; общее напряжение совпадает по фазе с током ( $\varphi = 0$ ). В данном случае рассматриваемая цепь находится в режиме резонанса токов.

Явление резонанса в участке электрической цепи, содержащем индуктивный и емкостный элементы, соединенные параллельно, называется резонансом токов.

Предположим, что в схеме рис. 4.23, а активное сопротивление третьей ветви  $R_3 = 0$ , тогда реактивная проводимость этой ветви  $B_3 = B_L = 1/\omega L$ .

Из условия резонанса токов  $B_L = B_C$  или  $1/\omega_p L = \omega_p C$  получим выражение резонансной частоты, такое же, как для режима резонанса напряжений [см. формулы (4.60)]. На рис. 4.24 показаны частотные характеристики такого параллельного контура.

При резонансе токов общая проводимость цепи наименьшая и равна активной проводимости цепи  $Y = G$ , поэтому ток в цепи наименьший.

Величина реактивной проводимости (индуктивной или емкостной) при резонансе токов является одной из характеристик колебательной системы, ее называют волновой проводимостью

$$Y_b = \omega_p C = 1/\omega_p L = \sqrt{C/L};$$

$$I_L = I_C = UY_b = Y_b/G.$$

Из последней формулы следует, что при  $Y_b > G$  токи в реак-

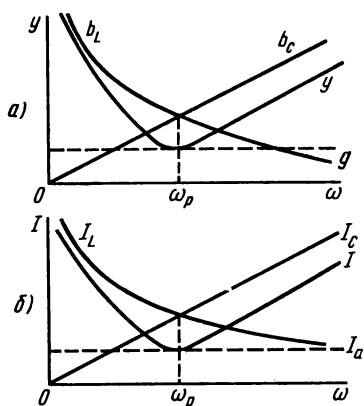


Рис. 4.24

тивных ветвях схемы больше тока в неразветвленной ее части. Качество параллельного контура считают тем выше, чем больше его добротность  $Q$ , которую определяют отношением проводимостей — волновой к активной  $Q = Y_v/G = R/\omega_p L = \omega_p C R$ .

Из этой формулы также следует, что при меньших потерях энергии в цепи (этому соответствуют большие значения сопротивления  $R$ ) добротность контура выше.

Если параметры реальных катушек и конденсаторов  $R, L, C$  задавать применительно к их схемам, замещения с последовательным соединением активных и реактивных элементов, то условие резонанса токов — равенство реактивных проводимостей ветвей  $B_2 = B_3$  — остается в силе и в этом случае.

Равенство  $\frac{X_L}{R_3^2 + X_L^2} = \frac{X_C}{R_2^2 + X_C^2}$  является исходным для определения резонансной частоты, которая выражается формулой

$$\omega_p = \sqrt{1/LC} \sqrt{\frac{L/C - R_3^2}{L/C - R_2^2}}$$

Из этого выражения видно, что резонансная частота зависит от активных сопротивлений катушки и конденсатора.

Если потери энергии в катушке и конденсаторе малы ( $R_2$  и  $R_3$  можно приравнять к нулю), для резонансной частоты получается выражение, найденное раньше для идеализированной цепи формулы (4.60).

#### *Контрольные вопросы и задачи*

1. В разветвленной цепи (см. рис. 4.23, а), содержащей элементы с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью, в течение полупериода напряжения (или тока) запасается энергия магнитного и электрического полей. Какой энергии запасается меньше при  $B_L > B_C$ ? при  $B_L < B_C$ ? при  $B_L = B_C$ ?

2. При определении полной проводимости разветвленной цепи переменного тока с двумя узлами применяют формулу  $Y = \sqrt{G^2 + B^2}$ , а общее значение реактивной проводимости цепи  $B$  находят алгебраическим сложением реактивных проводимостей ветвей. Почему в данном случае проводимости  $B$  и  $Y$  нельзя определить простой арифметической суммой?

3. Как следует записать расчетные формулы для разветвленной цепи с произвольным количеством параллельно соединенных элементов (резисторов, индуктивных катушек, конденсаторов) по аналогии с формулами для конденсатора с потерями (см. § 4.3)?

4. Характер изменения тока в разветвленной цепи с параметрами  $R, L, C$  в зависимости от частоты источника показан на рис. 4.24, б. Как обнаружить состояние резонанса в данной цепи с помощью электроизмерительных приборов?

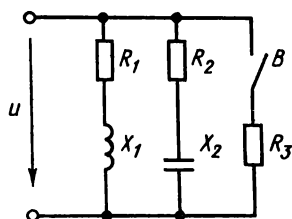


Рис. 4.25

5. При высокой добротности колебательных контуров резонансная кривая (см. рис. 4.21) более узкая. В чем преимущество узкой кривой по сравнению с широкой с точки зрения радиотехники?

**Задача 4.9.** Определить токи и мощности на входе цепи рис. 4.25 при разомкнутом выключателе  $B$ . Дано:  $U = 100$  В,  $R_1 = 4$  Ом,  $X_1 = 3$  Ом,  $R_2 = 6$  Ом,  $X_2 = 8$  Ом.

**Задача 4.10.** Определить ток, напряжение и мощность на входе цепи рис. 4.24 при замкнутом выключателе  $B$ . Дано:  $I_3 = 10$  А,  $R_1 = 6$  Ом,  $R_2 = 20$  Ом,  $R_3 = 20$  Ом,  $X_1 = 8$  Ом,  $X_2 = 15$  Ом,  $X_3 = 0$ .

## ГЛАВА 5

### ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

В гл. 4 отмечено, что в современной электроэнергетике используется в основном переменный электрический ток. Для получения, передачи и распределения электрической энергии применяют трехфазные электрические системы. Все элементы трехфазной системы впервые разработал выдающийся русский инженер-изобретатель М. О. Доливо-Добровольский (1861—1919). В короткий период им были созданы трехфазные устройства: генератор с вращающимся магнитным полем (1888), асинхронный двигатель с короткозамкнутой обмоткой ротора (1889), трансформатор (1890) и др. В 1891 г. на Всемирной электротехнической выставке М. О. Доливо-Добровольский демонстрировал первую в мире трехфазную линию электропередачи на расстояние 175 км.

*Трехфазная система электрических цепей представляет собой совокупность трех цепей, в которых действуют три синусоидальные э.д.с. одной и той же частоты, сдвинутые относительно друг друга по фазе и создаваемые общим источником энергии.*

Трехфазная система электрических цепей, в которой отдельные фазы электрически соединены друг с другом, называется трехфазной цепью.

#### § 5.1. СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Источниками электрической энергии в трехфазных цепях являются трехфазные генераторы или трансформаторы. Их ус-

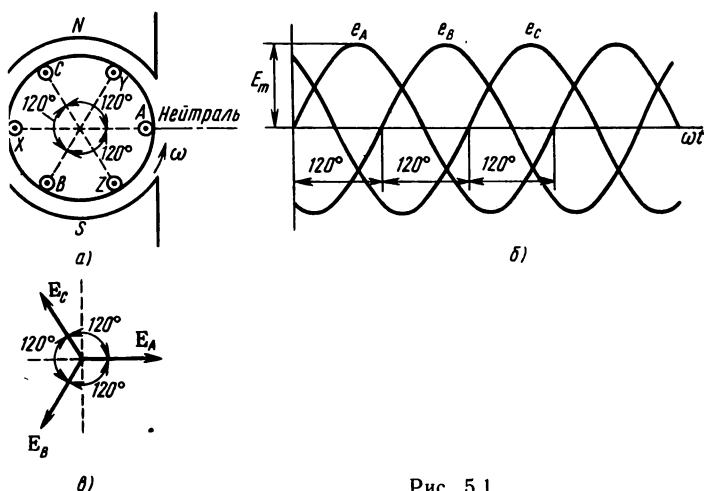


Рис. 5.1

тройство, основные характеристики изложены в гл. 7, 8. Здесь же рассмотрим общие сведения о трехфазных системах.

**Трехфазная симметричная система э.д.с.** Трехфазный генератор имеет три самостоятельные обмотки, сдвинутые в пространстве между собой на углы  $2\pi/3$  или  $120^\circ$ . Это показано на рис. 5.1, а. Если числа витков в обмотках одинаковы, то при вращении ротора в них наводятся э.д.с. одинаковой величины. Начальные фазы э.д.с. сдвинуты между собой на  $120^\circ$  в соответствии с пространственным расположением обмоток.

Система из трех э.д.с., равных по амплитуде, имеющих одинаковую частоту, сдвинутых по фазе относительно друг друга на углы  $2\pi/3$ , называется симметричной трехфазной системой э.д.с.

Положение обмоток на рис. 5.1, а будем считать начальным и, принимая вращение ротора против часовой стрелки, уравнения э.д.с. получим в виде:

$$e_A = E_m \sin \omega t;$$

$$e_B = E_m \sin (\omega t - 120^\circ);$$

$$e_C = E_m \sin (\omega t + 120^\circ).$$

Этим уравнениям соответствуют графики э.д.с. и векторная диаграмма на рис. 5.1, б, в.

Векторы э.д.с., вращающиеся также против часовой стрелки, мимо неподвижной оси проходят в порядке:  $E_A \rightarrow E_B \rightarrow E_C$ . Такой порядок чередования называют прямой последователь-



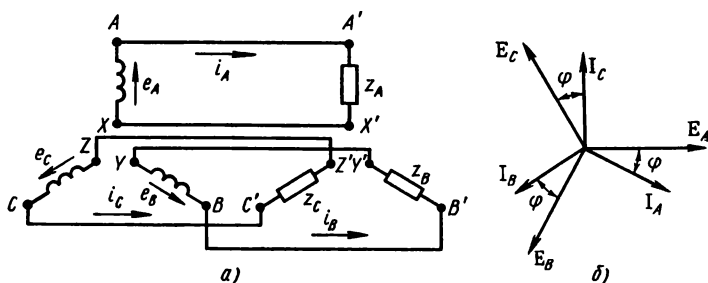


Рис. 5.2

ностью фаз (в отличие от обратной последовательности, которая получается при вращении ротора в обратную сторону).

На схемах замещения обмотки трехфазного генератора обозначают, как показано на рис. 5.2, а, и условно принимают положительными направления э.д.с. от концов  $X, Y, Z$  к началам  $A, B, C$ . Соответствующая векторная диаграмма э.д.с. и токов показана на рис. 5.2, б.

Каждую обмотку источника можно соединить с отдельным приемником и получить три независимые цепи, каждую со своим током  $i_A, i_B, i_C$ . Однако источник и приемники в такой несвязанной системе соединены шестью проводами, что невыгодно с экономической точки зрения.

Сокращение числа соединительных проводов достигается в связанных системах, где обмотки генератора, как и фазы приемника, соединены звездой или треугольником.

**Соединение обмоток источника звездой.** Из несвязанной системы обмоток источника легко получить соединение их звездой. Для этого концы обмоток источника  $X, Y, Z$  надо соединить в точке  $O$  (нулевая точка, или нейтраль), три провода, соединяющие концы обмоток с приемником, заменить одним (рис. 5.3, а) или отключить

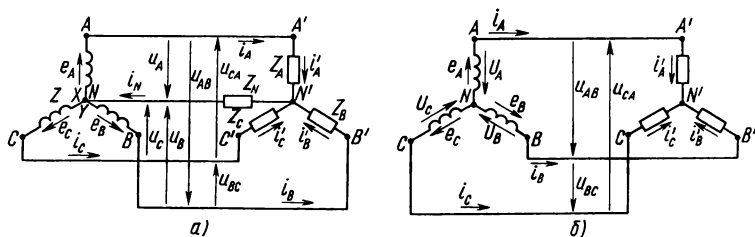


Рис. 5.3

(рис. 5.3, б). Провода, соединяющие начала обмоток с приемником (линейные провода) сохраняются, в результате получается четырехпроводная (с нулевым проводом) или трехпроводная трехфазная цепь.

В трехфазных цепях различают фазные и линейные напряжения. **Фа з н о е н а п р я ж е н и е** — разность потенциалов между линейным проводом и нейтралью ( $U_A, U_B, U_C$  на рис. 5.3, а, б). Этому определению соответствует и фазное напряжение источника, равное разности потенциалов между началом и концом каждой его обмотки; оно отличается от э.д.с. на величину падения напряжения в обмотке. Если сопротивлениями обмоток можно пренебречь или рассматривать трехфазный источник без нагрузки (холостой ход), то фазные напряжения источника равны соответствующим э.д.с. В симметричной системе они изображаются так же, как и э.д.с., тремя векторами  $U_A, U_B, U_C$  (рис. 5.4, а, б), равными по величине и сдвинутыми по фазе на  $120^\circ$  (общее обозначение  $U_\phi$ ).

**Линейное напряжение** — разность потенциалов между двумя линейными проводами ( $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  на рис. 5.3, а, б).

Если принять потенциал нулевой точки  $O$  источника равным нулю, то потенциалы его линейных зажимов (начал обмоток) равны соответственно фазным напряжениям  $U_A, U_B, U_C$  и в каждое мгновение отличаются один от другого из-за наличия сдвига фаз между ними. Следовательно, мгновенные значения линейных напряжений в общем случае не равны нулю и выражаются разностями:  $U_{AB} = U_A - U_B$ ;  $U_{BC} = U_B - U_C$ ;  $U_{CA} = U_C - U_A$ , а действующие значения — в векторной форме:  $U_{AB} = U_A - U_B$ ;  $U_{BC} = U_B - U_C$ ;  $U_{CA} = U_C - U_A$ .

Согласно этим выражениям на рис. 5.4, а построена векторная диаграмма, из которой видно, что при симметричной системе фазных напряжений система линейных напряжений тоже симметрична:  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  равны по величине и сдвинуты по фазе относительно друг друга на  $120^\circ$  (общее обозначение  $U_\pi$ ).

Действующие значения линейных напряжений можно опреде-

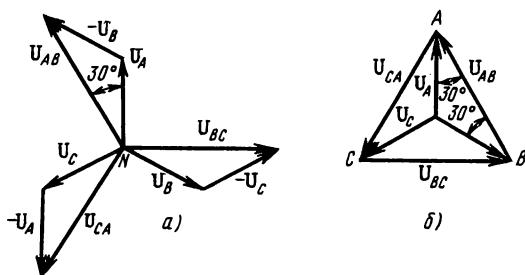


Рис. 5.4

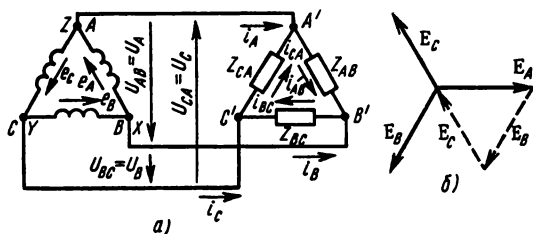


Рис. 5.5

лечь графически по векторной диаграмме или по формуле (5.1), которая следует из треугольника, образованного векторами двух фазных и одного линейного напряжений:

$$U_{\text{л}} = 2U_{\text{ф}} \cos 30^\circ,$$

или

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}}. \quad (5.1)$$

Векторную диаграмму удобно выполнить топографической (рис. 5.4, б), тогда каждой точке цепи соответствует определенная точка на диаграмме. (Вектор, проведенный между двумя точками топографической диаграммы, выражает по величине и фазе напряжение между одноименными точками цепи.)

**Соединение обмоток источника треугольником.** При соединении треугольником из трех обмоток источника образуется замкнутый контур, причем начало одной обмотки соединяется с концом другой (на рис. 5.5, а точки X, B; Y, C; Z, A). Такое соединение обмоток возможно, так как в симметричной трехфазной системе сумма э.д.с. в контуре равна нулю (рис. 5.5, б).

Линейные провода с одной стороны присоединены к началам обмоток источника, а с другой — к приемнику и при такой схеме фазные и линейные напряжения совпадают:  $U_{AB} = U_A$ ;  $U_{BC} = U_B$ ;  $U_{CA} = U_C$ .

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}. \quad (5.2)$$

### Контрольные вопросы и задачи

1. В крупных генераторах, работающих на электростанциях, обмотки неподвижны (расположены на статоре), а магнитные полюса вращаются (расположены на роторе). Предположим, что вдоль воздушного зазора обмотки и полюса расположены так же, как на схеме рис. 5.1. В каком направлении надо вращать ротор с полюсами, чтобы получить в обмотках э.д.с. с прямой последовательностью фаз?

2. К трехфазному источнику подключен трехфазный приемник. Как можно изменить последовательность фаз напряжения на приемнике, не изменяя ее на зажимах источника?

3. Когда трехфазный генератор нагружен, в его обмотках и в линии, соединяющей его с электроприемником, имеются токи. В какой схеме (звезда или треугольник) ток в фазе генератора равен току в линейном проводе?

4. Предположим, что, соединяя обмотки генератора звездой, конец одной фазы случайно приняли за начало. Можно ли в этом случае линейные напряжения генератора определить по формуле (5.1)?

5. Предположим, что, соединяя обмотки генератора треугольником, конец одной фазы соединили с концом другой. Допустимо ли ротор такого генератора привести во вращение?

**Задача 5.1.** В каждой фазе трехфазного генератора наводится э.д.с.  $E_\phi = 127$  В. Начертить схемы, построить векторные диаграммы и определить линейные напряжения при холостом ходе, если в общую точку соединены зажимы обмоток: а)  $X, Y, Z$ ; б)  $X, Y, C$ ; в)  $X, B, Z$ ; г)  $X, B, C$ ; д)  $A, B, C$ .

**Задача 5.2.** В каждой фазе трехфазного генератора наводится э.д.с.  $E_\phi = 400$  В. Начертить схемы, построить векторные диаграммы и определить общую э.д.с. в контуре, если соединены между собой зажимы обмоток: а)  $A-Z, B-X, C-Y$ ; б)  $A-C, B-X, Y-Z$ ; в)  $A-Z, X-Y, B-C$ ; г)  $X-Z, A-B, C-Y$ ; д)  $A-Y, B-Z, C-X$ .

## § 5.2. СИММЕТРИЧНЫЕ ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

Для приемников энергии в трехфазных цепях применяют известные уже схемы соединения — звездой и треугольником. На рис. 5.3, а, б и 5.5, а они показаны вместе с источниками в общих схемах связанных трехфазных систем.

В связанной системе, так же как и в несвязанной, каждая фаза представляет собой замкнутую цепь. Ток в этой цепи определяется, как обычно, величинами напряжения и сопротивления. Фазное напряжение в приемнике меньше, чем в источнике на величину падения напряжения в проводах линии. Однако если сопротивлением проводов можно пренебречь, то фазное напряжение в приемнике считают таким же, как в источнике.

В трехфазных цепях различают фазные и линейные токи (общие обозначения действующих значений  $I_\phi, I_\lambda$ ). Токи в фазах источника и приемника называют **ф а з н ы м и** (на рис. 5.5, а  $i_{AB}, i_{BC}, i_{CA}$ ). Токи в линейных проводах называют **л и н е й н ы м и** (на рис. 5.5, а  $i_A, i_B, i_C$ ).

Трехфазная цепь, в которой активные и реактивные сопротивления составляющих ее фаз одинаковы, называется **с и м м е т р и ч н о й**.

В симметричной трехфазной цепи при симметричной системе фазных напряжений система токов также симметрична: отдельные

токи симметричной системы равны по амплитуде и сдвинуты по фазе относительно друг друга на равные углы  $2\pi/3$ .

Симметричными приемниками электрической энергии являются, например, трехфазные электродвигатели, которые имеют три одинаковые обмотки, соединяемые звездой или треугольником.

**Соединение приемника треугольником.** При соединении приемника треугольником (рис. 5.5, а) три его фазы образуют замкнутый контур. Общие точки двух фаз приемника (начало одной фазы и конец другой) связаны с началами фаз источника линейными проводами. Таким образом, независимо от схемы соединения фаз источника каждая фаза приемника находится под линейным напряжением, которое в данном случае является и фазным напряжением приемника.

Под действием фазных напряжений в приемнике образуются фазные токи, положительные направления которых указаны на схеме рис. 5.5, а в соответствии с положительным направлением э.д.с. в фазах источника.

Точки  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  приемника являются электрическими узлами, поэтому можно написать векторные уравнения по первому закону Кирхгофа:  $I_A = I_{AB} - I_{CA}$ ;  $I_B = I_{BC} - I_{AB}$ ;  $I_C = I_{CA} - I_{BC}$ . Этим уравнениям соответствует векторная диаграмма на рис. 5.6.

Действующие значения линейных токов в симметричной трехфазной цепи при соединении приемника треугольником можно определить графически по векторной диаграмме или формуле (5.3), которая получена из треугольника, образованного векторами двух фазных и одного линейного тока аналогично формуле (5.1):

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}. \quad (5.3)$$

**Соединение приемника звездой.** Соединение фаз приемника звездой (см. схемы рис. 5.3, а, б) может быть выполнено независимо от схемы соединения фаз источника. При соединении источника

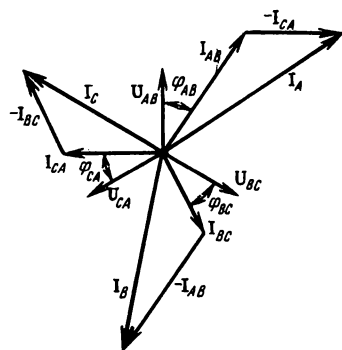


Рис. 5.6

треугольником трехфазная цепь трехпроводная, а при соединении звезда — звезда цепь может быть трех- и четырехпроводной (с нулевым проводом).

Во всех случаях при соединении приемника звездой в точках перехода из линии в фазы нет разветвлений, поэтому фазные и линейные токи одинаковы в каждой фазе:

$$i_A = i'_A; i_B = i'_B; i_C = i'_C$$

или в общем виде

$$I_n = I_\phi. \quad (5.4)$$

Ток в нулевом проводе четырехпроводной цепи равен векторной сумме токов в фазах  $I_N = I_A + I_B + I_C$ . Если фазные токи представляют симметричную систему, то их сумма равна нулю и нулевой провод не нужен. Поэтому симметричные трехфазные цепи независимо от схемы соединения источника и приемника выполняют трехпроводными.

**Расчет симметричных трехфазных цепей.** Задача расчета трехфазной цепи состоит в определении токов в фазах приемника, в проводах линии, а также мощности приемника в каждой фазе и в целом, если заданы линейные напряжения, сопротивления фаз. Может быть поставлена и обратная задача.

В симметричной цепи сопротивления фаз приемника одинаковы и на его зажимах действует симметричная система линейных напряжений при любой схеме соединения источника (звездой или треугольником). Поэтому на расчетной схеме источник (генератор или трансформатор) часто не показывают и говорят, что приемник включен в трехфазную сеть. Для такой цепи достаточно провести расчет одной фазы, так как токи и мощности во всех фазах по величине одинаковы.

Заметим, что для каждой фазы трехфазной цепи применимы все формулы, полученные ранее для однофазных цепей, в том числе:

$$Z_\phi = \sqrt{R_\phi^2 + X_\phi^2}; \quad \cos \varphi = R_\phi / Z_\phi; \quad \sin \varphi = X_\phi / Z_\phi.$$

Порядок решения прямой задачи записан в табл. 5.1.

Т а б л и ц а 5.1

Определяемые величины	Соединение звездой	Соединение треугольником
Фазное напряжение	$U_\phi = U_n / \sqrt{3}$	$U_\phi = U_n$
Фазный ток	$I_\phi = U_\phi / Z_\phi$	$I_\phi = U_\phi / Z_\phi$
Линейный ток	$I_n = I_\phi$	$I_n = \sqrt{3} U_\phi$
Мощность одной фазы:		
активная	$P = U_\phi I_\phi \cos \varphi$	
реактивная	$Q = U_\phi I_\phi \sin \varphi$	
полная	$S = U_\phi I_\phi$	
Мощность трехфазной цепи:		
активная	$P = 3 U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3} U_n I_n \cos \varphi$	(5.5)
реактивная	$Q = 3 U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3} U_n I_n \sin \varphi$	(5.6)
полная	$S = 3 U_\phi I_\phi = \sqrt{3} U_n I_n$	(5.7)

### *Контрольные вопросы и задачи*

1. При симметричной нагрузке токи во всех фазах трехфазной цепи равны по величине и образуют симметричную систему токов. На какой угол и в какую сторону сдвинута по фазе звезда линейных токов относительно звезды фазных токов в трехфазной цепи при соединении приемника треугольником?

2. Как можно доказать, что в четырехпроводной симметричной цепи ток в нулевом проводе равен нулю?

3. Почему при соединении звездой токи в фазе приемника и в линии одинаковы, а при соединении треугольником они различны по величине и фазе?

4. Независимо от схемы соединения приемника (звезда, треугольник) мощность симметричной трехфазной цепи определяют по одинаковым формулам (см. табл. 5.1). Почему формулы для определения мощностей при соединении приемников звездой и треугольником одинаковы?

5. Трехфазный электродвигатель имеет обмотки, которые можно соединить звездой или треугольником. Как изменится мощность двигателя, если его включить в одну и ту же электрическую сеть, соединив обмотки сначала звездой, а затем треугольником?

**Задача 5.3.** Осветительная установка здания имеет 150 электрических ламп с номинальной мощностью 60 Вт. Каждая при номинальном напряжении  $U_{ном} = 220$  В. Лампы включены в трехфазную сеть с линейным напряжением  $U_d = 220$  В и образуют симметричную нагрузку. Определить фазные и линейные токи, мощность осветительной нагрузки в каждой фазе и всей цепи. Выполнить решение задачи, если  $U_{ном} = 127$  В, а напряжение в сети то же  $U_d = 220$  В.

**Задача 5.4.** К трехфазному трансформатору включены электрические лампы мощностью 40 Вт каждая по 100 ламп в фазе и электродвигатель номинальной мощностью  $P_{ном} = 10$  кВт, имеющий к.п.д.  $\eta = 85\%$ ,  $\cos \varphi = 0,8$ . Определить токи в линии в двух случаях: а) электроприемники соединены звездой, линейное напряжение вторичной обмотки трансформатора  $U_d = 380$  В; б) электроприемники соединены треугольником, линейное напряжение на вторичной стороне трансформатора  $U_d = 220$  В.

### **§ 5.3. ТРЕХФАЗНЫЕ НЕСИММЕТРИЧНЫЕ ЦЕПИ**

Несимметрия трехфазных цепей чаще всего обусловлена различием нагрузки в фазах. Сопротивления фаз могут быть не одинаковы по величине или по составу активных и реактивных элементов.

Несимметрию создают однофазные приемники, например лампы электрического освещения. Если при проектировании осветительную нагрузку разделить по фазам поровну, то в процессе эксплуатации нагрузка, как правило, будет несимметричной из-за неодновременности включения ламп.

Симметричная в нормальном режиме трехфазная цепь становится несимметричной в аварийных ситуациях (обрывы проводов, короткие замыкания в линии или в фазах приемника).

**Соединение источника и приемника звездой.** Рассмотрим сначала четырехпроводную схему с нулевым проводом, сопротивление которого  $Z_N$  (см. рис. 5.3, а).

При этом сделаем некоторые упрощения: сопротивления линейных проводов считаем равными нулю. При таком упрощении потенциалы линейных зажимов источника и приемника (например, точек  $A, A'$ ) можно считать одинаковыми, что на векторной топографической диаграмме отражается совмещением этих точек (рис. 5.7).

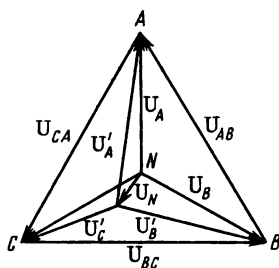


Рис. 5.7

Вместе с тем нулевые точки источника и приемника  $N, N'$  не совпадают, так как в нулевом проводе имеется ток  $I_N$  и падение напряжения  $U_N = I_N Z_N$ , которое называют **напряжением смещения нейтрали**.

Из-за смещения нейтрали, несмотря на симметрию фазных напряжений источника  $U_A, U_B, U_C$ , напряжения на фазах приемника  $U'_A, U'_B, U'_C$  не одинаковы.

Система фазных напряжений приемника симметрична при  $U_N = 0$ , а это возможно в двух частных случаях: при симметричной нагрузке, когда  $I_N = 0$  (см. § 5.2); в четырехпроводной системе, если сопротивление нулевого провода равно нулю ( $Z_N = 0$ ).

Нулевой провод принудительно уравнивает потенциалы нейтральных точек источника и приемника, поэтому звезда векторов фазных напряжений приемника точно совпадает со звездой фазных напряжений источника.

Четырехпроводную схему применяют в электрических сетях с напряжением 380/220 В при электроснабжении от общего источника силовой (электродвигатели) и осветительной (электролампы) нагрузки.

При несимметричной нагрузке разрыв нулевого провода ( $Z_N = \infty$ ) вызывает значительное изменение токов и фазных напряжений в приемнике, что в большинстве случаев недопустимо.

**Соединение приемника треугольником.** При соединении приемника треугольником, независимо от схемы источника, линия выполняется трехпроводной.

Система линейных напряжений, как правило, симметрична и каждая фаза приемника находится под соответствующим линейным напряжением (оно же фазное напряжение), которое равно ли-



нейному напряжению источника, если сопротивления проводов линии малы и их можно не учитывать.

Ток в каждой фазе определяется по известным формулам

$$I_{AB} = U_{AB}/Z_{AB}; \quad I_{BC} = U_{BC}/Z_{BC}; \quad I_{CA} = U_{CA}/Z_{CA},$$

где  $Z_{AB}$ ,  $Z_{BC}$ ,  $Z_{CA}$  — полные сопротивления фаз.

Линейные токи можно определить с помощью векторной диаграммы, как показано на рис. 5.6. При несимметричной нагрузке системы фазных и линейных токов несимметричны. Однако изменение нагрузки в фазах приемника не нарушает симметрии напряжений так же, как и при соединении звездой с нулевым проводом.

**Аварийные режимы в трехфазных цепях.** При обрыве проводов, коротких замыканиях в линии или фазах приемника в трехфазной цепи возникает аварийный режим.

Несмотря на то что такие ситуации в электрических сетях возникают относительно редко и имеется надежная защита, аварийные режимы не исключены. Они нежелательны уже потому, что их следствием может быть временный перерыв электроснабжения, тем более что действие защиты направлено чаще всего на отключение аварийного участка.

Обрыв провода (линейного или фазного) в одной фазе при соединении приемника звездой по трехпроводной схеме приводит к полному отсутствию напряжения и тока в этой фазе. Две другие фазы приемника оказываются включенными последовательно под линейное напряжение. Например, при обрыве провода в фазе  $A$  (рис. 5.8,  $a$ ) фазы  $B$  и  $C$  включены последовательно. Если их сопротивления одинаковы, то напряжение между ними делится поровну:  $U_B = U_C = U_{BC}/2$ . При наличии нулевого провода обрыв в одной фазе не нарушает режима в двух других фазах.

В случае соединения приемника треугольником обрыв линейного провода в фазе  $A$  (рис. 5.8,  $b$ ) изменяет схему так, что две фазы  $Z_{AB}$ ,  $Z_{CA}$  оказываются соединенными последовательно под линейное напряжение  $U_{BC}$ . Вместе с тем третья фаза  $Z_{BC}$  оста-

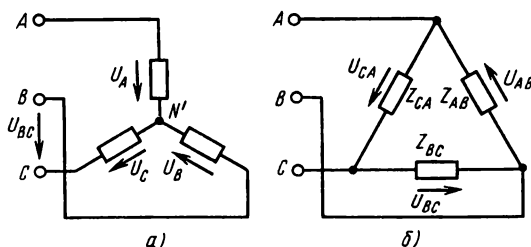


Рис. 5.8

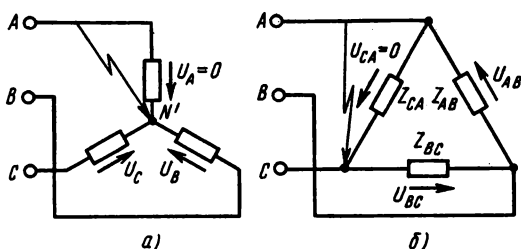


Рис. 5.9

ется под нормальным напряжением. Следствием обрыва одного провода в фазе является отсутствие напряжения и тока в приемнике этой фазы; в то же время две другие фазы остаются под нормальным напряжением.

Короткое замыкание в фазе при соединении приемника звездой (рис. 5.9, а) приводит к уменьшению напряжения в этой фазе до нуля и к увеличению в двух других фазах до линейного напряжения. Например, в короткозамкнутой фазе  $A$  фазное напряжение  $U_A = 0$ , а в других фазах  $U_B = U_{AB}$ ;  $U_C = U_{CA}$ . При соединении приемника треугольником и коротком замыкании в фазе (рис. 5.9, б) напряжение этой фазы уменьшается до нуля; две другие фазы оказываются соединенными параллельно, но остаются под линейным напряжением.

### Контрольные вопросы и задачи

1. На многих промышленных предприятиях электрические сети, предназначенные для электроснабжения смешанной нагрузки (силовой и осветительной), выполняют четырехпроводными (с нулевым проводом) при напряжении 380/220 В. Как объяснить это обстоятельство?

2. Для защиты от коротких замыканий и значительных перегрузок в сетях низкого напряжения применяют защитные устройства (например, плавкие предохранители). Почему защитные устройства не устанавливают в нулевом проводе?

3. В четырехпроводных трехфазных сетях нулевой провод обычно имеет сечение меньше, чем провода линейные, хотя ток в нем равен сумме токов в фазах приемника. Почему возможно такое решение?

4. В четырехпроводной цепи при соединении фаз приемника звездой в одной фазе произошел разрыв провода. Какое напряжение покажет вольтметр, если к его зажимам присоединить концы оборванного провода?

5. Иногда можно увидеть, что в одной части осветительной установки лампы электрического освещения горят нормально, а в другой вполнакала. Какую схему имеет осветительная установка и что в ней произошло?

**Задача 5.5.** В трехфазную четырехпроводную сеть с линейным напря-

жением 380 В включены шесть одинаковых электроламп ( $P_{\text{ном}} = 100$  Вт,  $U_{\text{ном}} = 220$  В, по две в фазе). Определить токи в проводах (линейных и нейтральном), когда лампы включены все (нагрузка симметрична), а также при несимметричной нагрузке в двух случаях: а) из каждой фазы поочередно выключают по две лампы; б) из каждой фазы выключают по одной лампе.

**Задача 5.6.** Лампы ( $P_{\text{ном}} = 100$  Вт,  $U_{\text{ном}} = 220$  В) включают в трехфазную трехпроводную сеть с линейным напряжением 220 В (по две в фазе). Определить токи фазные и линейные, если лампы включены все одновременно (нагрузка симметрична), а также при несимметричной нагрузке в двух случаях: а) из каждой фазы выключают по одной лампе; б) из каждой фазы выключают по две лампы.

## ГЛАВА 6

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Нормальная работа электрических установок невозможна без систематического контроля. Однако о качестве их работы, об отклонениях от предписанного режима лишь только в некоторых случаях можно судить на основании внешнего осмотра. В большинстве случаев необходимо периодически или непрерывно измерять величины, которые характеризуют состояния и режимы работы установок в целом или ее элементов.

Для этого применяют различные электроизмерительные приборы, которыми измеряют ток, напряжение, мощность, расход энергии, электрическое сопротивление и другие величины.

Электроизмерительные приборы и методы применяют и для измерения многочисленных неэлектрических величин: давления, температуры, расхода жидкостей и газов, деформации твердых тел и т. д. Электрические измерения важны не только как источник измерительной информации для обслуживающего персонала. Не меньшее значение они имеют в автоматике, так как электрические сигналы о состоянии или изменении режима того или иного объекта могут быть направлены в устройства автоматического регулирования и управления.

#### § 6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ И ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ

Электрические измерения являются частью метрологии — науки об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Поэтому изучение электрических измерений начнем с рассмотрения некоторых вопросов, относящихся ко всем видам измерений.

**Сведения об измерениях.** Во всех случаях измерений опытным

путем определяют какую-либо физическую величину. **Физическая величина** — это свойство, общее в качественном отношении многим физическим объектам или физическим системам, их состояниям или происходящим в них процессам. Примеры физических величин: электрический ток, магнитная индукция, масса, время, сила, площадь и др.

В количественном отношении физические величины, как правило, не совпадают для разных объектов, могут быть различны для одного объекта в разное время. Поэтому их измеряют, применяя общепринятые единицы. В СССР с 1 января 1963 г. введена Международная система единиц (СИ).

**Измерением** называют операцию сравнения измеряемой физической величины с величиной такого же рода, принятой за единицу. Измерения невозможны без соответствующих технических средств. К средствам измерений, в частности, относятся: меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи.

**Меры** — средства измерений, предназначенные для воспроизведения физической величины заданного размера. Различают меры однозначные, многозначные, наборы мер, а по назначению — меры рабочие и образцовые. *Однозначная* мера воспроизводит физическую величину одного размера (гиря, нормальный элемент — мера э.д.с., конденсатор постоянной емкости и др.). *Многозначная* мера воспроизводит ряд одноименных величин разного размера (линейка с делениями, конденсатор переменной емкости и др.).

*Набор мер* — специально подобранный комплект мер, применяемых отдельно или в различных сочетаниях (набор гирь, магазин сопротивлений и др.).

*Рабочие* меры применяют в повседневной практике для выполнения рабочих измерений; *образцовые* служат для проверки по ним рабочих мер и измерительных приборов.

*Измерительные приборы* — средства измерений для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

В практике применяют измерительные приборы непосредственной оценки и приборы сравнения. Приборы непосредственной оценки имеют шкалу, предварительно проградуированную в единицах измеряемой величины (часы, амперметр, вольтметр и др.). Приборы сравнения предназначены для сравнения измеряемой величины с мерой (весы с коромыслом, измерительный мост, потенциометр и др.).

Различают измерения прямые и косвенные. *Прямые* измерения дают результат (измеряемую величину) непосредственно из опыта. Для примера можно назвать измерения массы на весах, температуры термометром, электрического сопротивления омметром.

**Косвенные** измерения непосредственно измеряемой величины не дают. Ее находят вычислением, используя результаты прямых измерений вспомогательных величин, с которыми искомая величина связана известной зависимостью. Например, мощность в электрической цепи постоянного тока можно найти по показаниям амперметра и вольтметра ( $P = UI$ ).

**Погрешности измерений.** По ряду причин результат измерения всегда в той или иной степени отличается от самой измеряемой величины. Поэтому для точного определения измеряемой величины  $A$  надо к результату измерения  $A_n$  прибавить некоторую величину  $\delta A$ , называемую поправкой:  $A = A_n + \delta A$ .

Разность между результатом измерений и самой измеряемой величиной называют абсолютной погрешностью:  $\Delta A = = A_n - A$ .

Поправка и абсолютная погрешность равны по величине, но противоположны по знаку. Для оценки точности измерения определяется относительная погрешность — отношение абсолютной погрешности к измеряемой величине:  $\gamma \% = 100\Delta A/A$ .

Стрелочные электроизмерительные приборы имеют по всей шкале величину  $\Delta A$ , близкую к средней абсолютной погрешности, поэтому относительная погрешность в начале шкалы значительно больше, чем в конце. Для оценки точности приборов определяют относительную приведенную погрешность — отношение абсолютной погрешности к верхнему пределу измерения по шкале прибора:  $\gamma_{пр} \% = 100\Delta A/A_{пр}$ .

По этой величине устанавливают класс точности прибора (табл. 6.1), который означает наибольшую допускаемую приведенную погрешность и указан на его шкале.

**Сведения об электроизмерительных приборах.** В практике электрических измерений применяют много разнообразных приборов, которые классифицируют по различным признакам (табл. 6.1).

Т а б л и ц а 6.1

Признак классификации	Тип приборов
По способу отсчета измеряемой величины	Приборы: непосредственной оценки; сравнения
По роду измеряемой величины	Приборы: амперметр; вольтметр; ваттметр; счетчик киловатт-часов; счетчик ампер-часов; фазометр; частотомер; омметр; генриметр; фарадометр
По роду тока	Приборы: постоянного тока; переменного тока; постоянного и переменного токов

Признак классификации	Тип приборов
По принципу действия	Системы см. табл. 6.2
По степени точности	Классы точности (для приборов непосредственной оценки): 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4
По защищенности от внешних полей	Категории: I; II
По условиям эксплуатации	Группы приборов для работы: А — в сухих отапливаемых помещениях; Б — в закрытых неотапливаемых помещениях; В — в полевых и морских условиях; Г — в условиях тропического климата
По устойчивости к механическим воздействиям	Приборы: обыкновенные; тряскопрочные; вибропрочные; ударопрочные; тряскоустойчивые; виброустойчивые
По характеру применения	Приборы: стационарные; переносные
По защищенности кожухами	Кожухи: пыленепроницаемые; водонепроницаемые; герметические
По габаритным размерам	Приборы: миниатюрные (до 50 мм); малогабаритные (от 50 до 100 мм); средние (от 100 до 200 мм); большие (свыше 200 мм)

Для изображения электроизмерительных приборов в электрических схемах применяют условные обозначения, которые позволяют различать их по роду измеряемой величины (рис. 6.1) и принципу действия (табл. 6.2). Эти обозначения помещают на самих приборах вместе с другими данными, характеризующими прибор. В числе этих характеристик: единица измеряемой величины, класс точности, род тока, испытательное напряжение изоляции, рабочее положение прибора (горизонтальное, вертикаль-

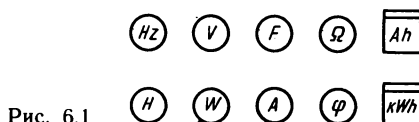


Таблица 6.2

Системы приборов		Условное обозначение	
		основной механизм	логометр
Магнито-электрическая	С подвижной рамкой		
	С подвижным магнитом		
Электро-магнитная	Неполяризованная		
	Поляризованная		
Электро-динамическая	Электродинамическая		
	Ферродинамическая		
Индукцион-ная	Индукционная		
	Магнитоиндукционная		
Тепловая	С нагреваемой проволокой		
	Биметаллическая		
Электро-статическая			
Вибрацион-ная			

ное, под углом), товарный знак предприятия-изготовителя, порядковый номер и др.

**Общие узлы и детали электроизмерительных приборов.** При-  
знаки классификации (см. табл. 6.1) свидетельствуют о большом  
разнообразии конструкций электроизмерительных приборов.  
Вместе с тем имеются узлы и детали, похожие по назначению и ус-

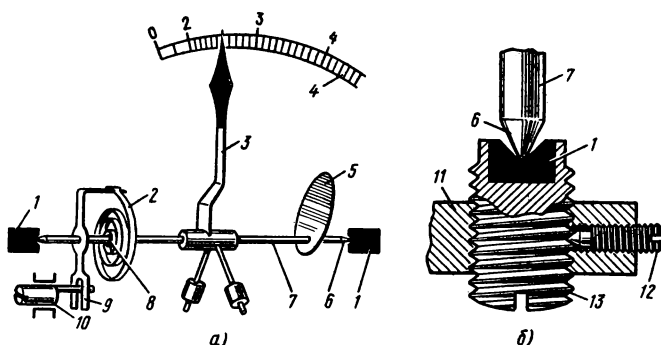


Рис. 6.2

тройству. К ним относятся: детали установки подвижной части (опоры, пружины, растяжки, подвесы и др.), отсчетные приспособления, успокоители, корректоры.

Для примера на рис. 6.2, а показана подвижная часть магнитоэлектрического прибора (см. § 6.2). Под действием вращающего момента  $M_{вр}$ , который возникает при подаче в прибор измеряемой величины, подвижная часть поворачивается и стрелка уходит с нулевой отметки.

При любой величине  $M_{вр}$  стрелка 3 уйдет за пределы шкалы 4, если нет противодействия повороту. Противодействующий момент  $M_{пр}$  создают пружины 2 (их обычно две), один конец 8 которых закреплен на оси, а другой на неподвижной части прибора. Пружины закручиваются при отклонении стрелки в сторону увеличения показаний.  $M_{пр}$  увеличивается пропорционально углу отклонения  $\alpha$ :  $M_{пр} = k_{пр} \alpha$ , где  $k_{пр}$  — коэффициент пропорциональности. Предположим, что вращающий момент пропорционален измеряемому току (току в катушке  $I_k$ )  $M_{вр} = k_{вр} I_k$ , как у прибора магнитоэлектрической системы (см. § 6.2). Подвижная часть прибора останавливается и стрелка показывает измеряемую величину при равенстве моментов  $M_{вр} = M_{пр}$ , т. е.  $k_{вр} I_k = k_{пр} \alpha$ . Отсюда следует, что угол отклонения стрелки зависит (в данном случае пропорционально) от измеряемой

$$\alpha = \frac{k_{вр}}{k_{пр}} I_k = S I_k. \quad (6.1)$$

Величину  $S$  называют чувствительностью прибора, а величину, обратную ей, — постоянной прибора  $C = 1/S$ ;  $I = C\alpha$ . Начальное закручивание пружин 2 можно в небольших пределах изменять с помощью корректора (винт 10 и поводок 9). Это предусмотрено для коррекции положения стрелки, т. е. установки ее на нулевую отметку, если она по какой-либо причине с нуля сме-



щена при разомкнутой измерительной цепи прибора. Если в измерительную цепь входит элемент, расположенный на подвижной части прибора, то пружины 2 используются для подведения к нему электрического тока.

Опора (рис. 6.2, а, б) в данном случае состоит из оси 7 и подшипника 1. Ось — легкая алюминиевая трубочка со стальными кернами 6 на концах, на ней укреплена алюминиевая пластина 5. Керны опираются на подшипники 1 из твердого материала (агат, корунд, сталь и др.). Назначение других деталей опоры (стойка 11, винт подшипника 13, стопорный винт 12) не требует пояснений.

Трение в опорах снижает чувствительность прибора и создает погрешность измерений. Поэтому подвижную часть в современных приборах часто устанавливают на растяжках (рис. 6.3) — упругих металлических лентах или нитях 2, прикрепленных одним концом к подвижной части, а другим — к плоским пружинам 1, создающим натяжение. Растяжки выполняют все те же функции, что и пружины 2 (см. рис. 6.2, а). При установке на растяжках трение практически отсутствует и вместе с тем увеличивается устойчивость против тряски и вибрации.

В приборах особо чувствительных и точных (например, в зеркальных гальванометрах) применяют свободную подвеску подвижной части на тонкой упругой нити, закрепленной на одном конце. Такие приборы устанавливают строго вертикально (по уровню), они имеют световой указатель вместо стрелки. При воздействии на подвижную часть вращающего и противодействующего моментов стрелка не сразу устанавливается на нужной отметке, а колеблется около нее, затрудняя отсчет. С целью уменьшения времени отсчета применяют успокоители.

В магнитоиндукционный успокоитель (рис. 6.4) входит

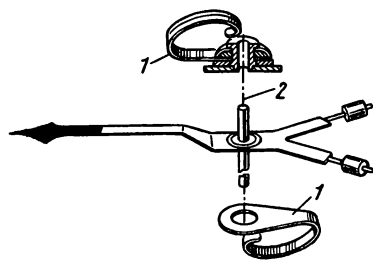


Рис. 6.3

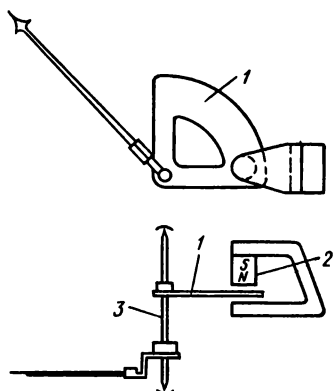


Рис. 6.4

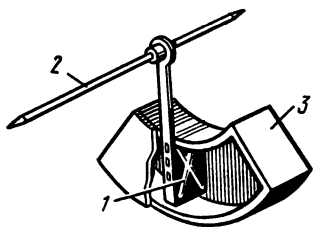


Рис. 6.5

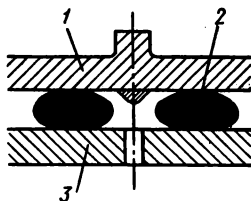


Рис. 6.6

постоянный магнит 2 и алюминиевая пластинка 1, укрепленная на оси 3 подвижной части прибора (см. рис. 6.2, а). Пластинка находится в постоянном магнитном поле, поэтому при движении в ней индуцируются вихревые токи. Силы, противодействующие движению, создаются, согласно правилу Ленца, в результате взаимодействия того же магнитного поля с вихревыми токами.

Для действия воздушного успокоителя (рис. 6.5) на оси 2 подвижной части укреплено легкое алюминиевое крыло 1, которое движется в закрытой камере 3. Зазор между краями крыла и стенками камеры очень маленький, поэтому при движении крыла повышается давление воздуха в одной части камеры и уменьшается в другой и так создается тормозное усилие.

Действие одного из жидкостных успокоителей поясняет рис. 6.6, где показаны два металлических диска, а между ними в зазоре около 0,1 мм находится вязкая жидкость 2, которая не выливается в любом положении. Диск 1 укреплен на подвижной, а диск 3 на неподвижной части прибора. Взаимному движению дисков препятствуют силы сцепления жидкости с дисками.

#### *Контрольные вопросы и задачи*

1. В Международной системе единиц (СИ) имеются основные и производные единицы измерения. Какие единицы являются основными? В чем их отличие от единиц производных?

2. При взвешивании продуктов в магазинах применяют весы со шкалой (до 1 кг) и полочкой для гирь (до 9 кг). К какому типу измерительных приборов (непосредственной оценки или сравнения) следует отнести такие весы?

3. В п. 2 табл. 6.1 перечислены электроизмерительные приборы, а на рис. 6.1 показаны их условные обозначения. Какое обозначение относится к каждому из этих приборов?

4. В чем сходство и различие между поправкой и абсолютной погрешностью измерения?

5. Что такое цена деления шкалы электроизмерительного прибора?

**Задача 6.1.** Номинальный ток амперметра  $I_{\text{ном}} = 10 \text{ А}$ , класс точности

2,5. Определить наибольшую возможную относительную погрешность при измерении тока величиной 5 А. Определить относительную погрешность измерения и класс точности вольтметра, который имеет верхний предел шкалы  $U_{\text{ном}} = 100$  В и дает показание 21,2 В при показании образцового прибора 20 В. При проверке вольтметра установлено, что в данной точке его абсолютная погрешность наибольшая.

**Задача 6.2.** При измерении мощности  $P = 1200$  Вт амперметром и вольтметром приборы показали  $I = 12$  А,  $U = 102$  В, а при измерении сопротивления резистора  $R = 120$  Ом —  $I = 0,5$  А;  $U = 61$  В. Определить в обоих случаях абсолютную и относительную погрешности измерения.

## § 6.2. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА И НАПЯЖЕНИЯ

В повседневной практике для технических измерений электрических токов и напряжений применяют чаще всего стрелочные приборы магнитоэлектрической и электромагнитной систем.

**Магнитоэлектрический измерительный механизм.** Работа магнитоэлектрического измерительного механизма основана на взаимодействии постоянного магнитного поля и электрического тока (см. § 3.5). Одна из конструктивных схем показана на рис. 6.7.

В магнитную цепь прибора входят: сильный постоянный магнит 1, ярмо 2, полюсные наконечники 3, сердечник 4. В воздушных зазорах между полюсными наконечниками и сердечником создается равномерное радиальное магнитное поле. Этого достигают путем соответствующего оформления и тщательной обработки полюсных наконечников. Вокруг оси 6 и сердечника в пределах угла  $90^\circ$  может поворачиваться катушка 5, т. е. обмотка из медного изолированного провода на легком алюминиевом каркасе в виде рамки.

Если в катушке имеется ток  $I_k$ , то на каждый ее проводник длиной  $l$  со стороны магнитного поля действует электромагнитная сила  $F_m = BI_k l$  [см. формулу (3.24)].

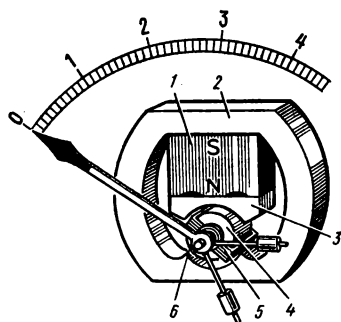


Рис. 6.7

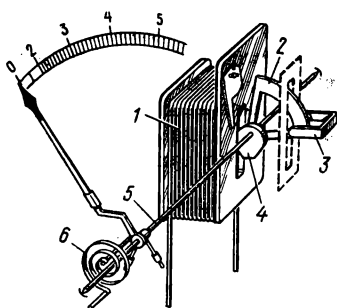


Рис. 6.8

Относительно оси рамки создается вращающий момент  $M_{вр} = NSBI_k$ , где  $N$  — число витков обмотки;  $S$  — площадь рамки;  $B$  — магнитная индукция — величины, постоянные для данного прибора. Поэтому  $M_{вр} = k_{вр} I_k$ . Противодействующий момент  $M_{пр} = k_{пр} \alpha$  создается пружинами (см. § 6.1).

Приборы магнитоэлектрической системы имеют высокую чувствительность, малое собственное потребление энергии, малую зависимость показаний от внешних магнитных полей. Эти преимущества обеспечиваются тем, что постоянный магнит создает сильное магнитное поле, а магнитопровод является одновременно магнитным экраном; подвижная часть механизма очень легкая.

Вместе с тем направление вращающего момента зависит от направления тока в катушке, а это значит, что магнитоэлектрические приборы можно использовать только в цепях постоянного тока. Легкая конструкция подвижной части не допускает механической и электрической перегрузок.

Для использования преимуществ магнитоэлектрического измерительного механизма в цепях переменного тока его соединяют с выпрямителем на полупроводниковых вентилях. При этом сохраняются высокая чувствительность, малое потребление энергии, но точность значительно снижается из-за несовершенства выпрямителя.

**Электромагнитный измерительный механизм.** Подвижный ферромагнитный сердечник в магнитном поле перемещается в такое положение, при котором магнитный поток в электромагнитном устройстве будет наибольшим.

Это лежит в основе действия электромагнитного измерительного механизма, одна из конструктивных схем которого показана на рис. 6.8.

Ток  $I_k$  в неподвижной катушке 1 создает магнитное поле, под действием которого подвижный сердечник 4 в форме лепестка из магнитомягкого ферромагнетика, укрепленный эксцентрично на оси 5, втягивается в узкую щель внутрь катушки. Ось поворачивается и поворачивает укрепленную на ней стрелку.

При более подробном рассмотрении вопроса можно доказать, что вращающий момент в данном случае пропорционален квадрату тока в катушке  $M_{вр} = k_{2вр} I_k^2$ , а противодействующий момент пружины 6  $M_{пр} = k_{2пр} \alpha$  (см. § 6.1).

Направление вращающего момента в приборах электромагнитной системы не зависит от направления тока, так как при любом знаке тока момент положительный. Отсюда следует, что электромагнитные приборы можно изготовлять для измерения в цепях постоянного и переменного тока.

Однако в цепи постоянного тока электромагнитный прибор мо-

жет давать разные показания (до 2 %) при одной и той же измеряемой величине, что связано с влиянием магнитного гистерезиса.

При переменном токе на точность электромагнитных приборов отрицательно влияют потери от гистерезиса и вихревых токов в сердечниках. К недостаткам электромагнитной системы надо отнести также значительное влияние внешних магнитных полей на показания приборов, относительно большое собственное потребление энергии, неравномерность шкалы.

Несмотря на отмеченные недостатки, электромагнитные приборы — простые по устройству, дешевые, устойчивы к перегрузкам, широко применяются, особенно в качестве технических щитовых приборов в цепях переменного тока.

**Измерение тока и напряжения.** Предположим, что измеряемой величиной является ток  $I$ . Этот ток или некоторая часть его направляется в катушку измерительного механизма (ток  $I_k$ ). Зависимость угла поворота стрелки магнитоэлектрического прибора от величины тока в катушке получена ранее [см. формулу (6.1)]. При измерении больших токов в цепь измеряемого тока включают шунт — резистор, имеющий малое, но постоянное сопротивление  $R_{ш}$ , параллельно которому присоединена катушка измерительного механизма (рис. 6.9).

В этом случае подвижная часть измерительного механизма отклоняется в соответствии со значением тока в катушке  $I_k$ , но на шкале прибора, отградуированной на измеряемый ток, стрелка показывает величину измеряемого тока, который пропорционален току в катушке:  $I = I_k (1 + R_k/R_{ш})$ , где  $R_k$  — сопротивление цепи катушки,  $R_{ш}$  — сопротивление шунта.

Выразим отсюда ток  $I_k$  и подставим в формулу (6.1), получим уравнение, непосредственно определяющее зависимость угла поворота подвижной части прибора от измеряемого тока

$$\alpha = S_{1\tau} I, \quad (6.2)$$

где  $S_{1\tau} = \frac{k_{вр} R_{ш}}{k_{пр} (R_{ш} + R_k)}$  — чувствительность прибора по току (постоянная величина).

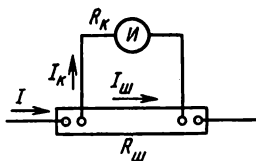


Рис. 6.9

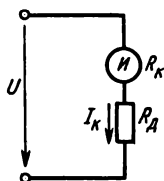


Рис. 6.10

Электроизмерительный прибор, шкала которого отградуирована по уравнению (6.2), измеряет значение тока, т. е. является амперметром.

Для электромагнитного измерительного механизма зависимость  $\alpha = f(I_k)$  получается аналогично из равенства  $M_{вр} = M_{пр}$  или  $k_{2вр} I_k^2 = k_{2пр} \alpha$ :

$$\alpha = I_k^2 k_{2вр} / k_{2пр} = S I_k^2.$$

Электромагнитные амперметры применяют обычно без шунтов, т. е. большие токи (до 200 А) пропускают непосредственно по катушке измерительного механизма. Такое решение возможно потому, что катушка неподвижна и может быть изготовлена из провода различной, в том числе большой, толщины в зависимости от предела измерения тока и конструкции подвижной части прибора. Например, катушка на номинальный ток 100 А имеет всего один виток из толстой медной шины. При равенстве  $I_k = I$  зависимость  $\alpha = f(I_k)$  для электромагнитного амперметра имеет вид

$$\alpha = S_{2т} I^2. \quad (6.3)$$

Амперметр включается последовательно в цепь измеряемого тока. Для того чтобы амперметры возможно меньше влияли на значение измеряемого тока, их изготавливают с малым собственным сопротивлением (обычно доли ома).

Магнитоэлектрические и электромагнитные измерительные механизмы можно использовать для измерения электрического напряжения. С этой целью последовательно с катушкой измерительного механизма (сопротивление  $R_k$ ) соединяют добавочный резистор, имеющий относительно большое и постоянное сопротивление  $R_d$  (рис. 6.10).

Такую измерительную цепь включают параллельно участку цепи, на котором предполагается измерить напряжение  $U$ . В этом случае ток в катушке измерителя  $I_k = U / (R_k + R_d)$ .

Подставив это выражение в (6.2) и (6.3), получим уравнения, выражающие зависимость угла поворота подвижной части измерителя от напряжения на его зажимах: для магнитоэлектрического прибора  $\alpha = S_{1н} U$ , для электромагнитного прибора  $\alpha = S_{2н} U^2$ , причем  $S_{1н}$  и  $S_{2н}$  — постоянные величины ( $S_n$  — чувствительность прибора по напряжению).

Электроизмерительный прибор, отградуированный согласно тому или другому из этих уравнений, измеряет величину электрического напряжения, т. е. является вольтметром.

Вольтметры изготавливают с большим собственным сопротивлением (обычно десятки или сотни ом). Чем больше сопротивление вольтметра, тем меньше он изменяет общее сопротивление участка цепи, параллельно которому подключен, т. е. тем меньше изменяет

величину измеряемого напряжения. Для расширения пределов измерения применяют также внешние добавочные резисторы к вольтметрам и шунты к магнитоэлектрическим амперметрам.

В электрических цепях переменного тока для измерения больших токов и напряжений применяют измерительные трансформаторы тока и напряжения. При измерениях в сетях высокого напряжения они служат не только для расширения пределов измерения, но и в целях безопасности обслуживания электроизмерительных приборов (см. § 7.3).

### *Контрольные вопросы и задачи*

1. В цепи переменного тока электромагнитный амперметр показывает 10 А. Какую величину покажет магнитоэлектрический амперметр, если его включить вместо электромагнитного?

2. На рис. 6.7 и 6.8 изображены шкалы магнитоэлектрического и электромагнитного приборов. Чем отличаются эти две шкалы и как объяснить это отличие?

3. Почему амперметры изготовляют с малым, а вольтметры с большим собственным сопротивлением?

4. На рис. 6.8 показаны детали магнитоиндукционного успокоителя: постоянный магнит 3 и алюминиевый сектор 2 (см. § 6.1 и рис. 6.4). Устанавливают ли успокоитель в приборах магнитоэлектрической системы? Если да, то почему он не показан на рис. 6.7?

5. В схеме рис. 6.18, б один зажим вольтметра присоединен в точке цепи за амперметром (в направлении от источника). В какую сторону изменятся показания приборов, если тот же зажим вольтметра присоединить до амперметра?

**Задача 6.3.** Номинальный ток магнитоэлектрического амперметра  $I_{ном} = 10$  А. При измерении тока  $I = I_{ном}$  ток в измерительной катушке  $I_k = 5 \cdot 10^{-3}$  А, а напряжение на зажимах амперметра  $U_a = 75$  мВ. Определить сопротивление шунта. Найти верхний предел измерения тока, напряжение на зажимах амперметра и сопротивление шунта, который устанавливают вместо основного, при шунтирующем коэффициенте:  $P_{ш} = 1000$ ,  $P_{ш} = 4000$ .

**Задача 6.4.** Многопредельный вольтметр имеет четыре предела измерения, для чего последовательно с измерителем включены четыре резистора, а точки соединения их выведены на лицевую панель. При измерении на третьем пределе напряжения  $U = U_{зном} = 75$  В, падение напряжения в измерительном механизме составляет  $U_k = 0,3$  В при токе  $I_k = 30$  мА. Определить общее сопротивление добавочных резисторов, соответствующее третьему пределу измерения.

Определить номинальные напряжения на всех пределах измерения и сопротивление каждого из четырех резисторов, если известны коэффициенты добавочного сопротивления для каждого предела:  $P_{1д} = 10$ ;  $P_{2д} = 50$ ;  $P_{3д} = 250$ ;  $P_{4д} = 500$ .

### § 6.3. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ

Для измерения мощности и энергии в электрических цепях можно использовать принцип действия электродинамических и индукционных измерительных механизмов. В практике обычно применяют электродинамические ваттметры и индукционные счетчики электрической энергии.

**Электродинамический измерительный механизм.** Основу принципа работы электродинамического механизма составляет взаимодействие проводов с токами (см. § 3.5).

Конструктивно этот принцип реализуется в форме взаимодействия двух катушек: неподвижной 1 с током  $I_1$  и подвижной 2 с током  $I_2$  (рис. 6.11).

Как и в магнитоэлектрическом механизме, подвижная катушка получает питание через две спиральные пружины 3, которые вместе с тем создают противодействующий момент  $M_{пр}$ .

Формула (3.28) показывает, что сила взаимодействия двух проводов с токами пропорциональна произведению токов. Аналогичное выражение можно записать и для вращающего момента, который приводит в движение подвижную катушку:  $M_{вр} = k_{вр} I_1 I_2$ .

Электродинамический механизм пригоден для измерений в цепях постоянного и переменного токов, так как при одновременном изменении направления тока в обеих катушках направление вращающего момента сохраняется. Преимуществом электродинамических приборов является и относительно высокая точность. По сравнению с приборами других систем, их считают наиболее точными при измерениях в цепях переменного тока.

Собственное магнитное поле электродинамического механизма слабое, поэтому для защиты от влияния внешних магнитных полей применяют двойные экраны из ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью (например, пермаллоя). Недостатками являются также большое собственное потребление энергии, повышенная чувствительность к электрическим и механическим перегрузкам, относительная сложность и высокая стоимость. Часть недостатков можно устранить, если внутри обеих катушек поместить ферромагнитные сердечники. Такой измерительный механизм называют ферродинамическим. Конструктивно он похож на магнитоэлектрический механизм, но вместо постоянного магнита имеется электромагнит — неподвижная катушка с ферромагнитным сердечником, в котором создается сильное магнитное поле. Это позволяет уменьшить собственное потребление энергии и отказаться от магнитных экранов. Однако вместо устраненных недостатков появились другие; например, существенно понижается точность прибора, так как дополнитель-



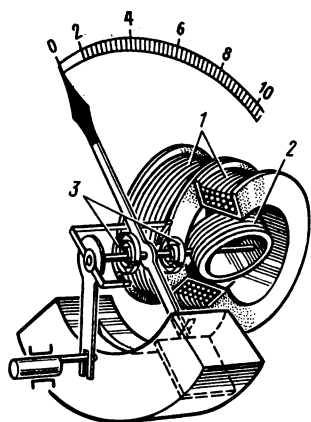


Рис. 6.11

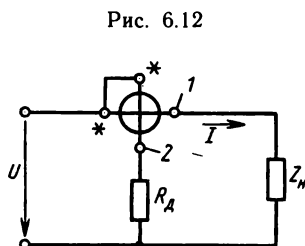


Рис. 6.12

ные погрешности вносит магнитопровод (об этом сказано при рассмотрении электромагнитного механизма).

Электродинамические измерительные механизмы без сердечника применяют для лабораторных переносных приборов повышенной точности, ферродинамические чаще изготовляют щитовыми и применяют в цепях переменного тока. Возможность получения большого вращающего момента позволяет использовать ферродинамические механизмы в самопишущих приборах.

**Измерение мощности.** Зависимость вращающего момента от токов в катушках позволяет использовать электродинамический механизм для измерения мощности, т. е. в качестве ваттметра (рис. 6.12). С этой целью неподвижную катушку 1 включают последовательно с элементом цепи, мощность которого надо измерить (так же как амперметр); подвижную катушку 2 включают параллельно этому же элементу (так же как вольтметр). При этом два зажима ваттметра, отмеченные звездочкой (по одному от каждой обмотки), включают в цепь со стороны источника питания (сети). Ток в неподвижной катушке равен току в рабочей цепи, а ток в подвижной катушке пропорционален напряжению:  $I_1 = I$ ;  $I_2 = U/R_b$ , где  $R_b$  — сопротивление параллельной цепи прибора (подвижной катушки и добавочного резистора  $R_A$ ). При такой схеме включения измерительного механизма в цепи постоянного тока вращающий момент

$$M_{\text{вр}} = \frac{k_{3\text{вр}} IU}{R_b} = k_{4\text{вр}} P.$$

Отсюда видно, что вращающий момент электродинамического прибора пропорционален мощности цепи постоянного тока.

При такой же схеме включения электродинамического

механизма в цепь переменного тока вращающий момент пропорционален активной мощности  $P$ :  $M_{вр} = k_{4вр} UI \cos \varphi = k_{4вр} P$ .

Равенство  $M_{вр} = M_{пр}$  позволяет получить зависимость угла поворота стрелки прибора от величины измеряемой мощности

$$\alpha = S_m P, \quad (6.4)$$

где  $S_m$  — чувствительность ваттметра по мощности, дел/Вт.

В трехфазной цепи при равномерной нагрузке мощность измеряют одним ваттметром в одной фазе. Общая мощность  $P = 3P_\phi$ . При неравномерной нагрузке в некоторых случаях также достаточно одного ваттметра, который поочередно включают в каждую фазу. В четырехпроводной трехфазной цепи можно применить одновременно три ваттметра. Общая мощность  $P = P_1 + P_2 + P_3$ . Вместо трех одноэлементных ваттметров применяют один трехэлементный, в котором конструктивно объединены три измерительных элемента, причем подвижные их части находятся на общей оси. Таким образом, вращающие моменты всех элементов складываются, поэтому на шкале стрелка показывает общую мощность трехфазной цепи.

В трехпроводной трехфазной цепи применяют схему с двумя одноэлементными или одним двухэлементным ваттметрами (рис. 6.13).

Доказано, что общая мощность трехфазной цепи равна сумме показаний двух ваттметров, включенных по этой схеме:  $P = P_1 + P_2$ .

**Индукционный измерительный механизм.** В основе работы индукционного измерительного механизма — действие переменного магнитного поля на индуктированные им токи. Отсюда можно заключить, что такой измеритель может работать только в цепях переменного тока.

В конструктивную схему его (рис. 6.14) входят: два электромагнита 1, 4; алюминиевый диск 3; постоянный магнит 2.

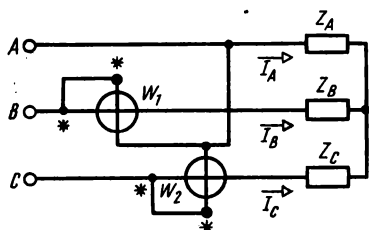


Рис. 6.13

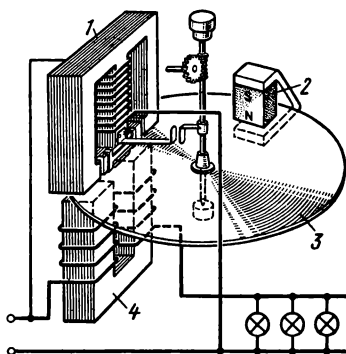


Рис. 6.14

Обмотки электромагнитов включаются в электрическую цепь так же, как катушки ваттметра. Обмотка первого электромагнита имеет относительно большое число витков, включается в цепь так же, как вольтметр; обмотка второго электромагнита имеет малое число витков, включается так же, как амперметр.

Переменные токи в обмотках обоих электромагнитов создают переменные магнитные потоки, которые, пронизывая край диска, индуцируют в нем вихревые токи. Вращающий момент создается в результате действия переменного магнитного потока первого электромагнита на ток, индуцированный магнитным полем второго электромагнита, и наоборот.

Более детальное рассмотрение этого вопроса показывает, что вращающий момент пропорционален активной мощности цепи

$$M_{вр} = k_{5вр} UI \cos \varphi = k_{5вр} P.$$

Под действием этого момента диск вращается. Край алюминиевого диска входит в воздушный зазор постоянного магнита 2. Если диск вращается, то постоянное магнитное поле индуцирует в диске токи и взаимодействует с этими токами. В результате на диск действуют электромагнитные силы, направленные против вращения.

Величина тормозного момента, как показывают расчеты, пропорциональна частоте вращения диска  $n$ :  $M_{т} = k_{6вр} n$ .

**Измерение энергии.** При равенстве вращающего и тормозного моментов диск вращается с постоянной скоростью:  $M_{вр} = M_{т}$  или  $k_{5вр} P = k_{6вр} n$ . Обозначив  $k_{6вр}/k_{5вр} = C$  и умножив на время  $t$ , получим

$Pt = Cnt$ , где  $C$  — постоянная прибора;  $n$  — частота вращения диска;  $Pt = W$  — энергия в цепи за время  $t$ ;  $nt = N$  — число оборотов диска за то же время. Окончательно получим

$$W = CN. \quad (6.5)$$

Отсюда следует, что для измерения расхода электроэнергии надо считать количество оборотов диска. Счет ведет специальный счетный механизм, связанный с осью диска механической передачей (червячная передача и система зубчатых колесиков),

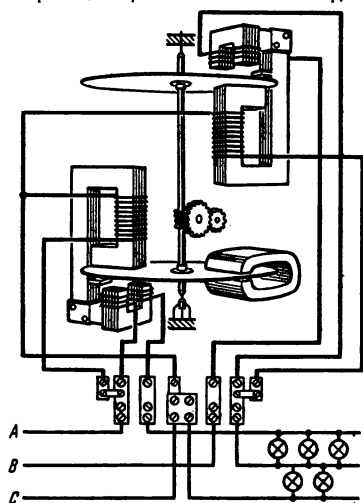


Рис. 6.15

передаточное число которого подобрано так, что расход электроэнергии можно читать на цифровом указателе в киловатт-часах.

Индукционный измерительный механизм, снабженный вместо стрелки и шкалы счетным механизмом, называют *счетчиком электрической энергии*.

Для измерения энергии в трехфазных электроустановках применяют трехфазные двухэлементные счетчики. Схема включения такого счетчика показана на рис. 6.15.

### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Для измерения мощности в цепь присоединили электродинамический ваттметр. После включения цепи выяснилось, что стрелка прибора отклонилась не вдоль шкалы, а в противоположную сторону. Почему это произошло? Как надо изменить схему соединения ваттметра в данной электрической цепи, чтобы можно было измерить мощность?

3. Какие изменения надо внести в конструкцию индукционного измерительного механизма (см. рис. 6.14), чтобы его использовать для измерения мощности в цепи переменного тока?

4. На рис. 6.13 изображена схема измерения мощности в трехфазной цепи двумя ваттметрами. Какую мощность показывает каждый из двух ваттметров?

5. На рис. 6.15 показана схема двухэлементного счетчика электрической энергии. В чем состоит сходство и различие этой схемы от схемы рис. 6.13?

**Задача 6.5.** Определить показания каждого ваттметра и общую мощность в схеме рис. 6.13, если нагрузка в цепи равномерная активная, фазное напряжение  $U_\phi = 127$  В, сопротивление фазы  $Z_\phi = 12,7$  Ом.

**Задача 6.6.** На каждый киловатт-час израсходованной энергии диск однофазного счетчика делает 2500 оборотов. При некоторой нагрузке диск счетчика сделал 125 оборотов за 10 мин. Определить коэффициент мощности электроприемника, если ток его 3 А, а напряжение 127 В. Определить стоимость электроэнергии, израсходованной за месяц, если электроприемник в режиме по условию задачи работал 8 ч/сут, а в остальное время нагрузка уменьшалась вдвое. Стоимость электроэнергии 4 коп. за 1 кВт·ч.

## **§ 6.4. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ**

При изготовлении, монтаже и эксплуатации электротехнических и радиотехнических устройств и установок необходимо измерять электрическое сопротивление.

В практике для измерения сопротивлений применяют различные методы в зависимости от характера объектов и условий измерения (например, твердые и жидкие проводники, заземлители, электроизоляция); от требований к точности и скорости измерения; от величины измеряемых сопротивлений.

Методы измерения малых сопротивлений существенно отличаются от методов измерения больших сопротивлений, так как в пер-

вом случае надо принимать меры для исключения влияния на результаты измерений сопротивления соединительных проводов, переходных контактов.

Далее рассмотрим только те методы, которые в практике применяют наиболее часто.

**Измерительные механизмы омметров.** Для прямого измерения сопротивлений применяют магнитоэлектрические измерительные механизмы одно- и двухрамочные.

Однорамочный механизм, рассмотренный в § 6.2, можно использовать для измерения сопротивлений. С этой целью в прибор вводят добавочный резистор с постоянным сопротивлением  $R_d$  и снабжают его источником питания (например, батареей сухих элементов). Измеряемое сопротивление  $R_x$  включается с измерителем последовательно (рис. 6.16) или параллельно.

При последовательном соединении ток в измерителе  $I = U / (R_n + R_d + R_x)$ , где  $R_n$  — сопротивление измерителя;  $U$  — напряжение источника питания.

Учитывая формулу (6.2), находим, что угол отклонения стрелки прибора при  $U = \text{const}$  зависит только от величины измеряемого сопротивления  $R_x$ :

$$\alpha = \frac{U S_{1T}}{R_n + R_d + R_x}.$$

Если шкалу отградуировать по этому выражению в единицах сопротивления, то прибор будет омметром. Напряжение сухих элементов со временем уменьшается, поэтому в измерения вносится ошибка, тем большая, чем больше действительное напряжение отличается от того напряжения, при котором была градуирована шкала.

Ошибка от непостоянства напряжения питающего источника не возникает, если измерительный механизм имеет две обмотки, расположенные на общей оси под некоторым углом друг к другу (рис. 6.17).

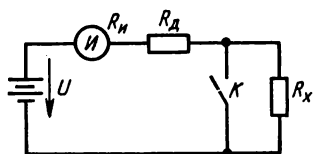


Рис. 6.16

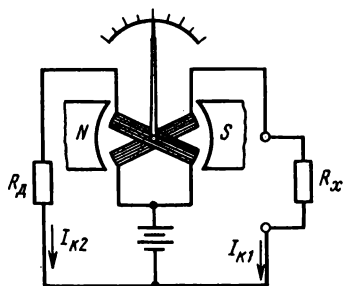


Рис. 6.17

В двухрамочном измерительном механизме, который называют логометром, нет противодействующих пружин, вращающий и противодействующий моменты создаются электромагнитными силами. Поэтому при отсутствии тока в обмотках хорошо уравновешенная подвижная часть прибора находится в безразличном равновесии (стрелка останавливается у любого деления шкалы). Когда в катушках есть ток, на подвижную часть действуют два электромагнитных момента, направленные в противоположные стороны.

Магнитная цепь измерительного механизма устроена так, что магнитная индукция вдоль воздушного зазора распределена неравномерно, но с таким расчетом, что при повороте подвижной части в любую сторону вращающий момент уменьшается, а противодействующий момент увеличивается (в зависимости от направления поворота роль моментов меняется).

Подвижная часть останавливается при  $M_{1вр} = M_{2пр}$  или  $N_1 SB_1 I_{1к} = N_2 SB_2 I_{2к}$  (см. § 6.2). Отсюда следует, что положение стрелки на шкале зависит от отношения токов в обмотках, т. е.  $\alpha = f(I_{1к}/I_{2к})$ , но не зависит от напряжения питающего источника.

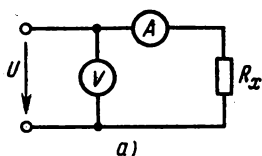
На схеме рис. 6.17 видно, что измеряемое сопротивление  $R_x$  входит в цепь одной из катушек логометра, поэтому ток в ней, а также отклонение стрелки прибора однозначно зависит от значения  $R_x$ .

Используя эту зависимость, шкалу градуируют в единицах сопротивления и тогда прибор является омметром. Омметры для измерения сопротивления изоляции снабжают источником питания с напряжением до 1000 В, чтобы измерение проводить при напряжении, примерно равном рабочему напряжению установки. Таким источником может быть встроенный магнитоэлектрический генератор с ручным приводом или трансформатор с выпрямителем, включаемый в сеть переменного тока.

Омметры, рассчитанные на измерения больших сопротивлений (больше 1 МОм), называют мегаомметрами.

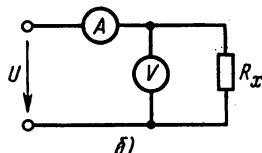
**Косвенные методы измерения сопротивлений.** Сопротивление резистора или другого элемента электрической цепи можно определить по показаниям вольтметра и амперметра (при постоянном токе), применяя закон Ома:  $R_x = U/I$  (схемы рис. 6.18, а, б). По схеме на рис. 6.19 определяют сопротивление  $R_x$  по показаниям одного вольтметра. В положении 1 переключателя  $\Pi$  вольтметр измеряет напряжение сети  $U$ , а в положении 2 — напряжение на зажимах вольтметра  $U_b$ . В последнем случае  $U_b/R_b = U_x/R_x$ . Отсюда

$$R_x = \frac{U_x}{U_b} R_b = \frac{U - U_b}{U_b} R_b.$$



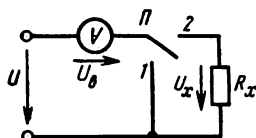
а)

Рис. 6.18



б)

Рис. 6.19



Косвенные методы применяют для измерения средних сопротивлений, а одним вольтметром измеряют также большие сопротивления. Точность этих методов значительно зависит от соотношения величин измеряемого сопротивления  $R_x$  и внутренних сопротивлений амперметра ( $R_a$ ) и вольтметра ( $R_b$ ). Результаты измерения можно считать удовлетворительными по точности, если выполняются условия:  $R_x \geq 100R_a$  (см. схему рис. 6.18, а);  $R_x \leq R_b/100$  (см. схему рис. 6.18, б);  $R_x \leq R_b$  (см. схему рис. 6.19).

**Методы и приборы сравнения.** Для измерения малых и средних сопротивлений применяют метод сравнения измеряемого сопротивления  $R_x$  с образцовым  $R_0$ . Эти два сопротивления на схеме рис. 6.20 соединены последовательно, поэтому ток в них один и тот же. Величину его регулируют с помощью резистора  $R_p$ , так, чтобы она не превышала допустимого тока для сопротивлений  $R_x$  и  $R_0$ .  $U_x/R_x = U_0/R_0$ . Отсюда  $R_x = R_0 U_x/U_0$ . Незвестные падения напряжения  $U_x$  и  $U_0$  измеряют вольтметром или потенциометром. Результаты измерения получаются более точными, если сопротивления  $R_x$  и  $R_0$  одного порядка, а сопротивление вольтметра достаточно велико, так что присоединение его не влияет на режим основной цепи.

При измерении малых сопротивлений этим методом вольтметр подключают с помощью потенциальных зажимов, которые позволяют исключить сопротивления контактов основной цепи из результатов измерения.

Средние и большие сопротивления можно измерить методом замещения (рис. 6.21). Амперметром  $A$  измеряют ток, устанавливая переключатель  $\Pi$  в положение 1, а затем 2. Напряжение на входных зажимах схемы одинаково, поэтому  $U = I_x R_x = I_0 R_0$ . Отсюда  $R_x = R_0 I_0/I_x$ .

При измерении больших сопротивлений амперметр заменяют гальванометром с шунтом, чем значительно повышают точность измерения.

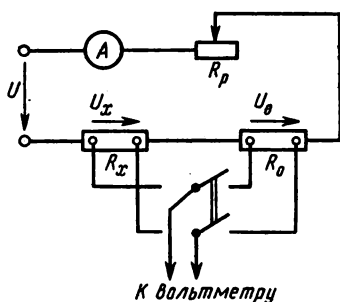


Рис. 6.20

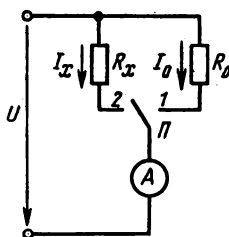


Рис. 6.21

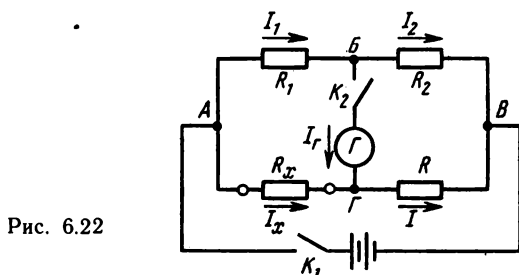


Рис. 6.22

Наиболее точные результаты при измерении сопротивлений дают мостовые схемы, которые в практике применяют в различных вариантах в зависимости от величин измеряемых сопротивлений и требуемой точности измерения.

Чаще других можно встретить прибор, построенный по схеме рис. 6.22, который в практике называют «одинарным мостом». В данном случае в мостовую схему входят сопротивления  $R_1$ ;  $R_2$ ;  $R$ ;  $R_x$ , которые образуют замкнутый контур  $A, B, B, \Gamma$  из четырех ветвей (их называют «плечами моста»).

В одну диагональ схемы включен источник постоянного тока, в другую — гальванометр с двусторонней шкалой (ноль в середине шкалы).

Предположим, что при некотором сопротивлении  $R_x$  другие сопротивления подобраны так, что ток в измерительной диагонали  $I_\Gamma = 0$ , т. е. потенциалы  $V_B$  и  $V_\Gamma$  одинаковы при замкнутых выключателях  $K_1$  и  $K_2$ . В этом случае  $I_1 = I_2$ ;  $I_x = I$ ;  $I_1 R_1 = I_x R_x$ ;  $I_2 R_2 = IR$ .

Используя эти равенства, нетрудно получить выражение для измеряемого сопротивления  $R_x = RR_1/R_2$ . Если сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  одинаковые по величине, то  $R_x = R$ . В приборе промышленно-



го изготовления  $R$  — это набор резисторов (магазин сопротивлений), составленный по декадному принципу. На верхней крышке расположены переключатели, с помощью которых можно набрать в известных пределах любую величину сопротивления с точностью, которая определяется самой малой ступенью изменения сопротивления.

Для расширения пределов измерения величины  $R_1$  и  $R_2$  подбирают так, чтобы их отношение можно было изменить тоже по десятичной системе (например,  $R/R_2 = 100; 10; 1; 0,1; 0,01; 0,001; 0,0001$ ).

Одинарные мосты применяют в основном для измерения средних сопротивлений. При измерении малых сопротивлений измеряемый элемент включают по особой схеме или применяют специальные мосты, предназначенные для этой цели.

### *Контрольные вопросы и задачи*

1. У большинства стрелочных приборов (амперметров, вольтметров и т. д.) стрелка отклоняется от начального положения тем больше, чем больше измеряемая величина. Почему у некоторых типов омметров стрелка отклоняется тем меньше, чем больше измеряемое сопротивление?

2. В однорабочных омметрах для устранения ошибки измерения, связанной с изменением напряжения питающего источника, предусматривают специальное приспособление: электрический шунт с изменяемым сопротивлением (включается параллельно измерительной катушке) или магнитный шунт, изменяющий магнитную индукцию в воздушном зазоре.

В какую сторону надо изменить магнитную индукцию с помощью магнитного шунта, если напряжение источника уменьшилось? Как надо изменить сопротивление электрического шунта, если напряжение источника увеличилось?

3. При измерении сопротивления изоляции мегаомметром с ручным приводом частоту вращения от руки поддерживать постоянной невозможно, поэтому меняется напряжение встроенного в прибор магнитоэлектрического генератора. Почему в этом случае непостоянство напряжения источника не сказывается на результатах измерения?

4. Какую из схем рис. 6.18, *а*, *б* и почему применяют: для измерения больших сопротивлений? для измерения малых сопротивлений?

5. Для измерения некоторого сопротивления  $R_x$  применяют одинарный мост. В каком порядке действует при этом оператор? Изменится ли точность измерения, если уменьшится напряжение источника питания (сухого элемента)?

**Задача 6.7.** Для измерения сопротивлений использовали амперметр и вольтметр, сопротивления которых  $R_a = 0,5$  Ом,  $R_v = 10\,000$  Ом. Определить относительную погрешность измерения сопротивления лампы накаливания по схемам рис. 6.18, *а*, *б*. Измерение сопротивления более точным способом показало, что оно составляет  $R_x = 200$  Ом.

**Задача 6.8.** В условие задачи 6.7 внесено изменение: измеряется сопротивление катушки  $R_k = 1$  Ом (вместо лампы). По результатам реше-

ния задач 6.7 и 6.8 сделать заключение о применении схем рис. 6.18, а, б для измерения сопротивлений.

## ГЛАВА 7

### ТРАНСФОРМАТОРЫ

В состав многих электрических устройств и установок переменного тока входит трансформатор — статический электромагнитный аппарат для изменения величины электрического напряжения.

Трансформаторы применяют в электрических сетях при передаче и распределении электрической энергии; в нагревательных, сварочных, выпрямительных электроустановках; в радиоаппаратуре, устройствах автоматики, связи; в электроизмерительной технике и т. д.

Начало техническому использованию трансформаторов положили выдающиеся русские электротехники: П. Н. Яблочков, разработавший однофазный трансформатор с разомкнутым сердечником и в 1876 г. впервые применивший его для осветительной установки с электрическими свечами, и М. О. Доливо-Добровольский, создавший первый трехфазный трансформатор.

В большинстве типов трансформаторов обмотки размещены на ферромагнитном сердечнике, который служит для концентрации магнитного поля и усиления магнитной связи между обмотками. Однако при высоких частотах, чаще всего в радиоаппаратуре, применяют трансформаторы без сердечника (воздушные).

Трансформаторы различают также по числу фаз (однофазные, трехфазные), числу обмоток (двухобмоточные, многообмоточные), способу охлаждения (масляные, сухие). Основную, наиболее многочисленную, группу составляют силовые трансформаторы, предназначенные для повышения или понижения напряжения в электрических сетях и в электрических устройствах различного назначения.

#### § 7.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРА

В § 3.6 было отмечено, что в основе работы трансформаторов находится явление электромагнитной индукции. При одинаковом принципе действия конструкции трансформаторов различны в зависимости от назначения, номинальных величин мощности и напряжения, способа охлаждения.

Отметим также, что рабочий процесс однофазного транс-

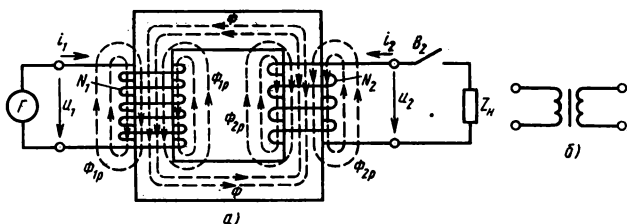


Рис. 7.1

форматора практически такой же, как и в одной фазе трехфазного. Поэтому принципиальную схему, а затем режим рассмотрим на примере силового двухобмоточного однофазного трансформатора.

**Принцип действия трансформатора.** Схема устройства однофазного двухобмоточного трансформатора и его электрическая схема показаны на рис. 7.1, а, б. На схеме представлены только основные части: ферромагнитный сердечник (магнитопровод), две обмотки на сердечнике. Одну обмотку включают в сеть с переменным напряжением. Эту обмотку и относящиеся к ней величины — число витков  $N_1$ , напряжение  $u_1$  и ток  $i_1$  — называют первичными.

К другой обмотке, которую называют вторичной ( $N_2$ ,  $u_2$ ,  $i_2$ ), присоединяют приемник электроэнергии  $Z_H$ .

Намагничивающая сила первичной обмотки  $i_1 N_1$  создает в магнитопроводе переменный магнитный поток  $\Phi$ , который сцеплен с обеими обмотками и в них индуцирует э.д.с.:  $e_1 = -N_1 d\Phi/dt$ ;  $e_2 = -N_2 d\Phi/dt$ .

При синусоидальном изменении магнитного потока  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$  величина э.д.с.  $e = N\omega\Phi_m \cos \omega t = E_m \sin(\omega t - \pi/2)$ ;  $E_m = N\omega\Phi_m$ , где  $\Phi_m$  — амплитуда магнитного потока.

Действующее значение э.д.с.  $E = E_m/\sqrt{2} = N\omega\Phi_m/\sqrt{2}$ .

Отсюда получаем общее выражение э.д.с.

$$E = 4,44fN\Phi_m, \quad (7.1)$$

а также э.д.с. первичной и вторичной обмоток, если вместо общего  $N$  подставить соответствующее число витков  $N_1$  или  $N_2$ .

Из приведенных формул следуют выводы: э.д.с. отстает от магнитного потока на четверть периода; отношение э.д.с. в обмотках трансформатора равно отношению чисел витков  $E_1/E_2 = N_1/N_2$ .

Если выключатель  $B_2$  разомкнут, то трансформатор находится в режиме холостого хода. В этом случае  $i_2 = 0$ , а  $U_2 = E_2$ , ток  $i_1$  мал и мало падение напряжения в первичной обмотке, поэтому

$U_1 \approx E_1$  и отношение э.д.с. можно заменить отношением напряжений

$$U_1/U_2 \approx N_1/N_2 \Rightarrow E_1/E_2 = K. \quad (7.2)$$

Отсюда ясно, что вторичное напряжение может быть меньше или больше первичного в зависимости от отношения чисел витков обмоток. Отношение напряжения первичного ко вторичному при холостом ходе трансформатора называется коэффициентом трансформации.

При замыкании выключателя  $B_2$  под действием э.д.с.  $e_2$  во вторичной цепи возникает ток  $i_2$ . С этого момента в приемник  $Z_n$  поступает электроэнергия от трансформатора, который ее получает из сети.

Передача энергии в самом трансформаторе происходит посредством магнитного потока, связывающего первичную и вторичную обмотки.

Полную мощность однофазного трансформатора, как и во всех электрических цепях, определяют произведением действующих значений напряжения и тока. На входе  $S_1 = U_1 I_1$ ; на выходе  $S_2 = U_2 I_2$ . Потери энергии в трансформаторе невелики (не более 4 %), поэтому  $S_1 \approx S_2$ , т. е. справедливо приближенное равенство  $U_1/U_2 \approx I_2/I_1$ , из которого следует, что ток трансформатора больше на стороне с меньшим напряжением, и наоборот.

Более точный энергетический баланс трансформатора по активной мощности выражается равенством (7.3), согласно которому мощность на выходе  $P_2$  (мощность потребителя) меньше мощности на входе  $P_1$  на величину мощности потерь внутри трансформатора ( $P_m + P_s$ ):

$$P_1 = P_2 + P_m + P_s. \quad (7.3)$$

Мощность потерь показана отдельно в магнитопроводе (потери магнитные или потери в стали  $P_m$ ) и в обмотках (потери электрические или потери в меди  $P_s$ ).

Отношение активной мощности на выходе трансформатора к активной мощности на входе называется коэффициентом полезного действия трансформатора

$$\eta = P_2/P_1. \quad (7.4)$$

**Номинальные значения.** На каждом трансформаторе имеется щиток, где заводом-изготовителем указаны номинальные значения данного трансформатора: мощность, напряжения, токи, частота и др. Номинальные значения характеризуют работу трансформатора в условиях, на которые он рассчитан для нормальной работы.

Номинальная мощность трансформатора — мощность на за-

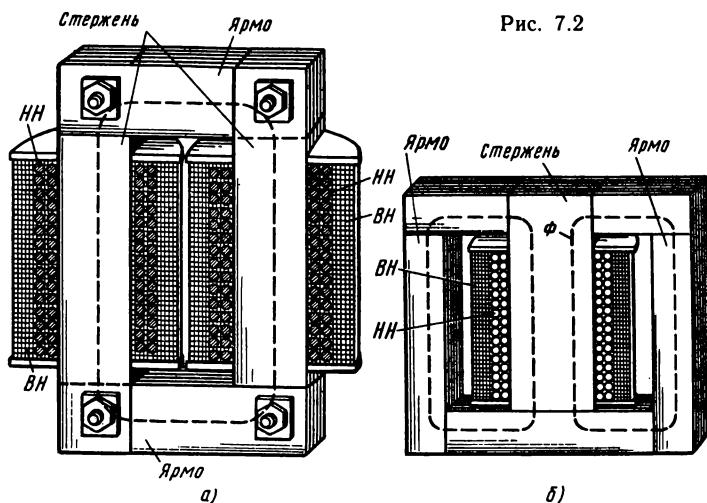


Рис. 7.2

жимах вторичной обмотки, указанная на щитке и выраженная в вольт-амперах или киловольт-амперах. Номинальное первичное напряжение — напряжение, указанное на щитке трансформатора для его первичной обмотки. Номинальное вторичное напряжение — напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе трансформатора и при номинальном напряжении на зажимах первичной обмотки. Номинальные токи трансформатора — первичный и вторичный токи, указанные на щитке и вычисленные по номинальной мощности и номинальным напряжениям — первичному и вторичному.

Номинальные токи вычисляют по формулам  $I_{1\text{ном}} = S_{\text{ном}}/U_{1\text{ном}}$ ;  $I_{2\text{ном}} = S_{\text{ном}}/U_{2\text{ном}}$  (для однофазного трансформатора);  $I_{1\text{ном}} = S_{\text{ном}}/\sqrt{3}U_{1\text{ном}}$ ;  $I_{2\text{ном}} = S_{\text{ном}}/\sqrt{3}U_{2\text{ном}}$  (для трехфазного трансформатора).

**Магнитопроводы.** Магнитопроводы трансформаторов собирают из листов электротехнической стали толщиной 0,5 или 0,35 мм. Перед сборкой листы с обеих сторон изолируют лаком.

Магнитопровод состоит из стержней и ярма (рис. 7.2). На стержнях располагают обмотки, а ярмо соединяет стержни и делает магнитопровод замкнутым. Соединение стержней с ярмом выполняют чаще всего внахлестку, а иногда встык.

В первом случае листы стержней и ярма в местах соединения чередуют (рис. 7.3, а), а после расположения обмоток на стержнях окончательно закладывают листы верхней части ярма и стягивают шпильками.

Во втором случае стержни и части ярма собирают отдельно,

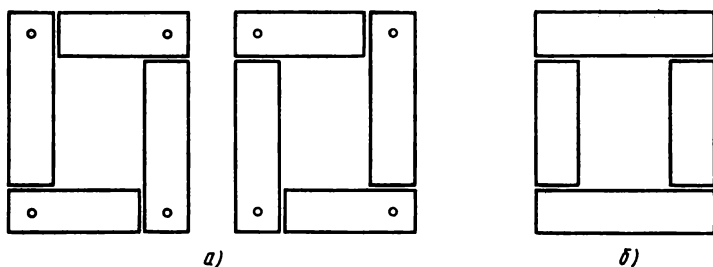


Рис. 7.3

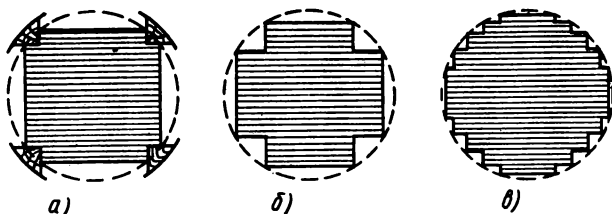


Рис. 7.4

а затем соединяют крепежными деталями (рис. 7.3, б). Сборка внахлестку позволяет сделать воздушные зазоры в стыках минимальными и существенно уменьшить магнитное сопротивление магнитопровода.

Формы сечения стержней и ярма различны в зависимости от мощности трансформатора. Они показаны на рис. 7.4: а — для трансформаторов малой; б — средней и в — большой мощностей. С увеличением числа ступеней сечение стержней более приближается к круговому, что позволяет при той же площади сечения стержня уменьшить среднюю длину витка обмотки и сократить расход обмоточного провода.

По конструкции магнитопровода и расположению обмоток различают трансформаторы двух типов: стержневой (см. рис. 7.2, а, рис. 7.5) и броневой (см. рис. 7.2, б), из которых первый применяют значительно чаще.

**Обмотки.** Конструкция обмоток, их изоляция, способы крепления на стержнях зависят от мощности и напряжения трансформатора.

Обмотки должны иметь достаточно высокую механическую прочность, хорошую электрическую изоляцию, обеспечивать хорошее охлаждение; быть простыми и удобными в изготовлении и недорогими; иметь малые потери энергии.

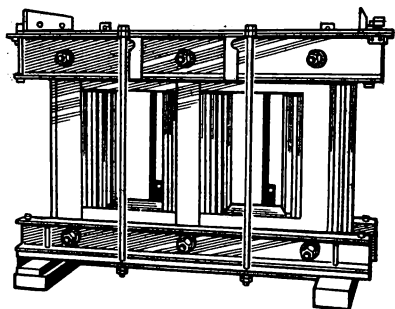


Рис. 7.5

Для изготовления обмоток трансформаторов применяют медные провода круглого или прямоугольного сечения, изолированные хлопчатобумажной пряжей или кабельной бумагой.

В каждом трансформаторе различают обмотку высшего напряжения (ВН) и обмотку низшего напряжения (НН). Практическое значение такого деления

состоит в том, что более высокое напряжение требует более надежной электрической изоляции обмотки, ее входных зажимов.

Поэтому дальше от магнитопровода располагают обмотку ВН. По взаимному расположению различают обмотки концентрические и дисковые чередующиеся (рис. 7.6, а, б), из которых наиболее распространены первые.

*Концентрические* обмотки имеют форму цилиндра. В конструктивном отношении они различаются тем, что могут быть однослойные, двухслойные из прямоугольного провода, многослойные из круглого провода, многослойные катушечные и др. При небольших мощностях трансформатора и низких напряже-

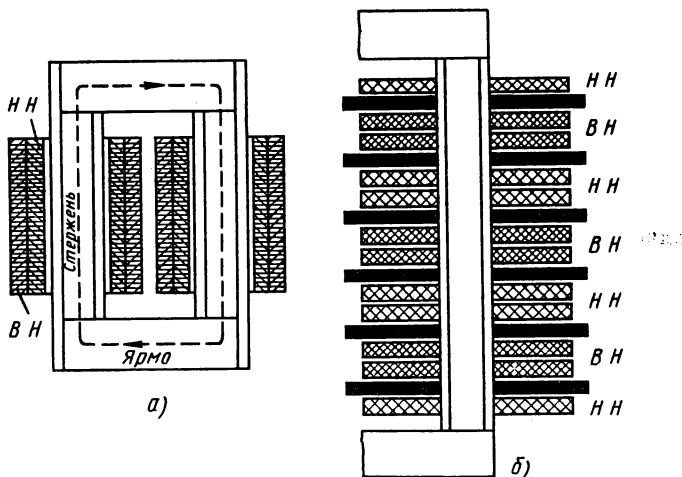


Рис. 7.6

ниях цилиндрические обмотки надевают непосредственно на стержень магнитопровода (прессующие стержень деревянные клинья и планки одновременно выполняют роль изоляции). В других случаях обмотку укладывают на цилиндре из электрокартона или намоточной бумаги, пропитанной бакелитовым лаком.

*Дисковые чередующиеся* обмотки выполняют в форме дисков (витки намотаны в одной плоскости). На стержне магнитопровода отдельные катушки (диски) НН чередуются с катушками ВН (рис. 7.6, б).

**Охлаждение трансформаторов.** Потери энергии в сердечнике и обмотках трансформатора являются причиной выделения теплоты, одна часть которой нагревает трансформатор, а другая передается в окружающую среду. Теплоотдача увеличивается с ростом нагрева и при некоторой температуре устанавливается тепловое равновесие: вся выделенная в трансформаторе теплота рассеивается в окружающей среде.

Установившаяся температура не должна превышать допустимые пределы, в противном случае надежность и срок работы трансформатора значительно уменьшаются из-за резкого ухудшения электрических и механических свойств электроизоляционных материалов.

Теплоотдача трансформаторов малой мощности во многих случаях достаточна для того, чтобы температура не превышала допустимую, и тогда их выполняют «сухими», т. е. с естественным воздушным охлаждением.

Большинство же трансформаторов (из них все сетевые и некоторые специальные) имеют масляное охлаждение, для чего магнитопровод и обмотки помещены в бак с трансформаторным маслом (рис. 7.7), которое усиливает электрическую изоляцию обмоток от магнитопровода и одновременно служит для их охлаждения.

Масло принимает теплоту от магнитопровода и обмоток, передает ее стенкам бака, а со стенок бака теплота рассеивается в окружающем воздухе. Слои масла, соприкасающиеся с источниками теплоты, нагреваются больше, чем наружные, поэтому

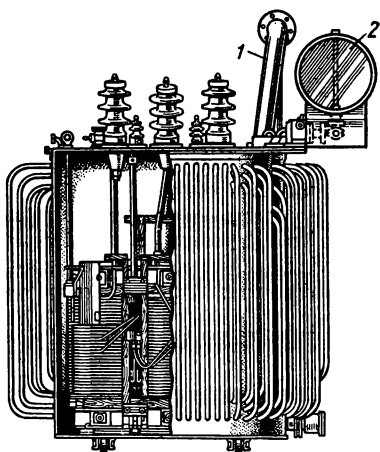


Рис. 7.7



устанавливается движение масла в баке, что способствует лучшему охлаждению магнитопровода и обмоток.

Бак с гладкими стенками обеспечивает достаточное охлаждение в трансформаторах мощностью до 20—30 кВ·А, при большей мощности приходится применять баки гофрированные, трубчатые, с радиаторами. В еще более мощных трансформаторах делают принудительную циркуляцию и охлаждение масла.

При нагревании масло расширяется, поэтому предусматривают резервный объем. Трансформаторы мощностью более 50 кВ·А и при напряжении выше 6 кВ снабжают расширителем 2, который представляет собой сосуд цилиндрической формы, установленный на крышке бака и сообщающийся с ним и атмосферой.

В трансформаторах меньшей мощности расширителя нет, но масло не заливают до самой крышки. В случае значительной перегрузки трансформатора или при коротких замыканиях в обмотках температура масла повышается сверх допустимых пределов и масло разлагается с выделением газов. Во избежание повреждения бака трансформаторы мощностью 1000 кВ·А снабжены выхлопной трубой 1, наружный конец которой закрыт стеклянной мембраной. При опасном повышении давления в баке газы выдавливают мембрану и выходят из бака.

На случай аварийной ситуации, которая сопровождается обильным выделением газов, трансформаторы средней и большой мощности имеют защиту, чувствительным органом которой является газовое реле, установленное в трубе, соединяющей бак с расширителем. При срабатывании газового реле подается предупредительный сигнал, а в случае особо интенсивного газовыделения трансформатор выключается.

#### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Коэффициент трансформации может иметь величину:  $K > 1$ ;  $K < 1$ ;  $K = 1$ . Какая из них соответствует повышающему и понижающему трансформаторам?

2. Можно ли один и тот же трансформатор использовать как понижающий и как повышающий напряжение?

3. Одно из преимуществ сборки сердечника трансформатора внахлестку состоит в том, что удается уменьшить воздушные зазоры в стыках между стержнями и ярмом. Почему принимают меры для уменьшения этих зазоров, хотя по сравнению с размерами магнитопровода они очень малы?

4. В трансформаторах обмотку НН располагают ближе к магнитопроводу, а обмотку ВН дальше. Какие преимущества дает такое расположение с точки зрения электрической изоляции обмоток? с точки зрения расхода меди для устройства концентрических обмоток?

5. Известно, что с увеличением мощности размеры трансформаторов

увеличивают и к.п.д. их растет. Почему же более мощные трансформаторы требуют более интенсивного охлаждения?

**Задача 7.1.** Однофазный трансформатор номинальной мощностью 25 кВ·А питает смешанную нагрузку при напряжении 200 В. Сопротивление нагрузки: активное 2 Ом, индуктивное 1,5 Ом. Найти мощности (активную и индуктивную) дополнительной нагрузки, которую можно включить к трансформатору при условии сохранения коэффициента мощности. Определить мощность дополнительной осветительной нагрузки, которую можно подключить к данному трансформатору.

**Задача 7.2.** К трехфазному трансформатору подключена осветительная нагрузка общей мощностью 60 кВт. Линейные напряжения трансформатора при этой нагрузке  $U_2 = 220$  В,  $U_1 = 6000$  В. Определить токи в обмотках трансформатора, если они соединены звездой, а к.п.д. его при данной нагрузке  $\eta = 0,9$ . Выполнить аналогичный расчет, если нагрузка трансформатора имеет активную мощность  $P_2 = 48$  кВт,  $\cos \varphi_2 = 0,8$ .

## § 7.2. РЕЖИМЫ ТРАНСФОРМАТОРА

При анализе работы трансформатора рассматривают такие режимы: холостой ход, рабочий, короткое замыкание.

Во время нормальной эксплуатации трансформатор находится под нагрузкой (исключая периоды профилактических осмотров и ремонтов), причем технико-экономические показатели рабочего режима будут наилучшими, если трансформатор работает длительно при номинальных напряжениях и с нагрузкой, близкой к номинальной. В отношении испытательных режимов холостого хода и короткого замыкания надо отметить, что их рассмотрение не только помогает лучше понять рабочие процессы и условия эксплуатации, но и позволяет опытным или расчетным путем определить ряд важных характеристик трансформатора.

**Режим холостого хода.** В режиме холостого хода трансформатора (рис. 7.8) первичная обмотка включена в сеть под номинальное напряжение  $U_{1\text{ном}}$  (выключатель  $B_1$  замкнут), а вторичная обмотка разомкнута выключателем  $B_2$  ( $I_2 = 0$ ).

На зажимах вторичной обмотки напряжение равно номинальному  $U_{2х} = U_{2\text{ном}}$ . Измерив напряжения на обмотках, можно найти коэффициент трансформации [см. формулы (7.2)].

Основной магнитный поток  $\Phi$  в сердечнике создается намаг-

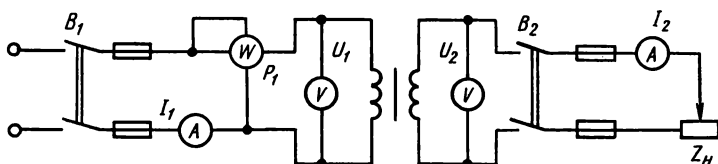


Рис. 7.8

ничающей силой  $I_x N_1$  первичной обмотки, ток которой в этом случае называют током холостого хода ( $I_1 = I_x$ ).

Ваттметр, включенный в цепь первичной обмотки, показывает активную мощность трансформатора при холостом ходе ( $P_x$ ), т. е. мощность потерь в магнитопроводе при номинальном напряжении. Возвращаясь к равенству (7.3), отметим, что  $P_1 = P_x$ ;  $P_2 = 0$ , так как нагрузка отключена; мощность потерь в обмотках выражается формулой (2.14), но ток  $I_2 = 0$ , а  $I_1 = I_x$  по сравнению с номинальным током очень мал (в среднем 5,5 %), поэтому электрические потери можно не учитывать и считать, что в режиме холостого хода  $P_1 = P_x = P_m$ . Вместе с тем величина магнитных потерь при холостом ходе практически такая же, как и в рабочем режиме. Действительно, потери в магнитопроводе возникают от перемагничивания и вихревых токов, но те и другие зависят от величины магнитного потока. Вместе с тем магнитный поток почти не зависит от нагрузки, т. е. он одинаковый по величине при холостом ходе и при полной нагрузке, так как определяется величиной первичного напряжения  $U_1$ , которая в обоих режимах одинакова.

Падение напряжения в обмотках трансформатора при номинальной нагрузке составляет всего 5—10 % от номинального напряжения. Поэтому приблизительное равенство  $U_1 \approx E_1$ , принятое ранее для режима холостого хода, можно принять и для рабочего режима. Иначе говоря, в обоих случаях в первичной обмотке наводится приблизительно одинаковая э.д.с., что возможно только при одинаковой величине магнитного потока [см. формулу (7.1)].

Учитывая активную мощность трансформатора при холостом ходе  $P_m$ , можно в составе тока  $I_x$  выделить активную составля-

ющую  $I_{x,a} = P_m / U_{1\text{ном}}$ , а затем определить реактивную, или намагничивающую, составляющую тока холостого хода  $I_{x,p} = \sqrt{I_x^2 - I_{x,a}^2}$ .

Эти формулы дают основание построить векторную диаграмму трансформатора в режиме холостого хода, пренебрегая магнитным потоком рассеяния и потерями энергии в обмотке (рис. 7.9). Первым на диаграмме нанесен вектор магнитного потока  $\Phi$ , а затем — векторы  $E_1$  и  $E_2$ , которые отстают от потока на угол  $\pi/2$  (см. § 7.1). Далее проведен вектор  $U_1$ , который по величине равен  $E_1$ , но находится с ним в противофазе. Намагничивающий (индуктивный) ток  $I_{x,p}$  отстает от напряжения на  $\pi/2$ , т. е. совпадает по фазе

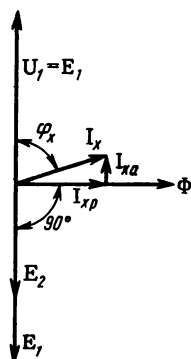


Рис. 7.9

с потоком  $\Phi$ , активная составляющая тока совпадает по фазе с напряжением. Векторная сумма  $I_{x.p} + I_{x.a}$  равна току холостого хода  $I_x$ .

**Рабочий режим.** В рабочем режиме (см. рис. 7.8) выключатели  $B_1$  и  $B_2$  замкнуты, первичная обмотка трансформатора включена в сеть под напряжение (обычно  $U_1 = U_{1ном}$ ), а в цепи вторичной обмотки — нагрузка  $Z_n$ . В обеих обмотках имеются токи ( $I_1$  — первичный,  $I_2$  — вторичный), которые будем считать по значению близкими к номинальным.

В магнитопроводе нагруженного трансформатора магнитный поток создается действием обеих обмоток (в отличие от холостого хода). Однако намагничивающая сила вторичной обмотки  $I_2 N_2$  направлена навстречу намагничивающей силе  $I_1 N_1$  первичной обмотки, что соответствует известному правилу Ленца (см. § 3.6). Результирующую величину намагничивающей силы можно принять такой же, как при холостом ходе, так как магнитный поток сердечника практически не зависит от нагрузки. Отсюда следует уравнение намагничивающих сил нагруженного трансформатора в векторной форме  $F_1 + F_2 = F_x$ , а в численном выражении

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_x N_1. \quad (7.5)$$

Отмечено, что ток холостого хода  $I_x$  мал по сравнению с рабочими токами в обмотках, поэтому величина  $I_x N_1$  мала по отношению к  $I_1 N_1$  или  $I_2 N_2$ . Рассматривая качественную сторону вопроса, величину  $I_x N_1$  необходимо учитывать, а с количественной точки зрения ее можно из уравнения (7.5) исключить. Тогда получим приблизительное равенство  $I_1 N_1 \approx -I_2 N_2$ , указывающее на то, что при изменении тока  $I_2$  (изменение нагрузки) пропорционально изменяется ток в первичной обмотке:

$$I_1 = I_2 N_2 / N_1 = I_2 / K. \quad (7.6)$$

Коэффициентом пропорциональности является величина, обратная коэффициенту трансформации.

Принцип действия и режим холостого хода трансформатора ранее рассмотрены без учета падений напряжения в обмотках. В рабочем режиме их учитывают. Активные падения напряжения обусловлены активными сопротивлениями обмоток  $R_1$ ,  $R_2$ , реактивные — магнитными потоками рассеяния (рис. 7.10).

Те же токи в обмотках, которые образуют рабочий поток  $\Phi$ , создают и магнитные потоки рассеяния  $\Phi_{1p}$  и  $\Phi_{2p}$  (см. рис. 7.1). Но рабочий поток замыкается по магнитопроводу, а линии магнитной индукции, образующие потоки рассеяния, замыкаются частично или полностью по воздуху и другим неферромагнитным участкам.

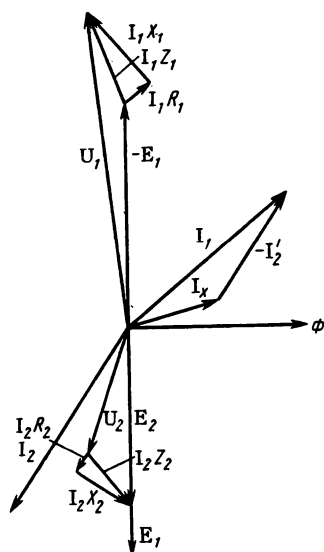


Рис. 7.10

Поэтому рабочий поток зависит от тока согласно кривой намагничивания сердечника, а потоки рассеяния пропорциональны токам.

Из-за различия сред потоки рассеяния рассматривают независимо от рабочего потока и наводимые ими э.д.с. учитывают отдельно: э.д.с.  $E_1$  и  $E_2$  вводят в уравнения и векторные диаграммы непосредственно, а вместо э.д.с., связанных с потоками рассеяния, вводят падения напряжения в индуктивных сопротивлениях  $X_1$  и  $X_2$ , т. е. рассматривают обмотки трансформатора в части потоков рассеяния, как обычно индуктивные катушки (см. § 4.2).

Уравнения напряжений первичной и вторичной цепей трансформатора, записанные в векторной форме, являются основой для построения векторной диаграммы рис. 7.10:

$$U_1 = -E_1 + I_1 R_1 + I_1' X_1 = -E_1 + I_1 Z_1; \quad (7.7)$$

$$U_2 = E_2 - I_2 R_2 - I_2 X_2 = E_2 - I_2 Z_2. \quad (7.8)$$

На векторной диаграмме ток  $I_1$  представлен в виде векторной суммы тока холостого хода  $I_x$  и вторичного тока, приведенного к первичной обмотке.

Величины напряжения и тока на первичной и вторичной стороне трансформатора отличаются примерно в  $K$  раз ( $K$  — коэффициент трансформации), что затрудняет расчеты и построение векторной диаграммы. Приведением вторичного тока и других величин к первичному числу витков эти трудности устраняют.

Приведенный вторичный ток  $I_2'$  определяется из условия равенства намагничивающих сил  $I_2 N_2 = I_2' N_1$ ;  $I_2'/I_2 = N_2/N_1$ . В уравнении (7.7) первичное напряжение  $U_1$  представлено в виде суммы двух слагаемых, одно из которых уравнивает э.д.с.  $E_1$ , а другое равно падению напряжения в первичной обмотке  $I_1 Z_1$ . На вторичной стороне трансформатор является источником энергии и его напряжение  $U_2 < E_2$  на величину  $I_2 Z_2$  падения напряжения во вторичной обмотке.

Напряжение  $U_2 = I_2 Z_2$  приложено непосредственно к зажимам электроприемника, поэтому особый интерес представляет изменение напряжения на выходе трансформатора при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной ( $\Delta U\%$ ):

$$\Delta U \% = \frac{U_{2\text{ном}} - U_2}{U_{2\text{ном}}} 100. \quad (7.9)$$

Величину изменения напряжения [выражение (7.9)] с небольшой погрешностью можно найти также по формуле  $\Delta U \% = U_{\kappa_a} \cos \varphi \pm \pm U_{\kappa_p} \sin \varphi$ , в которой  $U_{\kappa_a}$  и  $U_{\kappa_p}$  — активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания в процентах; знак плюс относится к индуктивной, а минус — к емкостной нагрузкам.

**Режим короткого замыкания.** В режиме короткого замыкания трансформатора первичная обмотка включена под некоторое напряжение  $U_1$ , а вторичная обмотка замкнута на себя ( $U_2 = 0$ ).

В этом режиме (см. рис. 7.8) выключатель  $B_2$  замкнут, а движок нагрузочного элемента находится в крайнем левом положении ( $Z_n = 0$ ). Короткое замыкание может случиться во время эксплуатации трансформатора, тогда первичное напряжение равно номинальному или близко к нему. В этом случае в обеих обмотках токи резко увеличиваются в 10—20 раз и более против номинальных, потому что сопротивления обмоток невелики. Такой режим очень опасен для трансформатора, так как возможны чрезмерное повышение температуры обмоток и большие механические усилия между токоведущими элементами. Поэтому при создании трансформатора обеспечивают достаточную механическую и термическую прочность, а в схеме его предусматривают противоаварийную защиту, способную отключить трансформатор от сети за время менее одной секунды.

Испытательное короткое замыкание трансформатора, в отличие от аварийного, проводят преднамеренно, причем первичное напряжение снижают до величины  $U_1 = U_{\kappa}$ , при котором в обеих обмотках устанавливаются токи, равные номинальным токам данного трансформатора.

При проведении опыта короткого замыкания определяют ряд характеристик трансформатора, в том числе напряжение короткого замыкания

$$U_{\kappa} \% = 100 U_{\kappa} / U_{1\text{ном}}, \quad (7.10)$$

мощность потерь короткого замыкания  $P_{\kappa}$ , т. е. мощность потерь в обмотках

$$P_{\kappa} = P_s = I_{1\text{ном}}^2 R_1 + I_{2\text{ном}}^2 R_2. \quad (7.11)$$

В данном режиме энергия в приемник не передается, т. е. мощность потерь в магнитопроводе мала, так как напряжение на первичной обмотке составляет всего 5—10 % от номинального и магнитный поток в сердечнике мал. Полагая  $P_{\text{м}} \approx 0$ , на основе равенства (7.3) можно заключить, что при испытательном режиме короткого замыкания ваттметр на первичной стороне трансформатора показывает мощность потерь в обмотках при номинальных токах.

**Коэффициент полезного действия трансформатора.** Потери энергии в трансформаторе в целом относительно невелики. В зависимости от мощности трансформатора к.п.д. имеет величину от  $\eta = 0,96$  (при  $S_{\text{ном}} = 5 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ) до  $0,995$  ( $S_{\text{ном}}$  — десятки тысяч  $\text{кВ} \cdot \text{А}$ ).

Поэтому при непосредственном измерении мощности на входе  $P_1$  и выходе  $P_2$  формула (7.4) может не дать точного результата. Применяют более надежный косвенный метод определения к.п.д. по формуле (7.12) или (7.13) после измерения мощности потерь холостого хода и короткого замыкания:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_3 + P_{\text{м}}} \quad (7.12)$$

Эта же формула в развернутом виде

$$\eta = \frac{m U_2 I_2 \cos \varphi_2}{m U_2 I_2 \cos \varphi_2 + m I_2^2 R_{\text{к}} + P_{\text{м}}} \quad (7.13)$$

где  $m$  — число фаз.

Величина к.п.д. трансформатора зависит от его нагрузки. Кроме того, она тем больше, чем выше коэффициент мощности потребителя  $\cos \varphi_2$ . Наибольший к.п.д. трансформатор имеет при нагрузке, которая составляет 50—70 % от номинальной, что соответствует средней эксплуатационной нагрузке трансформатора.

#### *Контрольные вопросы и задачи*

1. В какой обмотке (первичной или вторичной) при рабочем режиме трансформатора ток больше, если коэффициент трансформации  $K > 1$ ?  $K < 1$ ?

2. Площади поперечного сечения обмоточных проводов, из которых изготовлены первичная и вторичная обмотки трансформатора, как правило, различны по величине. Как объяснить это различие?

3. Для силовых трансформаторов определяют изменение вторичного напряжения при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке  $\Delta U$  %. В чем состоит практическое значение этой характеристики трансформатора для потребителей, подключенных к нему?

4. Почему к.п.д. трансформатора, соответствующий номинальному режиму, определяют по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания?

5. Почему потери энергии в сердечнике трансформатора называют потерями холостого хода, а потери в обмотках — потерями короткого замыкания?

**Задача 7.3.** Для однофазного трансформатора в результате испытания в режиме холостого хода и опытного короткого замыкания известны:  $U_{1x}=3300$  В;  $U_{2x}=220$  В;  $I_{1x}=0,182$  А;  $P_x=70$  Вт;  $U_k=188$  В;  $I_{1k}=3,04$  А;  $I_{2k}=45,5$  А;  $P_k=250$  Вт. Определить: номинальную мощность  $S_{ном}$ , активные ( $R_1$ ,  $R_2$ ) и реактивные ( $X_1$ ,  $X_2$ ) сопротивления обмоток, считая, что мощность потерь короткого замыкания  $P_k$  и напряжение короткого замыкания между обмотками распределяются поровну; к.п.д. трансформатора при полной нагрузке и  $\cos \varphi=0,8$ . Выполнить аналогичный расчет для другого трансформатора, если:  $U_{1x}=6600$  В;  $U_{2x}=220$  В;  $I_{1x}=0,3$  А;  $P_x=300$  Вт;  $U_k=363$  В;  $I_{1k}=3,04$  А;  $I_{2k}=91$  А;  $P_k=600$  Вт.

**Задача 7.4.** Трехфазный трансформатор с номинальной мощностью 100 кВ·А имеет мощность потерь холостого хода  $P_x=600$  Вт, мощность потерь короткого замыкания  $P_k=2400$  Вт, напряжение короткого замыкания  $U_k=5,5\%$ . Определить: изменение напряжения в процентах при полной нагрузке, полагая коэффициент мощности вторичной цепи  $\cos \varphi_2=0,8$  (индуктивная нагрузка); к.п.д. трансформатора при том же  $\cos \varphi_2$  и нагрузке  $S_{ном}/2$ . Найти изменение напряжения (в %) и к.п.д. данного трансформатора при полной нагрузке и коэффициентах мощности во вторичной цепи  $\cos \varphi_2=1$  и  $\cos \varphi_2=0,6$  (емкостная нагрузка).

### § 7.3. ТИПЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Большое разнообразие типов и конструкций трансформаторов обусловлено различием их по назначению, а также по мощности и напряжению.

Рассмотрим некоторые из них, имеющие в практике наибольшее применение.

**Трехфазный трансформатор.** Схема устройства трехфазного трансформатора показана на рис. 7.11. На каждом из трех стержней сердечника расположены две обмотки (ВН и НН) одной фазы. Вопросы, рассмотренные в двух предыдущих параграфах, относятся как к однофазному, так и трехфазному трансформаторам (применительно к одной фазе).

Дополнительно отметим, что обмотки трехфазных трансформаторов соединяют звездой (Y) или треугольником ( $\Delta$ ).

Из всех возможных вариантов ГОСТ 401—41 предусмотрены только три схемы (рис. 7.12, а, б, в) и две группы соединения 11 и 12. В основе деления трансформаторов по группам соединения находится угол  $\alpha$  сдвига фаз между линейными напряжениями — первичным и вторичным. Величина угла  $\alpha$  зависит от спосо-



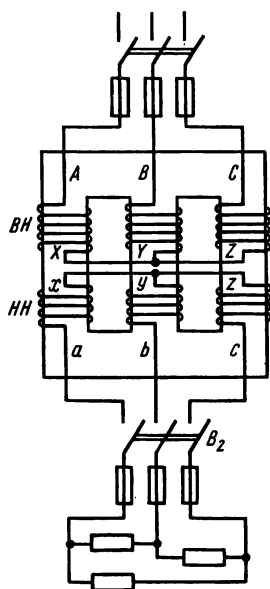


Рис. 7.11

ба соединения, направления намотки и обозначения зажимов обмоток.

Влияние последних двух факторов можно показать на примере однофазного трансформатора по рис. 7.13, где зажимы ВН и НН обозначены соответственно А, Х и а, х.

В случае одинакового направления намотки и обозначения зажимов, как на рис. 7.13, а, э.д.с. обеих обмоток направлены одинаково относительно одноименных зажимов (например, от концов к началам). Следовательно, напряжения  $U_1$  и  $U_2$  на зажимах обеих обмоток совпадают по фазе, что отмечено на векторной диаграмме.

Группу соединения принято обозначать, сопоставляя относительное положение векторов этих напряжений с положением стрелок на циферблате часов.

Вектор первичного напряжения  $U_1$  совмещают с минутной стрелкой

Схемы соединения обмоток		Диаграммы векторов		Условные обозначения
ВН	НН	ВН	НН	
а)				
б)				
в)				

Рис. 7.12

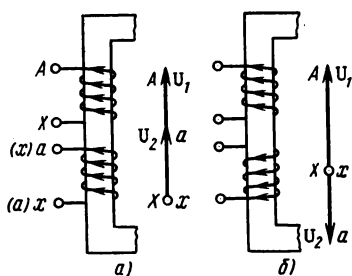


Рис. 7.13

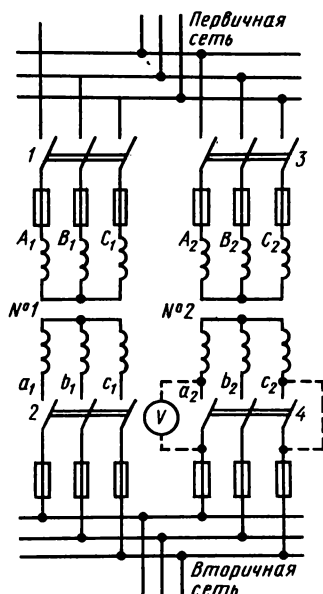


Рис. 7.14

часов, направленной к цифре 12, вектор вторичного напряжения  $U_2$  принимают за часовую стрелку. В рассмотренном случае оба вектора ( $U_1$  и  $U_2$ ) направлены к цифре 12 (часы показывают время 12 ч) и этой цифрой обозначают группу соединения трансформатора.

Если изменить обозначение зажимов вторичной обмотки (на рис. 7.13, а буквы в скобках) или изменить направление намотки (рис. 7.13, б), то вектор вторичного напряжения  $U_2$  на диаграмме будет направлен по отношению к  $U_1$  в противоположную сторону и группу обозначают цифрой 6.

В трехфазном трансформаторе при соединении обмоток по схеме рис. 7.12, а ( $Y/Y_0 - 12$ ) первичное и вторичное линейные напряжения совпадают по фазе (рис. 7.13, а), поэтому расположение векторов относительно циферблата часов в описанном порядке указывает группу соединений 12.

В данной схеме на вторичной стороне вместе с началами фаз выведена нулевая точка, что и отмечено в условном обозначении  $Y_0$  в знаменателе. Аналогично определяют группу соединений по схеме рис. 7.12, б, которую обозначают  $Y/\Delta - 11$  (см. там же векторную диаграмму).

Понятие о группе соединений имеет важное значение при включении трансформаторов на параллельную работу, когда первичные обмотки получают энергию от общего источника, а вто-

ричные снабжают энергией общего потребителя (рис. 7.14). Трансформаторы можно включить на параллельную работу, если у них: 1) группа соединений одна и та же; 2) первичные и вторичные номинальные напряжения одинаковы (разница в коэффициентах трансформации не должна превышать 0,5 %); 3) напряжения короткого замыкания одинаковы (допускается отклонение  $\pm 10\%$ ).

Невыполнение первого и второго требований повлечет возникновение больших уравнивающих токов в обмотках трансформаторов при холостом ходе, что при малых сопротивлениях обмоток практически равносильно короткому замыканию.

Для того чтобы не допустить аварии, включение трансформаторов проводят в определенном порядке (по специальной инструкции), причем обязательна контрольная проверка, например, с помощью вольтметра  $V$  (во вторичной цепи). Выключатель, к зажимам которого присоединен вольтметр, замыкают последним, но только при отсутствии напряжения между зажимами выключателя.

Нагрузка трансформаторов, работающих параллельно, должна распределяться пропорционально их номинальной мощности. Это возможно при выполнении третьего требования. В противном случае один трансформатор будет перегружен, а другой недогружен.

**Многообмоточные трансформаторы.** Трансформатор называют многообмоточным, если он имеет один сердечник, а количество обмоток больше двух (на одну фазу). Такого типа трансформаторы применяют в энергетических установках (в основном, трехобмоточные с двумя вторичными обмотками), в бытовых электроприборах, аппаратуре радио и автоматики.

В электрической сети трехобмоточный трансформатор с экономической выгодой заменяет два двухобмоточных, если имеется необходимость получить на вторичной стороне два различных номинальных напряжения.

Многообмоточные трансформаторы для бытовой электро- и радиоаппаратуры изготавливают с несколькими вторичными обмотками для питания различных цепей приборов (например, в радиоаппаратах — цепей анода, накала, сигнальных и т. д.), причем в первичной обмотке предусматривают возможность переключения на различные напряжения (например, 220 и 127 В).

**Автотрансформаторы.** Принципиальная схема понижающего автотрансформатора показана на рис. 7.15, а, повышающего — на рис. 7.15, б. Из рисунка видно, что автотрансформатор имеет обмотку, часть которой относится к первичной и вторичной цепям.

Первичное напряжение  $U_1$  равномерно распределено между витками в количестве  $N_1$  и на один из них приходится напряжение

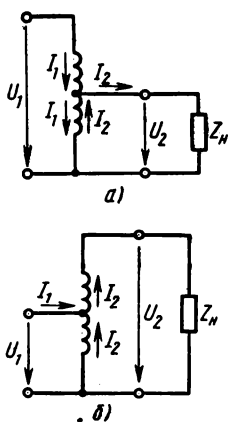


Рис. 7.15

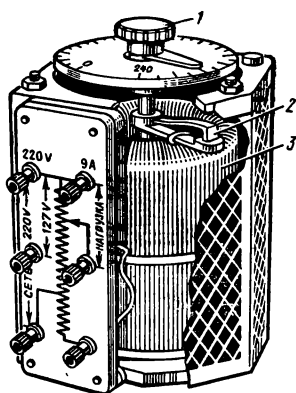


Рис. 7.16

$U_1/N_1$ . Вторичное напряжение пропорционально числу витков  $N_2$ , относящихся ко вторичной цепи  $U_2 = U_1 N_2/N_1$ . Отсюда следует соотношение первичного и вторичного напряжений  $U_1/U_2 = N_1/N_2$ , такое же, как у однофазного трансформатора.

Автотрансформаторы применяют для сравнительно небольшого изменения напряжения (коэффициент трансформации  $K = 1,5 \div 2$  при высоких и не более  $K = 3$  при низких напряжениях).

Экономическая целесообразность применения автотрансформаторов в электрических сетях уменьшается с увеличением коэффициента трансформации; кроме того, ограничение вносит электрическая связь цепей высшего и низшего напряжения. Например, питание приемников с номинальным напряжением 220 В через автотрансформатор от сети 6000 В невозможно, так как это опасно для персонала, обслуживающего низковольтное оборудование, а распределительная сеть должна иметь изоляцию с расчетом на 6000 В, что обходится значительно дороже, чем при низком напряжении 220 В. Изменением числа витков на вторичной стороне автотрансформатора можно регулировать вторичное напряжение, что используют при устройстве автотрансформаторов малой мощности для лабораторных установок.

На рис. 7.16 показан лабораторный автотрансформатор со скользящим контактом между обмоткой 3 и подвижной щеткой 2, которую можно перемещать рукояткой 1 и этим регулировать напряжение на нагрузке.

Для ступенчатого изменения напряжения делают несколько отводов от обмотки на вторичной стороне и устанавливают переключатель. Обмотки трехфазного автотрансформатора соединяют звездой с выводом нулевой точки.

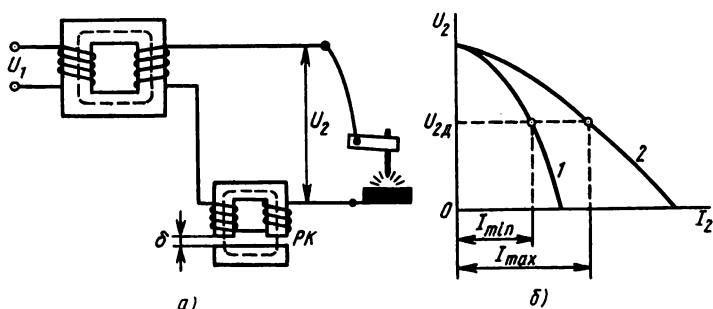


Рис. 7.17

Автотрансформаторы соответствующей конструкции применяют для пуска электродвигателей переменного тока, для связи двух электрических систем с различными напряжениями, а также в распределительных сетях.

**Сварочные трансформаторы.** Трансформатор для дуговой сварки (рис. 7.17, а), рассчитанный для включения в сеть 220 или 380 В, на вторичной стороне имеет напряжение холостого хода 60—70 В, достаточное для зажигания электрической дуги; крутопадающую внешнюю характеристику (рис. 7.17, б) и связанное с этим незначительное изменение тока при резких и частых скачках нагрузки от холостого хода до короткого замыкания; повышенную индуктивность в сварочной цепи ( $\cos \varphi = 0,4 \div 0,5$ ).

Эти свойства обеспечивают устойчивое непрерывное горение электрической дуги и ограничение тока короткого замыкания в пределах двукратного значения номинального тока.

Для увеличения индуктивности искусственно увеличивают магнитное рассеяние трансформатора или включают последовательно во вторичную цепь реактивную катушку (РК). На магнитное сопротивление дополнительной катушки можно влиять путем изменения воздушного зазора. Это приводит к изменению индуктивного сопротивления и сварочного тока.

**Измерительные трансформаторы.** В электрических установках высокого напряжения применяют измерительные трансформаторы напряжения и тока, с помощью которых выполняют одновременно две задачи: 1) отделяют от сети высокого напряжения цепи измерительных приборов, чем обеспечивают безопасность их обслуживания и упрощают их электроизоляцию; 2) расширяют пределы измерения приборов, что дает возможность применить для измерения больших напряжений и токов стандартные приборы (вольтметры до 100 В и амперметры до 5 А).

Измерительный трансформатор напряжения (рис. 7.18, а)

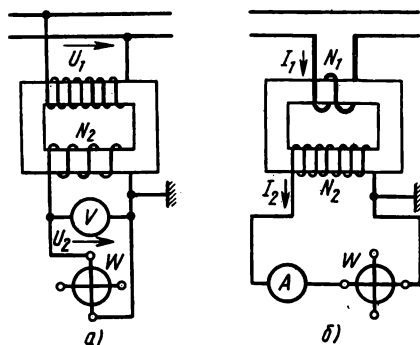


Рис. 7.18

первичной обмоткой включают в высоковольтную сеть на измеряемое напряжение (параллельно). При номинальном первичном напряжении вторичное напряжение составляет 100 В. Во вторичные цепи трансформаторов напряжения включают вольтметры, обмотки напряжения ваттметров и других приборов, реле напряжения.

Сопротивление этих приборов относительно велико (сотни и тысячи ом), и, несмотря на то что по отношению ко вторичной обмотке их включают параллельно, общее сопротивление нагрузки такое, что трансформатор напряжения работает в режиме, близком к холостому ходу. Поэтому падения напряжения в обмотках малы, следовательно, с достаточной для практики точностью можно считать, что измеряемое напряжение  $U_1$  пропорционально показаниям вольтметра  $U_2$  во вторичной цепи  $U_1 = K_U U_2$ , где  $K_U$  — коэффициент трансформации трансформатора напряжения ( $K_U = N_1/N_2 \gg 1$ ).

Режим короткого замыкания для измерительного трансформатора напряжения опасен так же, как и для силового трансформатора. Измерительный трансформатор тока (рис. 7.18, б) первичной обмоткой, которая имеет один или несколько витков, включают в цепь измеряемого тока (последовательно). При номинальном первичном токе вторичный ток составляет 5 или 10 А. Во вторичные цепи трансформаторов тока включают амперметры, токовые обмотки ваттметров и других приборов, токовые реле. Сопротивление этих приборов мало (доли ома), и, несмотря на то что по отношению ко вторичной обмотке их включают последовательно, общее сопротивление нагрузки составляет менее 1 Ом, поэтому трансформатор тока работает в режиме, близком к короткому замыканию.

Величина намагничивающей силы  $I_x N_1$  [см. уравнение (7.5)] трансформатора тока маленькая (оба множителя в произведении малы), поэтому с достаточной для практики точностью можно считать, что измеряемый ток  $I_1$  пропорционален показаниям амперметра  $I_2$  во вторичной цепи:  $I_1 = K_I I_2$ , где  $K_I$  — коэффициент трансформации трансформатора тока ( $K_I = N_2/N_1 \gg 1$ ).

В режиме холостого хода  $I_2 = 0$ , а ток  $I_1$  не уменьшается, поэтому намагничивающая сила  $I_1 N_1$  создает большой магнитный поток в сердечнике. В результате резко увеличиваются магнитные потери в сердечнике, который из-за этого перегревается; э.д.с. во вторичной обмотке тоже значительно увеличивается и достигает величины, опасной для обслуживающего персонала. По этой причине режим холостого хода трансформатора тока недопустим, поэтому при отключении прибора во вторичной цепи вторичную обмотку замыкают накоротко.

Один из выводов и кожух измерительного трансформатора (напряжения и тока) заземляют для повышения безопасности обслуживания приборов.

### Контрольные вопросы и задачи

1. Какие схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора возможны, кроме приведенных на рис. 7.12? К какой группе соединений относится каждая из предложенных вами схем?

2. В схеме рис. 7.14 контрольный вольтметр измеряет в одной фазе напряжение между зажимами разомкнутого выключателя. Почему зажимы того же выключателя в другой фазе соединены между собой проводом?

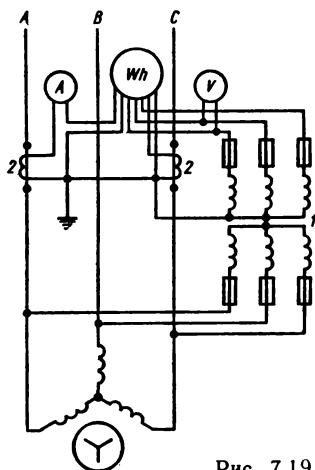


Рис. 7.19

3. Два трансформатора одинаковой мощности имеют неодинаковые напряжения короткого замыкания, а точнее  $U_{к1} > U_{к2}$ . Какой из этих трансформаторов при параллельной работе нагружен меньше?

4. В рабочем режиме измерительных трансформаторов напряжения и тока один вывод вторичной обмотки и кожух заземлены (см. рис. 7.18, а, б) для повышения безопасности обслуживания приборов. В чем состоит опасность при отсутствии такого заземления?

5. Для регулирования величины сварочного тока изменяют воздушный зазор в сердечнике реактивной катушки (см. рис. 7.17). В какую сторону изменится сварочный ток, если воздушный зазор увеличить?

**Задача 7.5.** В одной фазе трехфазного трансформатора первичная обмотка имеет  $N_1 = 2080$  вит, вторичная  $N_2 = 80$  вит. Первичное линейное напряжение трансформатора  $U_{\text{ном}} = 3300$  В. Определить вторичное линейное напряжение, коэффициенты трансформации фазных и линейных напряжений при соединении обмоток по схемам: Y/Y; Y/Δ; Δ/Y; Δ/Δ.

**Задача 7.6.** На рис. 7.19 показана схема включения электроизмерительных приборов через измерительные трансформаторы тока 2 и напряжения 1 в трехфазной цепи. Составить аналогичную схему, в которой кроме указанных электроизмерительных приборов включены аппараты защиты: два токовых реле и одно реле напряжения. Составить схему для измерения тока, напряжения, мощности в однофазной цепи через измерительные трансформаторы тока и напряжения.

## ГЛАВА 8

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Физическую основу работы электрических машин всех типов составляют электромагнитные явления: силовое действие магнитного поля и электромагнитная индукция. В § 3.6 показаны принципиальные возможности взаимного преобразования механической и электрической энергий. Эти возможности в промышленных масштабах реализуют посредством электрических машин.

Для преобразования механической энергии в электрическую служат электрогенераторы, а электрической энергии в механическую — электродвигатели.

В настоящее время наибольшее применение находят электрические машины переменного тока синхронные и асинхронные. Машины обоих типов могут работать в режимах генератора и двигателя, но в практике наиболее широко применяются синхронные генераторы и асинхронные двигатели.

## § 8.1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Конструкции и рабочие процессы электрических машин переменного тока различаются в зависимости от их назначения. Однако все они имеют неподвижную часть — статор и вращающуюся часть — ротор, а в принципе их работы лежит использование вращающегося магнитного поля.

**Конструктивные схемы основных типов машин переменного тока.** На рис. 8.1, а представлена конструктивная схема асинхронной машины, в которую входят сердечник и обмотка статора,



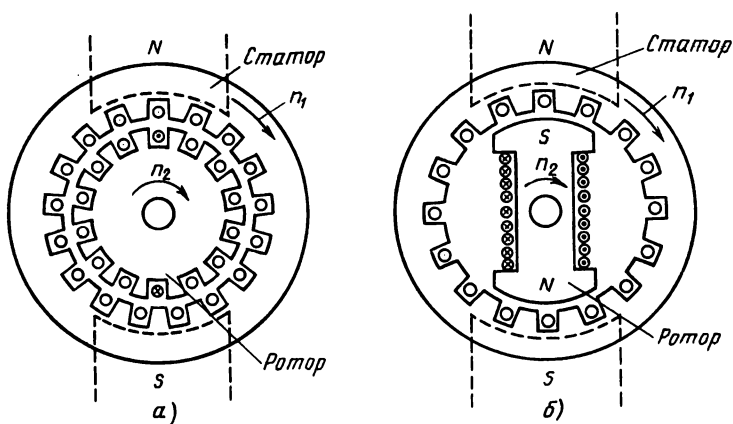


Рис. 8.1

сердечник и обмотка ротора. На этой схеме ферромагнитные сердечники статора и ротора имеют цилиндрическую форму, причем внутрь полого сердечника статора входит сердечник ротора. Они разделены воздушным зазором и вместе составляют магнитопровод машины. На внутренней поверхности сердечника статора и внешней поверхности сердечника ротора имеются пазы, в которые заложены проводники обмоток.

На схеме синхронной машины (рис. 8.1, б) сердечник и обмотка статора такие же, как на первой схеме, но ротор показан с явно выраженными магнитными полюсами (применяют также синхронные машины с неявно выраженными полюсами).

Магнитное поле машины рассмотрим в случае трехфазной обмотки статора, которая имеет по одной катушке на фазу (каждая катушка представлена на схеме рис. 8.4 одним витком). Катушки на статоре расположены так, что оси их пересекаются под углом  $120^\circ$  друг к другу.

Синусоидальные токи в катушках имеют одинаковые амплитуду и частоту, но по фазе сдвинуты на  $120^\circ$ . Условно положительное направление токов в обмотках отмечено крестиками в начале витков и точками в конце. Этим направлениям токов по правилу буравчика соответствуют положительные направления осей магнитных потоков, которые совпадают с осями одноименных катушек. Магнитное поле такой системы обмоток с токами образуется наложением полей отдельных фаз.

**Магнитное поле обмотки одной фазы.** Одна фаза трехфазной обмотки показана на рис. 8.2, а, причем проводники ее равномерно распределены на  $1/3$  внутренней поверхности статора. Две другие фазы порознь занимают такие же участки поверхности

статора; так что в целом трех-  
фазная обмотка представляет  
собой систему проводников, рав-  
номерно распределенных вдоль  
воздушного зазора по всей ок-  
ружности статора. Плоскость,  
перпендикулярная оси магнит-  
ного потока, которая делит ста-  
тор и ротор на две части, назы-  
вается нейтралью. На одной  
из них находится северный маг-  
нитный полюс, а на другой юж-  
ный (на рис. 8.2 обозначены по-  
люса ротора).

Для наглядности рассмот-  
рим также развертку статора на  
рис. 8.2, б (цилиндрическая по-  
верхность статора разрезана по  
образующей и развернута на  
плоскости).

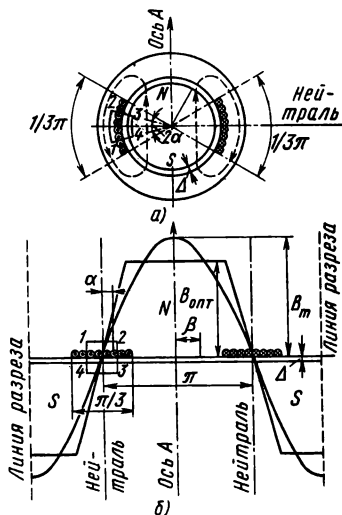


Рис. 8.2

Вокруг части проводников  
катушки (в пределах центрального угла  $2\alpha$ ) проведен замкнутый  
контур  $1-2-3-4$ , для которого по закону полного тока  $IN_\alpha = \sum HI$ ,  
где  $N_\alpha$  — число проводников с токами, сцепленных с выбранным  
контуром;  $I$  — ток в проводниках.

Магнитное сопротивление магнитопровода вдоль выбранного  
контура складывается из сопротивлений стальной части (в ста-  
торе и роторе) и двух воздушных зазоров. Но  $\mu_{ст} \gg \mu_0$ , поэтому  
допустимо учесть только магнитное сопротивление воздушных  
зазоров, в которых напряженность магнитного поля одинакова.

Следовательно,  $H_0 2\Delta = IN_1 2\alpha$ ;  $H_0 = \frac{IN_1 \alpha}{\Delta}$ , где  $N_1 = N_\alpha / 2\alpha$  — чис-  
ло проводников, приходящихся на единицу центрального угла.

Отсюда следует, что магнитная индукция в воздушном зазоре  
в той части окружности статора, где расположены проводники  
обмотки, пропорциональна углу  $\alpha$ , т. е. вдоль воздушного зазора  
распределена по линейному закону (рис. 8.2, б)  $B_0 = \mu_0 H_0 =$   
 $= \mu_0 IN_1 \alpha / \Delta$ . Наибольшее значение магнитная индукция имеет  
на границах центрального угла, т. е. при  $2\alpha = \pi$   $B_{0m} =$   
 $= \mu_0 IN\pi / 6\Delta$  и остается такой на протяжении части окружности  
статора, где нет проводников.

Таким образом, однофазная обмотка, имеющая одну катушку  
с током, образует одну пару магнитных полюсов ( $N$  и  $S$ ), а гра-  
фик распределения магнитной индукции  $B(\alpha)$  представляет со-  
бой равнобедренную трапецию.

По форме такой график близок к синусоиде, поэтому для упрощения дальнейшего рассмотрения вопроса заменим действительный график синусоидой с амплитудой  $B_m$ , уравнение которой относительно оси полюсов (ось  $A$ ) выражено формулой

$$B = B_m \cos \beta. \quad (8.1)$$

При постоянном токе такое распределение магнитной индукции вдоль воздушного зазора сохраняется, пока имеется ток в обмотке.

При переменном токе в обмотке  $i = I_m \sin \omega t$  в любой момент времени пространственное распределение магнитной индукции остается синусоидальным, как показано на рис. 8.3, где изображены кривые магнитной индукции в различные моменты периода тока (кривые отмечены цифрами 1, 2 и т. д.). Уравнение любой из них согласно (8.1)  $B = B_{mk} \cos \beta$ , где индекс « $k$ » обозначает номер кривой. В каждой точке воздушного зазора величина магнитной индукции изменяется по тому же закону, что и ток, поэтому амплитуда ее изменяется по уравнению  $B_{mk} = B_m \sin \omega t$ . Отсюда следует уравнение магнитной индукции

$$B = B_m \sin \omega t \cos \beta. \quad (8.2)$$

Магнитное поле в этом случае «пульсирует», поэтому его называют пульсирующим.

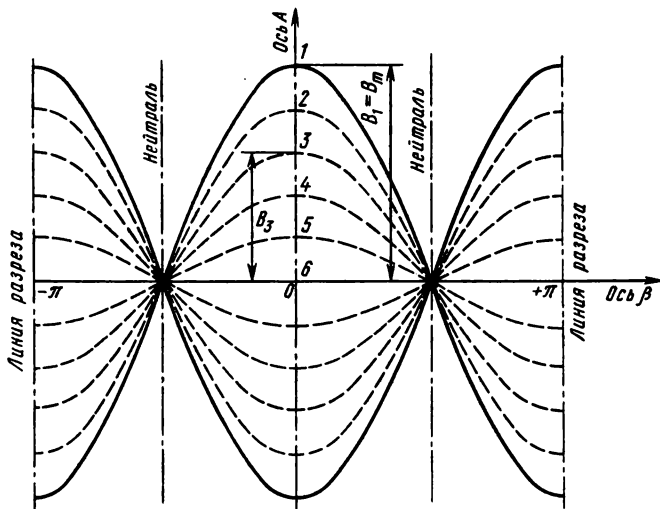


Рис. 8.3

**Разложение пульсирующего магнитного поля на два вращающихся.** Из тригонометрии известно, что  $\sin \omega t \cos \beta = \frac{1}{2} \times [\sin (\omega t - \beta) + \sin (\omega t + \beta)]$ . Согласно этому выражению уравнение (8.2) можно записать так:

$$B = \frac{B_m}{2} \sin (\omega t - \beta) + \frac{B_m}{2} \sin (\omega t + \beta) = B' + B''.$$

Отсюда видно, что пульсирующее магнитное поле можно представить в виде двух составляющих, каждая из которых является функцией двух переменных  $t$  и  $\beta$ . Первая составляющая  $B'$  имеет наибольшую величину  $B_m/2$  при  $\omega t - \beta = \pi/2$  и остается такой, если  $\omega t$  и  $\beta$  изменяются одновременно так, что их разность сохраняется постоянной. Но увеличение угла  $\beta$  означает, что с течением времени наибольшая величина магнитной индукции  $B_m/2$  имеет место не в одной и той же точке, как при постоянном токе, а перемещается вдоль воздушного зазора в направлении отсчета угла  $\beta$  (по часовой стрелке) с угловой скоростью, равной угловой частоте тока:

$$\Omega = \frac{d\beta}{dt} = \frac{d(\omega t - \pi/2)}{dt} = \omega.$$

Аналогичные рассуждения в отношении второй составляющей приводят к выводу о том, что пульсирующее магнитное поле можно разложить на два поля, вращающихся в противоположные стороны.

**Вращающееся магнитное поле трехфазной обмотки.** Общее магнитное поле трехфазной обмотки образуется наложением полей отдельных фаз. Наглядное представление об этом дает рис. 8.4, *а, б, в*, где определены направления магнитных полей фаз и результирующего поля в связи с изменением токов в фазах.

Величину и направление мгновенных токов указывают векторные диаграммы, которые соответствуют уравнениям симметричной системы токов:  $i_A = I_m \sin \omega t$ ;  $i_B = I_m \sin (\omega t - 120^\circ)$ ;  $i_C = I_m \sin (\omega t + 120^\circ)$ .

При  $\omega t = 0$  (рис. 8.4, *а*)  $i_A = 0$ ,  $i_B$  — отрицательный,  $i_C$  — положительный токи. После разметки направлений токов видно, что вся система проводников делится на две части: в одной из них направление тока отмечено крестиком, а в другой точкой. По правилу буравчика определены направления магнитной индукции поля каждой катушки и результирующего поля, которое изображено двумя замкнутыми (штриховыми) линиями.

Направление этих линий определяет положение полюсов: слева от нейтрали находятся северный полюс ротора и южный полюс статора (линии магнитной индукции выходят из поверхно-

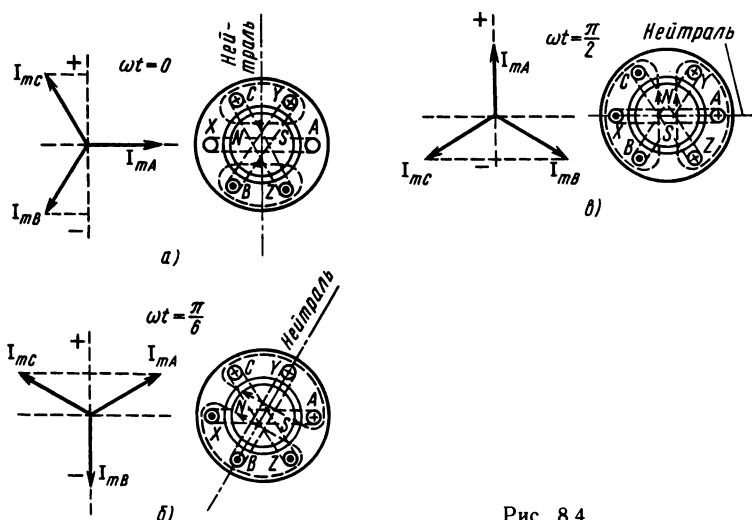


Рис. 8.4

сти ротора в воздушный зазор и входят в поверхность статора); справа от нейтрали расположены южный полюс ротора и северный полюс статора.

Для момента времени, соответствующего фазовому углу  $\omega t = \pi/2$ , такие же построения даны на рис. 8.4, б, с учетом того, что  $i_A$  — положительный,  $i_B$ ,  $i_C$  — отрицательные токи. Так же как в предыдущем случае, система проводников делится на две равные части с одинаковым направлением тока в каждой из них. Результирующее магнитное поле направлено по чертежу вверх.

Нетрудно заметить, что за время, соответствующее фазовому углу  $\pi/2$ , ось полюсов в пространстве повернулась, т. е. северный и южный магнитные полюса переместились относительно неподвижных обмоток на такой же угол  $\pi/2$ .

Выполнив аналогичные построения для последующих моментов времени (например, при  $\omega t = \pi$ ;  $3\pi/2$ ;  $2\pi$ ), можно убедиться в том, что ось магнитных полюсов за один период переменного тока поворачивается на один оборот.

Следовательно, частота вращения магнитного поля  $n_1 = f$  об/с или  $n_1 = 60f$  об/мин, если трехфазная обмотка имеет по одной катушке на фазу, т. е. число пар полюсов  $p = 1$ . Обмотку каждой фазы можно выполнить из двух катушек с расстоянием между активными сторонами в  $1/4$  окружности статора (рис. 8.5). В этом случае все рассуждения, отнесенные ранее к одной паре полюсов на полной окружности, надо отнести к одной паре полюсов на половине длины окружности статора, т. е. при  $p =$

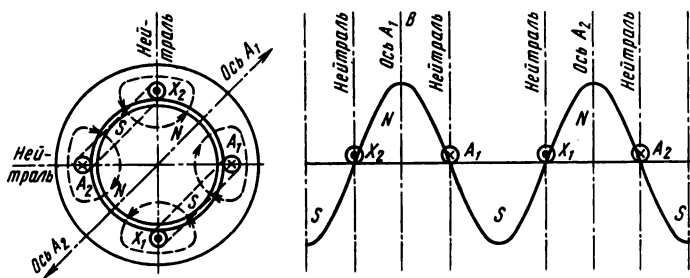


Рис. 8.5

$= 2$  частота вращения магнитного поля  $n_1 = 60f/2$  об/мин, а в общем случае при любом числе пар полюсов

$$n_1 = 60f/p. \quad (8.3)$$

Отметим также, что в момент, когда ток в фазе достигает амплитуды  $I_m$ , ось полюсов результирующего магнитного поля совпадает с осью полюсов этой фазы. (На рис. 8.3, б результирующее поле направлено так же, как поле фазы А, при этом ток  $i_A = I_m$ .) На основании этого определяют направление вращения магнитного поля. При прямой последовательности максимумы токов в фазах наступают в порядке  $A \rightarrow B \rightarrow C$ . Если на статоре обмотки фаз расположены так, что обход их в указанном порядке совершается по ходу часовой стрелки, то и поле вращается в ту же сторону.

**Принцип действия синхронного и асинхронного электродвигателей.** На рис. 8.1 вращающееся магнитное поле, создаваемое токами в трехфазной обмотке статора, условно показано парой магнитных полюсов  $N$  и  $S$ , частота вращения которых  $n_1$  направлена по ходу часовой стрелки.

Вращающееся магнитное поле, пересекая проводники обмотки ротора (см. рис. 8.1, а), индуцирует в них э.д.с., направление которой определено по правилу правой руки и отмечено в одном витке крестиком и точкой. В замкнутой накоротко обмотке ротора возникает ток такого же направления, что и э.д.с. Магнитное поле действует на проводники с током электромагнитной силой  $F_m$ , направленной по правилу левой руки.

Относительно оси ротора силы образуют вращающий момент, под действием которого ротор вращается в ту же сторону, что и магнитное поле.

Частота вращения ротора  $n_2$  всегда меньше частоты вращения поля  $n_1$  ( $n_2 < n_1$ , ротор «скользит» относительно поля). При  $n_2 = n_1$  (скольжения нет) двигатель работать не может. Благода-

ря скольжению в проводниках обмотки ротора наводится э.д.с., образуются ток и электромагнитные силы. Электродвигатели, работающие по этому принципу, называются **а с и н х р о н н ы м и**.

Если вместо короткозамкнутого витка во вращающееся магнитное поле поместить электромагнит с постоянным током в его обмотке (см. рис. 8.1, б) (или постоянный магнит), то его постоянное магнитное поле взаимодействует с вращающимся полем статора. Такой ротор стремится занять положение, чтобы ось его полюсов (направлена внутри электромагнита от южного полюса к северному) совпала с направлением магнитного поля статора.

Вращающееся магнитное поле статора «увлекает» за собой ротор, который вращается в ту же сторону и с такой же скоростью, что и поле, т. е.  $n_2 = n_1$ . Электродвигатели, работающие по такому принципу, называются **с и н х р о н н ы м и**.

### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Токи в фазах обмотки статора достигают амплитуды  $I_m$  в порядке  $A \rightarrow B \rightarrow C$ , а ротор вращается по ходу часовой стрелки. В какую сторону будет вращаться ротор, если последовательность токов установить  $C \rightarrow A \rightarrow B$ ?  $A \rightarrow C \rightarrow B$ ?  $B \rightarrow A \rightarrow C$ ?  $B \rightarrow C \rightarrow A$ ?

2. Как изменится скольжение ротора асинхронного двигателя в процессе его пуска?

3. Магнитные полюса ротора синхронной машины (см. рис. 8.1, б) изготовлены так, что при постоянном токе в его обмотке постоянное во времени магнитное поле вдоль воздушного зазора распределено по синусоидальному закону, имеет магнитную индукцию  $B = B_m$  против середины полюса и  $B = 0$  на нейтрали. Можно ли считать магнитное поле в воздушном зазоре машины вращающимся, если ротор привести во вращение?

4. Ротор синхронного двигателя находится в покое при выключенной обмотке статора. Начнет ли ротор вращаться после включения обмотки статора в сеть, если он представляет собой постоянный электромагнит (см. рис. 8.1, б)? если ротор — постоянный магнит?

5. На рис. 8.1, б ротор синхронного двигателя изображен по отношению к оси полюсов статора в рабочем положении. Может ли ротор вращаться под действием поля статора, если изменить направление тока в его обмотке?

**Задача 8.1.** Определить магнитную индукцию вращающегося магнитного поля трехфазной обмотки, если наибольшая магнитная индукция пульсирующего поля одной фазы равна  $B_m$ . Найти величину и направление вектора магнитной индукции поля трехфазной обмотки в моменты времени, соответствующие фазовым углам  $\omega t = \pi$ ;  $\omega t = 3\pi/2$ .

**Задача 8.2.** Определить частоту вращения магнитного поля трехфазной обмотки, имеющей по две катушки на фазу (см. рис. 8.5) при частоте переменного тока  $f = 50$  Гц. Найти ряд частот вращения магнитного поля при числе пар полюсов обмотки от  $p = 1$  до  $p = 6$ .

## § 8.2. УСТРОЙСТВО И РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Схема на рис. 8.1, *а*, приведенная для пояснения принципа действия асинхронного электродвигателя, не содержит многих деталей и сведений о его устройстве, которыми во многом определяются свойства и рабочие характеристики машины.

Особенно это относится к ротору и его обмотке, по устройству которых различают двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели с фазным ротором (или двигатели с контактными кольцами).

**Статор и его обмотка.** К статору относятся все неподвижные детали машины, в числе которых основные — корпус, сердечник, обмотка.

**Корпус.** Корпус служит для соединения всех частей двигателя в единую конструкцию и крепления его к основанию (рис. 8.6, *а*). У двигателей малой и средней мощности корпус литой из алюминия или чугуна, для двигателей большой мощности корпус изготовляют сварным из стали. В корпус 2 запрессован сердечник статора 1, который собирают из листов электротехнической стали (рис. 8.6, *б*). Листы толщиной 0,35 или 0,5 мм изолированы с обеих сторон лаком.

На внутренней поверхности сердечник статора имеет продольные пазы, в которые уложены проводники обмотки. Обмотку статора изготовляют из медного обмоточного провода. Основным элементом ее является секция, которая может иметь один (рис. 8.7, *а*) или несколько витков (рис. 8.7, *б*).

Активные стороны секций, уложенные в пазы сердечника, при наличии тока образуют рабочий магнитный поток. Замыкающие их лобовые части и соединения между секциями находятся с торцевых сторон, создают наибольшую часть магнитного потока рассеяния.

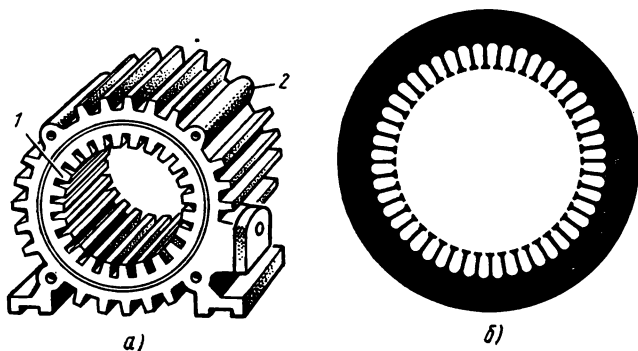


Рис. 8.6



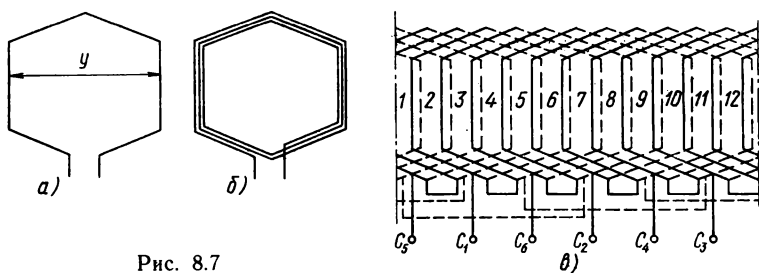


Рис. 8.7

Активные стороны секций можно уложить по одной в пазу, но чаще обмотку выполняют двухслойной. Такая обмотка в развернутом виде показана на рис. 8.7, в. Она построена по следующим данным: число фаз  $m=3$ , число пар полюсов  $p=1$ , число пазов  $z=12$ , обмотка двухслойная, шаг — укороченный на  $1/6$  полюсного деления.

1. Полюсное деление  $\tau$  — расстояние по окружности статора, приходящееся на один полюс, выраженное в пазах:  $\tau=z/2p$ .

2. Шаг обмотки  $y$  — расстояние по окружности статора между активными сторонами секции, выраженное в пазах. По условию задачи шаг обмотки укорочен на  $\tau/6$ ;  $y=\tau(1-1/6)=5$ .

3. Число пазов на полюс и фазу  $q$ . На каждом полюсном делении расположены пазы трех фаз. На одну фазу приходится  $q=$   
 $=\tau/m=z/(2pm)=12/(2 \cdot 3)=2$ .

4. Угол между соседними пазами  $\alpha$

$$\alpha=360p/z=360 \cdot 1/12=30^\circ \text{ (эл. град).}$$

5. Сдвиг между обмотками фаз ( $\lambda$ ), в пазах

$$\lambda=120/\alpha=120/30=4.$$

Секции соединяют между собой в катушки, а из катушек состоит обмотка каждой фазы. Обмотки фаз соединяют звездой или треугольником. Если такие соединения сделаны внутри, то на щиток двигателя выведены начала трех фаз, но иногда на щиток выведены начала и концы обмоток и тогда соединения делают на щитке.

**Сердечник и обмотка ротора.** Сердечник ротора цилиндрической формы собран из листов электротехнической стали (рис. 8.8) и укреплен на валу. Проводники короткозамкнутой обмотки вставлены в круглые пазы сердечника и торцы их соединены медными кольцами. Такая обмотка, имеющая вид цилиндрической клетки («беличье колесо»), показана на рис. 8.8, а, б.

Для двигателей малой и средней мощности (до 100 кВт)

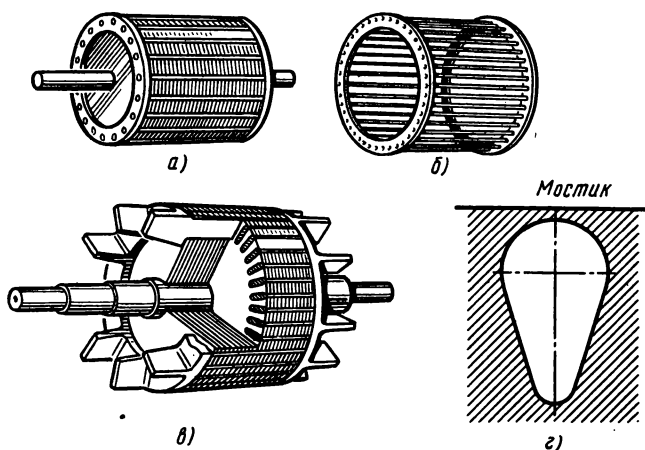


Рис. 8.8

короткозамкнутую обмотку выполняют, заливая в пазы овальной формы расплавленный алюминий, при этом одновременно формируются замыкающие кольца и вентиляционные крылья (рис. 8.8, а, б).

Фазный ротор отличается от короткозамкнутого тем, что его обмотка выполнена по типу обмотки статора, соединена обычно звездой, начала выведены и соединены с контактными кольцами (рис. 8.9, в).

Три кольца укреплены на валу ротора, изолированы одно от другого и от вала. На кольцо наложены контактные щетки, через которые обмотку ротора можно присоединить к реостату с целью улучшения условий пуска двигателя или регулирования частоты вращения.

**Общий вид асинхронных двигателей.** В собранном виде двигатель с короткозамкнутым ротором показан на рис. 8.9, а, двигатель с фазным ротором — на рис. 8.9, б. Сердечник ротора с обмоткой находится внутри сердечника статора и их разделяет небольшой воздушный зазор.

Концы вала ротора находятся в подшипниках, которые укреплены в боковых щитах, а щиты прикреплены к корпусу статора болтами или шпильками. У двигателей большой мощности подшипники укреплены в отдельных стояках. На статоре двигателя с фазным ротором укреплены щеткодержатели, обычно по два на каждое кольцо. Двигатели средней и большой мощности нередко имеют специальное приспособление, с помощью которого щетки можно поднять, а кольца замкнуть накоротко. Это делают после

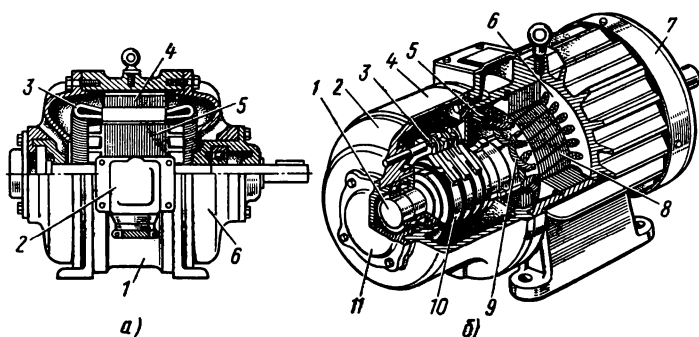


Рис. 8.9

пуска двигателя с целью уменьшения потерь энергии, увеличения срока службы щеток и колец.

Некоторые конструктивные различия двигатели имеют в связи с решением вопросов их охлаждения. Определяющими факторами здесь являются мощность двигателя и условия окружающей среды, для работы в которой он предназначен. С целью охлаждения одни двигатели имеют уже упомянутые вентиляционные крылья, другие — специальный вентилятор на валу ротора; у закрытых двигателей вентилятор обдувает ребристую поверхность статора, что улучшает охлаждение.

На корпусе статора установлена коробка, которая закрывает внешние зажимы двигателя. К этим зажимам в определенном порядке присоединяют выводы от обмоток и три провода от сети. На щитке, прикрепленном к корпусу, указаны номинальные величины двигателя: мощность, напряжение, ток, коэффициент мощности, частота вращения, к.п.д., а также тип двигателя, год выпуска, завод-изготовитель.

Номинальная мощность электродвигателя — это механическая мощность на его валу. Для двигателя, обмотки которого можно включить на внешних зажимах звездой или треугольником, указывают два номинальных напряжения (например, 220/380 В).

Номинальный ток можно прочесть на щитке, но его можно при необходимости определить по формуле (8.4), которая записана применительно к трехфазному двигателю:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \eta \cos \varphi}. \quad (8.4)$$

Эта формула пригодна для расчетов не только в номинальном, но и в любом рабочем режиме, если в нее подставить соответствующие этому режиму величины:  $P$  — мощность механическая (на

валу),  $U$  — линейное напряжение,  $\eta$  — к.п.д.,  $\cos \varphi$  — коэффициент мощности двигателя.

**Рабочий процесс асинхронного двигателя.** Ранее отмечено, что отличие частот вращения ротора и магнитного поля статора является неперенным условием работы асинхронного двигателя.

Рабочие характеристики двигателя зависят от величины скольжения  $s$ , которая выражается отношением разности частот вращения магнитного поля  $n_1$  и ротора  $n_2$  к частоте вращения магнитного поля:

$$s = (n_1 - n_2) / n_1. \quad (8.5)$$

Нередко скольжение выражают в процентах.

В номинальном режиме скольжение (у разных двигателей) равно 1—6 %, при этом двигатель развивает на своем валу электромагнитный вращающий момент  $M_\delta$ .

При изменении нагрузки двигателя скольжение изменяется. В частности, при холостом ходе (на валу двигателя внешней механической нагрузки нет) скольжение составляет малые доли процента, а при неподвижном роторе ( $n_2 = 0$ ) скольжение наибольшее ( $s = 1$  или 100 %).

Известно, что электродвигатели используют для приведения в движение рабочих машин, и полезной нагрузкой конкретного двигателя является момент сопротивления рабочей машины (например, металлорежущего станка, вентилятора и т. д.).

Дополнительную механическую нагрузку создают силы трения в механической передаче (редуктор, ременная передача и др.) и в самом двигателе. Общую механическую нагрузку выражают моментом сопротивления  $M_c$  на валу двигателя.

Частота вращения и скольжение остаются постоянными, если момент двигателя равен моменту сопротивления  $M_\delta = M_c$ . В случаях неравенства моментов частота вращения и скольжение изменяются.

В прямой зависимости от скольжения находятся величины, относящиеся к обмотке ротора: частота тока  $f$ , э.д.с.  $E_2$ , индуктивное сопротивление  $X_2$ .

Частота тока в обмотке ротора определяется величиной частоты вращения магнитного поля относительно частоты вращения ротора, т. е. разностью  $n_1 - n_2$ . Согласно формуле (8.3),

$$f_2 = \frac{p (n_1 - n_2)}{60} = \frac{p n_1 s}{60} = f_1 s. \quad (8.6)$$

При неподвижном роторе, т. е. при  $s = 1$ ,  $f_2 = f_1$ , поэтому э.д.с. и индуктивное сопротивление обмотки ротора определяют по отношению к этим же величинам при неподвижном роторе. В результате при использовании выражений (7.1) и (4.22) можно

получить формулы:

$$E_{2s} = E_2 s, \quad (8.7)$$

$$X_{2s} = X_2 s, \quad (8.8)$$

где величины  $E_2$ ,  $X_2$  относятся к обмотке неподвижного ротора;  $E_{2s}$ ,  $X_{2s}$  — к обмотке вращающегося ротора.

Ток в обмотке ротора тоже зависит от скольжения, в чем можно убедиться, выразив его отношением э.д.с. к полному сопротивлению обмотки  $I_{2s} = E_{2s} / \sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}$ , где  $R_2$  — активное сопротивление обмотки ротора.

После подстановки сюда величин  $E_{2s}$  и  $X_{2s}$  из формул (8.7) и (8.8) получим эту зависимость в наглядном виде

$$I_{2s} = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_2^2}}. \quad (8.9)$$

Ток в обмотке ротора тоже создает магнитное поле (вторичное, если поле обмотки статора называть первичным), которое вращается относительно ротора с частотой вращения  $n_p = 60f_2/p = 60fs/p = n_1 s$ . Но ротор сам вращается относительно статора, поэтому частота вращения вторичного поля относительно статора составляет  $n_p + n_2 = n_1 s + n_2 = n_1$ .

Отсюда следует, что первичное и вторичное магнитные поля вращаются в одну сторону с одинаковой частотой, т. е. они относительно друг друга неподвижны.

Поэтому магнитная связь между обмотками статора и ротора действует так же, как в трансформаторе между его первичной и вторичной обмотками. Не случайно асинхронный двигатель называют трансформатором с вращающейся вторичной обмоткой.

На основе этой аналогии все выводы § 7.2, сделанные для трансформатора, можно отнести и к асинхронному двигателю. В частности, магнитный поток, связывающий обмотки статора и ротора, не изменяется при изменении нагрузки (так как  $U = \text{const}$ ). Изменение тока в обмотке ротора вызывает пропорциональное изменение тока в обмотке статора.

Например, при увеличении механической нагрузки на валу двигателя скольжение увеличивается, поэтому увеличиваются токи в обмотках ротора и статора, а магнитный поток не изменяется.

#### *Контрольные вопросы и задачи*

1. В § 8.1 было доказано, что магнитная индукция вращающегося магнитного поля статора постоянна. Почему же сердечники статора и ро-

тора собирают из листов электротехнической стали, изолированных с обеих сторон?

2. Воздушный зазор между сердечниками статора и ротора асинхронного двигателя составляют доли миллиметра. Какие практические соображения ограничивают изменение воздушного зазора в сторону его увеличения или уменьшения?

3. При равенстве моментов движущего и момента сопротивления на валу двигателя частота вращения ротора и скольжение постоянны. В случаях неравенства моментов эти величины изменяются. В какую сторону изменяются частота вращения ротора и скольжение: при  $M_d > M_c$ ; при  $M_d < M_c$ ?

4. Формула (8.9) выражает зависимость тока в обмотке ротора от скольжения. Как изменяется значение тока в обмотке ротора: в процессе разгона ротора при пуске? при увеличении механической нагрузки на валу двигателя?

5. Какие типы электродвигателей изображены на рис. 8.9? Какие узлы и детали электродвигателей отмечены цифрами на этих рисунках?

**Задача 8.3.** Построить развернутую схему обмотки статора асинхронного двигателя по следующим данным: число фаз  $m=3$ ; число пар полюсов  $p=1$ ; число пазов  $z=12$ , обмотка двухслойная, шаг полный ( $y=\tau$ ).

**Задача 8.4.** Асинхронный двигатель с фазным ротором (с кольцами) имеет следующие технические характеристики:  $P_{\text{ном}}=11$  кВт;  $U_{\text{ном}}=220/380$  В;  $n_{2\text{ном}}=953$  об/мин;  $\eta=82,5\%$ ;  $\cos \varphi=0,71$ ;  $f=50$  Гц. Составить схему соединений внешних зажимов двигателя при включении его в электрическую сеть с тем или другим напряжением из указанных на его щитке. В обоих случаях определить номинальный ток, скольжение, частоту тока в обмотке ротора, номинальный момент на валу двигателя.

### § 8.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Преобразование электрической энергии в механическую с помощью электродвигателя возможно потому, что под действием магнитного поля возникают электромагнитные силы, приложенные к проводникам обмотки ротора. Эти силы создают относительно оси ротора электромагнитный вращающий момент.

Величина его входит в уравнение движения  $M_d=M_c$  и поэтому во многом определяет рабочие и пусковые свойства электродвигателя. Для оценки этих свойств большое значение имеет зависимость электромагнитного момента от скольжения, т. е. от нагрузки на валу электродвигателя.

**Энергетическая диаграмма.** Представление о процессе преобразования электрической энергии в асинхронном электродвигателе дает энергетическая диаграмма на рис. 8.10.

За единицу времени электродвигатель получает из сети энергию  $P_1$ . Некоторая часть ее преобразуется в теплоту в обмотке статора (мощность потерь  $P_{\Sigma 1}$ ), а большая часть (мощность

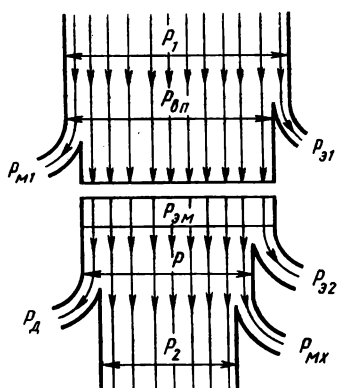


Рис. 8.10

$P_{\delta,п}$ ) концентрируется во вращающемся магнитном поле, при изменении которого возникают потери энергии в сердечнике статора (мощность потерь  $P_{м1}$ ). За вычетом этих потерь электромагнитная энергия (мощность  $P_{эм}$ ) передается через воздушный зазор ротору.

В роторе часть поступившей энергии теряется в обмотке ротора (мощность тепловых потерь  $P_{э2}$ ), а оставшаяся часть (мощность  $P$ ) преобразуется в механическую энергию (магнитные потери в роторе не учитываются, так как частота  $f_{2s}$  перемagnичивания ротора очень мала).

Величина мощности  $P$  определяет электромагнитный момент двигателя  $M$ . Однако полезная механическая мощность  $P_2$  меньше полной электромеханической мощности  $P$ , так как имеются механические потери в роторе  $P_{мх}$  (возникают от трения в подшипниках, аэродинамического сопротивления) и добавочные потери  $P_d$  (обусловлены зубчатостью статора, не вполне синусоидальным распределением магнитной индукции).

Отношение полезной механической мощности на валу к электрической мощности на зажимах обмотки статора дает величину коэффициента полезного действия  $\eta = P_2/P_1$ .

**Электромагнитный момент.** Полезной механической мощности  $P_2$  при частоте вращения ротора  $n_2$  (об/с) соответствует вращающий момент  $M_2$ , определяемый по формуле, известной из курса технической механики:

$$M_2 = P_2 / 2\pi n_2. \quad (8.10)$$

К полезному тормозному моменту надо прибавить тормозной момент  $M_x$ , обусловленный механическими потерями  $M_x = P_{мх} / 2\pi n_2$ . Его называют моментом холостого хода, так как он противодействует вращению ротора при холостом ходе двигателя, т. е. при отсутствии полезной нагрузки на его валу.

В рабочем режиме электродвигателя общее действие этих моментов уравновешено действием электромагнитного момента  $M$ , который можно представить состоящим из двух слагаемых  $M = M_x + M_2$ .

Вместе с тем электромагнитный момент соответствует полной

электро механической мощности  $P$ , т. е. выражается формулой  $M = P/2\pi n_2$ .

Электро магнитный момент образуется при взаимодействии вращающегося магнитного поля и тока в обмотке ротора. Результат этого взаимодействия выражается формулой, приведенной без вывода:

$$M = k_M \Phi I_{2s} \cos \varphi_{2s}, \quad (8.11)$$

где  $k_M$  — коэффициент пропорциональности.

Из нее следует, что электро магнитный момент зависит от интенсивности вращающегося магнитного поля (оно количественно представлено магнитным потоком  $\Phi$  одного полюса), от величины  $I_{2s}$  и фазы  $\cos \varphi_{2s}$  тока в обмотке вращающегося ротора.

Опираясь на аналогию асинхронного двигателя с трансформатором, можно считать, что в двигателе  $U_{1\phi} \approx E_1$ , а э.д.с. в обмотках статора и ротора пропорциональны магнитному потоку [см. формулу (7.1)]:

$$E_1 = k_1 \Phi; \quad E_2 = k_2 \Phi,$$

где  $k_1$  и  $k_2$  — коэффициенты пропорциональности.

Следовательно,

$$\Phi = U_{1\phi}/k_1 = U_1/\sqrt{3} k_1; \quad E_2 = k_2 U_1/k_1 \sqrt{3}.$$

Учитывая, что ток в роторе зависит от э.д.с.  $E_2$  [см. формулу (8.9)], можно получить для выражения электро магнитного момента формулу, в которой все постоянные величины введены в общий коэффициент  $k$

$$M = \frac{k U_1^2 s \cos \varphi_{2s}}{Z_{2s}}. \quad (8.12)$$

**Механическая характеристика.** Зависимость электро магнитного момента от скольжения (следовательно, и от нагрузки) определяется по формуле (8.12) комбинированным множителем  $s \cos \varphi_{2s}/Z_{2s}$  и показана в виде графика на рис. 8.11, а. При изменении скольжения от 0 до 1 момент сначала круто растет, достигая в точке А наибольшей величины  $M_{\max}$  при некотором скольжении  $s_{кр}$ , которое называют критическим, а затем уменьшается.

Для анализа рабочего процесса электродвигателя более наглядна зависимость  $n_2 = f(M)$  — частоты вращения ротора от момента на его валу (рис. 8.11, б), которую называют механической характеристикой.

Предположим, что электродвигатель работает в номинальном



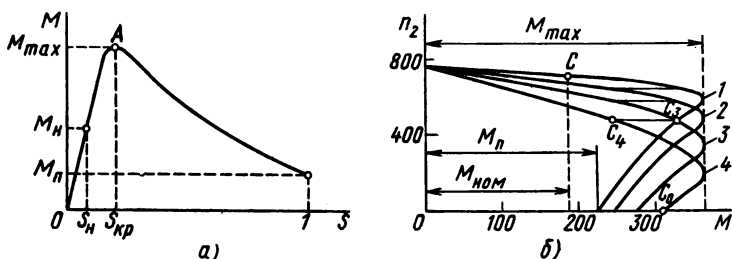


Рис. 8.11

режиме (при  $n_{\text{ном}}$  и  $M_{\text{ном}}$ ), а затем нагрузка на валу увеличена (равенство  $M = M_c$  нарушено). Частота вращения ротора уменьшается, но при этом вращающий момент увеличивается (это видно на механической характеристике).

Процесс перехода к новому режиму закончится, как только равенство моментов будет восстановлено, и двигатель продолжает устойчиво работать при большей нагрузке и несколько меньшей частоте вращения. В случае дальнейшего увеличения нагрузки двигатель может работать устойчиво до тех пор, пока его момент не достигнет величины  $M_{\text{max}}$ . Если после этого немного увеличить нагрузку, двигатель быстро остановится, так как рабочая точка по механической характеристике перейдет в неустойчивую область, где с уменьшением частоты вращения момент не увеличивается, а, наоборот, уменьшается.

В связи с этим наибольший момент  $M_{\text{max}}$  называют «опрокидывающим». Одной из важных эксплуатационных характеристик асинхронного двигателя является отношение максимального момента к номинальному  $k_{\text{max}} = M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$ , которое называют перегрузочной способностью. Асинхронные двигатели общего применения имеют перегрузочную способность в пределах 1,7—2,5.

Формула (8.12) указывает на большую чувствительность асинхронного двигателя к колебаниям напряжения на его зажимах (момент пропорционален квадрату напряжения).

Относительно небольшое снижение напряжения вызывает значительное уменьшение момента. Простой расчет показывает, что двигатель, имеющий перегрузочную способность 1,7, не может нести номинальную нагрузку уже при снижении напряжения приблизительно на 23 % от номинального значения  $U_{\text{ном}}$ .

Момент, который асинхронный двигатель развивает при  $s = 1$ , т. е. при  $n_2 = 0$ , называют пусковым ( $M_n$ ), так как в начальный момент пуска ротор двигателя неподвижен.

Более глубокий анализ формулы (8.12) показывает, что механическая характеристика зависит от величины активного сопротивления цепи ротора, причем с увеличением  $R_2$  увеличиваются числитель  $\cos \varphi_{2s}$  и знаменатель  $Z_{2s}$ . Однако зависимость момента от сопротивления цепи ротора сложная. При росте сопротивления  $R_2$  до некоторого значения максимальный момент  $M_{\max}$  не изменяется, но двигатель развивает его при меньшей частоте вращения ротора; пусковой момент увеличивается, а при дальнейшем увеличении  $R_2$  — уменьшается.

Такой характер изменения моментов отражен на рис. 8.11, б семейством механических характеристик (1—4), которые соответствуют различным значениям сопротивления цепи ротора:  $R_4 > R_3 > R_2 > R_1$ .

Механические характеристики электродвигателей различают по степени жесткости, т. е. по величине изменения частоты вращения ротора при изменении нагрузки по его валу. Характеристики считают более жесткими, если при изменении нагрузки на валу частота вращения изменяется меньше.

Естественная механическая характеристика (на рис. 8.11, б кривая 1) соответствует тому, что в цепи ротора нет добавочного сопротивления  $R_2$ . Она относится к типу жестких. С увеличением сопротивления в цепи ротора жесткость механических характеристик уменьшается (кривые 2, 3, 4).

### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Рассматривая энергетический баланс (см. рис. 8.10) асинхронного двигателя, обычно не учитывают магнитные потери в сердечнике ротора. Почему магнитные потери в сердечнике статора учитывают, а в сердечнике ротора нет?

2. Учитывая величину скольжения при номинальном режиме различных двигателей в пределах 1—6 %, можно установить, что э.д.с. в обмотке неподвижного ротора в 16—100 раз больше, чем в обмотке вращающегося ротора. В то же время токи в этих режимах отличаются в 4—7 раз. Как объяснить столь большую разницу в изменении э.д.с. и тока?

3. Известно, что изменение механической нагрузки на валу электродвигателя на длительное время приводит к изменению температуры его частей. В какую сторону и почему изменится температура частей двигателя, если механическую нагрузку на его валу увеличить?

4. Асинхронный короткозамкнутый двигатель в результате механической перегрузки остановился, но от сети не отключен. В чем состоит опасность этого режима для самого двигателя и для обслуживающего персонала?

5. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, нагруженный номинальным моментом, систематически длительно работает при пониженном напряжении на его зажимах. Как это повлияет на срок службы двигателя?

**Задача 8.5.** Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет следующие технические данные:  $U_{\text{ном}} = 220/380$  В;  $P_{\text{ном}} = 10$  кВт;  $n_{\text{ном}} = 1450$  об/мин.;  $\eta_{\text{ном}} = 87\%$ ;  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,88$ ;  $k_{\text{мах}} = M_{\text{мах}}/M_{\text{ном}} = 2$ ;  $k_{\text{п.м}} = M_{\text{п}}/M_{\text{ном}} = 1,2$ ;  $k_{\text{п.т}} = I_{\text{п}}/I_{\text{ном}} = 5$ . Определить число пар полюсов  $p$ ; скольжение  $s$ ; моменты: номинальный  $M_{\text{ном}}$ , максимальный  $M_{\text{мах}}$ , пусковой  $M_{\text{п}}$ ; токи: номинальный  $I_{\text{ном}}$ , пусковой  $I_{\text{п}}$  при соединении обмоток статора звездой и треугольником.

**Задача 8.6.** Из паспорта трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором известны номинальные значения  $P_{\text{ном}} = 80$  кВт,  $U_{\text{ном}} = 220/380$  В,  $n_{2\text{ном}} = 730$  об/мин,  $\eta_{\text{ном}} = 0,87$ ,  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,91$ . Определить мощность на входных зажимах двигателя, номинальный момент, ток в обмотке статора, скольжение при соединении обмоток статора звездой и треугольником.

## § 8.4. ПУСК В ХОД И РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Пусковые свойства электродвигателя оценивают в первую очередь величинами пускового момента и пускового тока. Для двигателей в каталогах указывают отношения пусковых величин к номинальным — кратность пускового момента ( $k_{\text{п.м}} = M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$ ) и кратность пускового тока ( $k_{\text{п.т}} = I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$ ). Надо отметить, что условия пуска зависят не только от свойств электродвигателя, но и от требований со стороны приводимой им в движение рабочей машины. Очевидно, например, что электродвигатель может прийти во вращение, если его пусковой момент больше момента сопротивления на валу в начале пуска.

Одни рабочие машины (например, вентиляторы) в начале пуска создают очень малый момент сопротивления, который растет по мере разгона; другие (шаровые мельницы, дробилки, компрессоры и т. д.) требуют значительного пускового момента, равного номинальному, а иногда и более. Поэтому, выбирая подходящий для заданных условий электродвигатель, надо одновременно выбирать способ пуска, учитывать его продолжительность и плавность, сложность и экономичность.

**Пуск двигателей с короткозамкнутым ротором.** Наиболее простой и быстрый способ пуска электродвигателя — прямое включение в сеть на полное напряжение простым рубильником (двигатели малой мощности) или магнитным пускателем (см. рис. 11.15). Высоковольтные двигатели включают масляным выключателем.

Для пуска асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором этот способ применяют наиболее широко, но учитывают соотношение мощностей двигателя и распределительной сети, в которую его будут включать. Возможные ограничения связаны с тем, что прямой пуск короткозамкнутого двигателя

сопровождается резким скачком тока от нуля до величины, превышающей в несколько раз номинальный ток ( $k_{п.т} = I_{п}/I_{ном} = 4 \div 7$ ). Кратковременный толчок тока, как правило, для двигателя не опасен, но вызывает увеличение потери напряжения в сети, что может отрицательно повлиять на работу других потребителей, включенных в ту же сеть.

В более мощную сеть допускается прямое включение более мощных двигателей, но в большинстве случаев мощность двигателя не должна превышать 15—20 кВт. Пусковой ток асинхронного электродвигателя пропорционален напряжению на его зажимах, что следует из формулы (8.9) и аналогии с трансформатором. Следовательно, уменьшить пусковой ток можно снижением напряжения в начале пуска. Эту возможность используют в тех случаях, когда не помешает снижение пускового момента, который, как известно, пропорционален квадрату напряжения [см. формулу (8.12)].

Применяют различные способы снижения напряжения в начале пуска. Один из них — переключение обмоток статора в процессе пуска со звезды (рис. 8.12, а) на треугольник. Перед пуском переключатель  $\Pi$  ставят в положение  $Y$ , т. е. обмотки статора соединяют звездой (рис. 8.12, б), а затем выключателем  $B$  двигатель включают в сеть. Когда разбег закончится, переключатель переводят в положение  $\Delta$  и оставляют так до конца пуска и далее в рабочем режиме при соединении обмоток статора треугольником.

Этот способ позволяет в начальный период пуска снизить

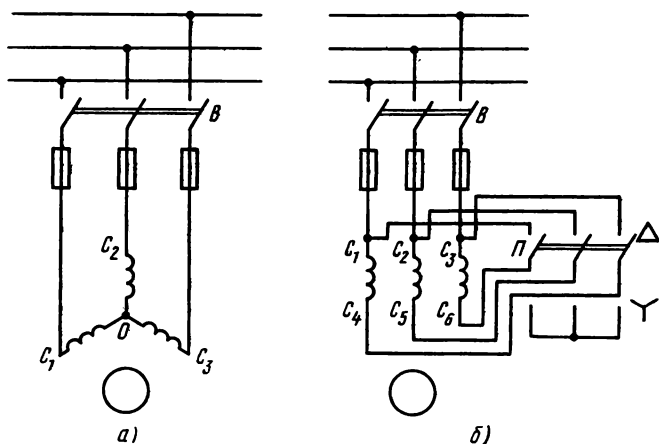


Рис. 8.12

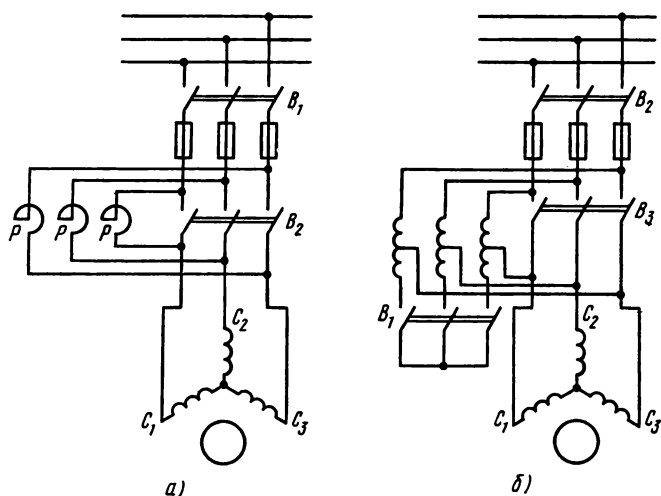


Рис. 8.13

фазное напряжение в  $\sqrt{3}$  раз, а линейный пусковой ток — в 3 раза. Но вместе с тем и пусковой момент снижается в 3 раза. Поэтому такой пуск применяют для двигателей относительно небольшой мощности, примерно до 20 кВт. Для снижения напряжения при пуске асинхронных двигателей большей мощности применяют или реактивные сопротивления, или включение через автотрансформатор. В случае использования реактивного сопротивления (рис. 8.13, а) сначала замыкают выключатель  $B_1$  и реактивные сопротивления соединяют последовательно с обмотками статора, на которые приходится напряжение, пониженное на величину  $I_1 X_n$ . Когда разбег ротора закончен, на обмотки статора подают полное напряжение сети, замкнув выключатель  $B_2$  (см. рис. 8.13, а).

Пуск с применением автотрансформатора (рис. 8.13, б) проводят в следующем порядке: сначала замыкают выключатель  $B_1$  и соединяют обмотки автотрансформатора звездой; затем замыкают  $B_2$  и к обмотке статора электродвигателя подводят напряжение, сниженное в  $K_a$  раз ( $K_a$  — коэффициент трансформации автотрансформатора); после некоторого разбега ротора размыкают  $B_1$  и автотрансформатор используется как реактивная катушка, причем напряжение на обмотках статора повышается; далее замыкают  $B_3$  и на зажимы двигателя подают полное напряжение.

Последний способ позволяет провести пуск в три ступени, т. е. более плавно, но достигается это удорожанием пусковой установки. Рассмотренные способы пуска путем снижения напряжения относятся к асинхронным электродвигателям с короткозамкнутым ротором обычного исполнения. Их главный недостаток состоит в том, что одновременно с уменьшением пускового тока уменьшается пусковой момент.

**Улучшение пусковых характеристик.** Конструкция асинхронного электродвигателя с улучшенными пусковыми свойствами была предложена еще М. О. Доливо-Добровольским. Ротор такого электродвигателя имеет две короткозамкнутые обмотки, расположенные одна над другой (рис. 8.14, а). Верхняя обмотка (пусковая) изготовлена из материала с повышенным удельным сопротивлением (обычно из марганцовистой латуни), а стержни нижней (рабочей) обмотки медные, имеют большее поперечное сечение. В связи с этим активное сопротивление пусковой обмотки в 4—5 раз больше, чем рабочей. Вместе с тем индуктивность рабочей обмотки значительно больше, чем пусковой, так как рабочая обмотка сцеплена с большим магнитным потоком рассеяния.

Пусковые характеристики такого двигателя определяются в основном пусковой обмоткой, так как именно в ней сосредоточен пусковой ток. В рабочей обмотке при пуске ток мал, так как велико ее индуктивное сопротивление, когда  $f_2 = f_1$ . Следовательно, в двигателе с двойной обмоткой достигается уменьшение пускового тока и увеличение пускового момента.

В рабочем режиме, когда частота тока в роторе мала (1—2 Гц), индуктивные сопротивления обеих обмоток очень малы, а по соотношению активных сопротивлений ток в рабочей обмотке значительно больше, чем в пусковой.

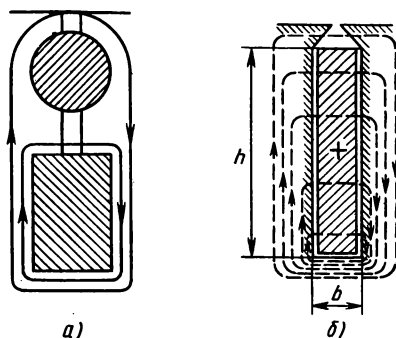


Рис. 8.14

Аналогичного эффекта достигают в двигателе с глубоким пазом (рис. 8.14, б). Обмотка ротора в данном случае имеет стержни большой высоты  $h$  при малой ширине  $b$ . Нижняя часть сечения стержня сцеплена с большим потоком рассеяния, чем верхняя его часть (подобно — в роторе с двойной клеткой).

При таком распределении тока нижняя часть сечения стержня не используется, что эквивалентно уменьшению сечения и увеличению активного сопротивления. Вместе с тем повышенное индуктивное сопротивление при пуске обеспечивает уменьшение пускового тока.

В рабочем режиме индуктивное сопротивление мало, ток по сечению распределен почти равномерно и двигатель работает как обычный короткозамкнутый.

Пусковые свойства электродвигателя с глубоким пазом несколько хуже, чем у двигателя с двойной обмоткой на роторе, но он значительно проще и дешевле.

**Пуск асинхронных двигателей с фазным ротором.** Зависимость пускового момента от сопротивления цепи ротора используют для пуска двигателей с фазным ротором — последовательно с обмоткой ротора включают пусковой реостат.

Таким путем достигают значительного уменьшения пускового тока и увеличения пускового момента. Схема пуска показана на рис. 11.17.

Перед пуском реостат в цепи ротора устанавливают так, чтобы его сопротивление было наибольшим, а затем включают двигатель в сеть. По мере разбега ротора сопротивление реостата уменьшают (обычно ступенями) и по окончании пуска обмотку ротора замыкают накоротко.

Наглядное представление о процессе пуска дает рис. 8.11, б, где видно, что в начале пуска рабочая точка находится на механической характеристике 4, которая соответствует наибольшему сопротивлению цепи ротора (точка  $C_0$ ). С увеличением частоты вращения рабочая точка перемещается сначала по этой кривой до точки  $C_4$ . В этот момент выключается первая ступень пускового реостата и рабочая точка переводится на следующую характеристику 3 в точку  $C_3$  и так далее до полного выключения реостата, после чего рабочая точка выходит на естественную характеристику до точки  $C$ , которая соответствует номинальным величинам нагрузочного момента и частоты вращения.

Применение пускового реостата обеспечивает необходимое ограничение пускового тока, увеличение пускового момента, плавность пуска, но усложняет и удорожает электроустановку и ее эксплуатацию. Это связано с применением дополнительной электроаппаратуры и потерями в пусковом реостате, но и сам двигатель с кольцами по сравнению с двигателем с короткозам-

кнутыми обмотками устроен сложнее, величины его к.п.д.,  $\cos \varphi$  меньше.

**Регулирование частоты вращения.** Реостат в цепи ротора можно использовать и для регулирования частоты вращения двигателя с фазным ротором. Предположим, в рабочем режиме электродвигателя рабочая точка находится на естественной механической характеристике (точка *C* на рис. 8.11, б). Если в цепь ротора ввести первую ступень реостата, то в связи с увеличением электрического сопротивления уменьшаются ток и вращающий момент двигателя. Рабочая точка переходит на соседнюю характеристику при меньшем моменте и той же частоте вращения (механическая инерция). При неизменном моменте сопротивления на валу двигателя частота вращения ротора постепенно уменьшается, а вращающий момент увеличивается. В результате регулировочной операции двигатель будет работать с тем же моментом, но при меньшей частоте вращения. Так, изменяя сопротивление в цепи ротора, можно менять его частоту вращения. Здесь необходимо отметить, что регулировочный реостат, в отличие от пускового, должен быть рассчитан на длительную нагрузку (в принципе регулировочный реостат может быть использован и для пуска).

Этот способ позволяет регулировать частоту вращения в широких пределах, но не экономичен, так как значительная часть потребляемой двигателем энергии превращается в теплоту в реостате. Кроме того, с введением в цепь ротора активного сопротивления механическая характеристика становится более мягкой, что уменьшает устойчивость работы двигателя (малые изменения нагрузки на валу вызывают значительные изменения частоты вращения).

Плавное регулирование частоты вращения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в узких пределах возможно путем изменения напряжения на его входе. Однако для относительно малого уменьшения частоты вращения требуется значительное снижение напряжения, что резко снижает перегрузочную способность двигателя.

На возможные пути изменения частоты вращения магнитного поля, а следовательно, и ротора асинхронного двигателя указывает формула (8.3).

Первый путь — изменение частоты тока в обмотке статора — позволяет регулировать частоту вращения плавно и в широких пределах. Но для каждого двигателя придется установить преобразователь частоты, что слишком сложно и дорого.

Второй путь — изменение числа пар полюсов обмотки статора. С этой целью строят многоскоростные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Такой двигатель имеет на статоре



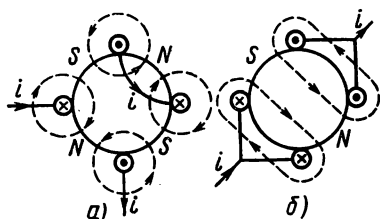


Рис. 8.15

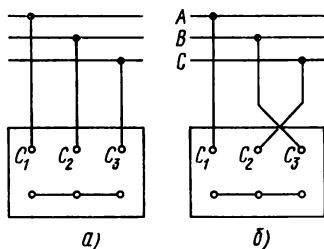


Рис. 8.16

либо две обмотки, образующие разное число полюсов, либо одну, допускающую переключение ее катушек на то или другое число полюсов. Принцип изменения числа пар полюсов обмотки статора поясняет рис. 8.15, где показаны две катушки одной фазы, имеющие шаг секций в  $1/4$  окружности статора. При последовательном соединении катушек (рис. 8.15, а) образуется четыре полюса, а при параллельном только два (рис. 8.15, б).

Путем переключения числа пар полюсов можно изменять частоту вращения только большими ступенями, например: 3000, 1500, 1000, 500 об/мин. Возможность изменения числа пар полюсов в одном двигателе достигается усложнением его устройства, увеличением размеров и значительным повышением стоимости. Поэтому многоскоростные двигатели строят не более чем на четыре скорости.

Изменение направления вращения ротора асинхронного трехфазного двигателя (реверсирование) достигается путем изменения направления вращения магнитного поля (см. § 8.1). Практически для этого достаточно взаимно поменять места присоединения любых двух проводов, связывающих двигатель с электрической сетью (рис. 8.16, а, б).

**Одно- и двухфазные асинхронные двигатели.** Принцип действия однофазных электродвигателей (рис. 8.17, а) основан также на использовании вращающегося магнитного поля. Его создает синусоидальный ток обмотки статора А. Однофазная обмотка, занимающая обычно  $2/3$  паза сердечника статора, создает пульсирующее магнитное поле. Оно индуцирует ток в проводниках короткозамкнутой обмотки ротора, создает электромагнитные силы. Однако электромагнитный момент есть, если ротор вращается, и момента нет, когда ротор неподвижен.

Объяснить это можно, если пульсирующее магнитное поле разложить на составляющие (потoki  $\Phi'$  и  $\Phi''$ ), вращающиеся в противоположные стороны (см. § 8.1). При неподвижном рото-

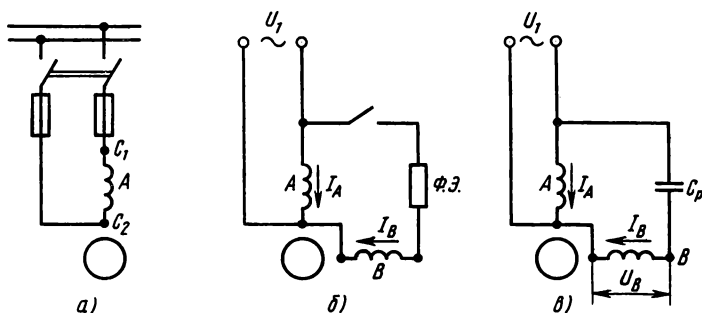


Рис. 8.17

ре действием обеих составляющих создаются два равных вращающих момента, направленные в противоположные стороны, поэтому результирующий пусковой момент  $M_{\text{пуск}} = 0$  и без специального приспособления двигатель пустить в ход нельзя.

Предположим, что ротор вращается в ту же сторону, что и поток  $\Phi'$ . Относительно прямого потока  $\Phi'$  ротор имеет скольжение  $s' = (n_1 - n_2) / n_1 \approx 0$ , а относительно обратного потока — скольжение  $s'' = (n_1 + n_2) / n_1 \approx 2$ , поэтому частота э.д.с. от прямого потока  $f' = 0$ , а от обратного потока  $f'' \approx 2f_1$ . В таком же соотношении находятся индуктивные сопротивления обмотки ротора для токов той и другой частоты ( $X_2'' \gg X_2$ ), поэтому ток в роторе, индуцированный обратным потоком, отстает от э.д.с. на угол, близкий к  $90^\circ$ , т. е. имеет очень малую активную составляющую и образует при взаимодействии с потоком  $\Phi''$  очень малый вращающий момент ( $M'' = 0$ ).

Отсюда следует, что вращающий момент однофазного электродвигателя в рабочем режиме  $M = M' - M'' \approx M'$ . Вращающий момент, необходимый для пуска однофазного двигателя, образуется посредством дополнительной обмотки  $B$  на статоре (рис. 8.17, б), которую укладывают в пазы, оставшиеся свободными от основной обмотки.

Пусковая обмотка по отношению к основной уложена так, что направления их намагничивающих сил сдвинуты в пространстве на угол  $90$  эл. град. Последовательно с пусковой обмоткой включают фазосмещающий элемент (ф. э. —  $R, L$  или  $C$ ), чем обеспечивают сдвиг по фазе токов основной и пусковой обмоток. Наилучший эффект смещения фаз дает включение конденсатора. Пространственный сдвиг осей магнитных полюсов двух обмоток на  $90^\circ$  и сдвиг по фазе токов в них создают условия для образования вращающегося магнитного поля (при фазовом сдвиге на  $90^\circ$  поле круговое, как в трехфазном двигателе). Таким образом,

пусковой вращающий момент образуется при вращающемся магнитном поле. После разбега ротора пусковая обмотка отключается и двигатель продолжает работать при пульсирующем магнитном поле основной обмотки. Выпускают также двухфазные двигатели с двумя обмотками, занимающими по половине всех пазов статора, сдвинутые в пространстве на  $90^\circ$ . Одна из обмоток (основная) включена в сеть непосредственно, другая (вспомогательная) через конденсатор (рис. 8.17, в). Вспомогательная обмотка, в отличие от пусковой, вместе с конденсатором остается включенной и в рабочем режиме, поэтому двигатель называют **конденсаторным**.

Имеются и другие модификации одно- и двухфазных асинхронных двигателей. Они несколько отличаются по своим техническим характеристикам, которые ниже, чем у трехфазных электродвигателей. Мощность одно- и двухфазных асинхронных двигателей невелика (чаще всего менее 0,5 кВт). Их применяют в автоматике, бытовых приборах и т. д.

#### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Пусковой ток асинхронного двигателя пропорционален напряжению на его входных зажимах, что можно доказать на основе формулы (8.9). Какие формулы и зависимости надо использовать дополнительно к ней, чтобы доказать это положение?

2. При пуске асинхронного электродвигателя способом переключения обмоток статора со звезды на треугольник фазное напряжение в начале пуска снижено в  $\sqrt{3}$  раза. Почему пусковой ток двигателя и пусковой момент уменьшаются в 3 раза?

3. Способы пуска асинхронных электродвигателей, основанные на снижении напряжения, имеют недостаток, который выражается в значительном снижении пускового момента. В чем состоит опасность от снижения пускового момента электродвигателя?

4. С помощью регулировочного реостата в цепи ротора можно изменять частоту вращения двигателя с кольцами. Можно ли таким путем увеличить частоту вращения сверх номинальной?

5. На рис. 8.15 показано, как при наличии двух катушек в фазе обмотки статора можно получить магнитное поле, имеющее четыре полюса при последовательном соединении катушек и два полюса при параллельном их соединении. Можно ли те же катушки включить так, чтобы при последовательном соединении получить два, при параллельном — четыре полюса?

**Задача 8.7.** Технические характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя приведены в условии задачи 8.5. При соединении обмоток статора звездой определить пусковые ток и момент, если линейное напряжение на зажимах двигателя снижено до 360; 340 В. Определить предел возможного снижения напряжения в процентах от номинального, если двигатель пускают в ход при номинальной нагрузке.

**Задача 8.8.** Асинхронный двигатель с фазной обмоткой на роторе, активное сопротивление которой  $R_2 = 0,02$  Ом, при номинальной нагрузке

и частоте напряжения в сети  $f=50$  Гц имеет частоту вращения ротора  $n_{\text{ном}}=1485$  об/мин. Определить величину добавочного сопротивления  $R_d$ , которое надо включить в цепь ротора, чтобы при тех же нагрузке и частоте напряжения в сети частота вращения ротора стала  $n_2=1440$  об/мин. Построить график зависимости частоты вращения ротора от величины добавочного сопротивления  $R_d$  в пределах изменения  $n$  от 1500 об/мин до 900 об/мин.

*Указание.* Детальный анализ работы асинхронного двигателя показывает, что при неизменной номинальной нагрузке на валу двигателя скольжение его можно принять пропорциональным активному сопротивлению цепи ротора, т. е.  $s_{\text{ном}}/s=R_2/(R_2+R_d)$ .

## § 8.5. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Наибольшее применение синхронные машины получили на электростанциях в качестве генераторов электрической энергии. Ротор синхронного генератора приводят во вращение первичным двигателем, который в данном случае является источником механической энергии. Чаще всего первичными двигателями являются паровые и гидравлические турбины, но на электростанциях относительно малой мощности применяют двигатели внутреннего сгорания, ветродвигатели и др. Синхронные двигатели применяют в тех случаях, когда необходима постоянная частота вращения или не требуется ее регулировка.

Для улучшения экономических показателей работы электрических сетей (уменьшения потерь энергии, повышения коэффициента мощности) применяют синхронные компенсаторы.

**Устройство синхронной машины.** Статор синхронной машины подобен статору асинхронного двигателя, т. е. имеет сердечник, в пазах которого уложена трехфазная обмотка с пространственным сдвигом фаз в  $120$  эл. град. Основные различия этих типов машин заключены в устройстве ротора.

На роторе синхронной машины находятся магнитные полюса и в зависимости от частоты вращения ротора его изготавливают с полюсами явными или неявными.

Ротор с явновыраженными полюсами (рис. 8.18) имеет стальной цилиндрический сердечник, на котором закреплены магнитные полюса  $3$  с катушками обмотки возбуждения  $1$ .

Неявнополюсный ротор (рис. 8.19) изготавливают из цельной стальной поковки цилиндрической формы. После обработки поверхности в теле этого цилиндра фрезеруют продольные пазы, в которые затем укладывают обмотку возбуждения  $1$ .

Примерно на  $1/3$  полюсного деления пазов нет и эта часть тела ротора (большой зубец) является сердечником полюса  $3$ .

Явнополюсный ротор имеют тихоходные машины, например

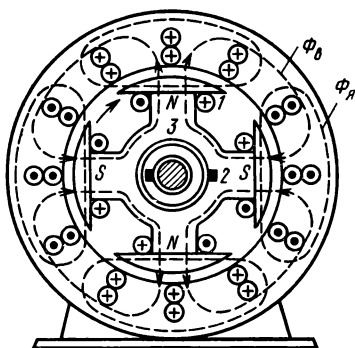


Рис. 8.18

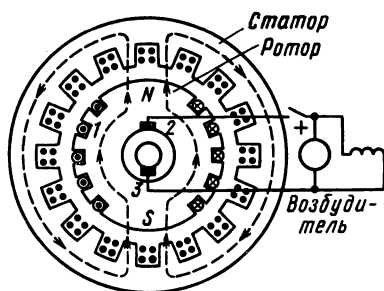


Рис. 8.19

гидрогенераторы (привод от гидротурбины), неявнополюсный делают в расчете на большую частоту вращения, например для турбогенераторов (привод от паровой турбины). Обмотка возбуждения получает питание от особого источника посредством скользящих контактов (два кольца на валу ротора и неподвижные щетки 2). Таким источником чаще всего служит генератор постоянного тока малой мощности (возбудитель), который является частью синхронной машины, так как укреплен на ее валу или корпусе.

Для машин малой и средней мощностей применяют также самовозбуждение, т. е. питание обмотки возбуждения от рабочей обмотки статора через трансформатор и выпрямитель.

Магнитная цепь синхронной машины состоит из сердечника и полюсов ротора, сердечника статора и воздушного зазора между ними. При постоянном токе в обмотке возбуждения и неподвижном роторе магнитное поле машины постоянно во времени, причем вдоль воздушного зазора магнитная индукция распределена по закону, близкому к синусоидальному. С этой целью конечникам явновыраженных полюсов придают форму, при которой воздушный зазор несколько увеличивается в направлении от середины к краям каждого полюса, а в машинах с неявновыраженными полюсами той же цели достигают соответствующей укладкой проводников обмотки возбуждения.

**Рабочий процесс синхронного генератора.** Ротор генератора приводится во вращение первичным двигателем с номинальной частотой вращения, после чего в обмотку возбуждения включают постоянный ток.

Намагничивающая сила обмотки ротора (обмотки возбуждения)  $I_b N_b$  создает магнитный поток  $\Phi_b$ , постоянный во времени и неподвижный относительно полюсов, вращается вместе с ними

относительно неподвижной обмотки статора. Благодаря синусоидальному распределению вдоль воздушного зазора магнитный поток оказывается переменным в каждой точке по окружности статора и поэтому индуцирует в трехфазной обмотке трехфазную систему э.д.с., действующая величина которой согласно формуле (7.1)  $E_x = 4,44 \Phi f_1 N_1 k$ , где  $k$  — коэффициент, которым учитываются особенности обмотки. Такую же величину имеет фазное напряжение при холостом ходе  $U_x$ . Частота э.д.с. пропорциональна частоте вращения ротора и определяется из формулы (8.3)  $f_1 = pN_1/60$ .

С включением потребителя в обмотке статора возникает электрический ток, который создает вторичное магнитное поле (поле статора). При симметричной нагрузке вторичное поле круговое, вращается вместе с первичным полем ротора и замыкается в одной и той же магнитной цепи. Таким образом, при нагрузке к намагничивающей силе обмотки возбуждения добавляется намагничивающая сила обмотки статора. Поэтому магнитный поток в нагрузочном режиме существенно отличается от потока холостого хода (первичного потока). Влияние намагничивающей силы обмотки статора на магнитный поток машины называют реакцией якоря.

Реакция якоря зависит не только от величины нагрузочного тока, но и от характера нагрузки. Ранее было отмечено, что ось намагничивающей силы (н. с.) трехфазной обмотки совпадает с осью той фазы, в которой в данный момент ток достигает своей амплитуды (см. § 8.1).

Рассматривая магнитное поле машины в этот момент, отметим направление магнитного потока  $\Phi_a$  обмотки якоря, которая на рис. 8.20 представлена одной катушкой. При активной нагрузке ( $\cos \varphi_n = 1$ ) э.д.с. и ток в обмотке якоря совпадают по фазе, поэтому при  $i = I_m$  э.д.с. тоже максимальна  $e = E_m$ , что соответствует положению полюсов, изображенному на рис. 8.20, а. В этом случае оси магнитных потоков якоря  $\Phi_a$  и полюсов  $\Phi_b$  сдвинуты на  $\pi/2$ , реакция якоря действует поперек оси полюсов, увеличивая магнитную индукцию под одним краем полюса и уменьшая под другим; в целом магнитный поток несколько уменьшается и ось результирующего потока смещается против вращения ротора.

Если нагрузка чисто реактивная, то ток сдвинут по фазе относительно э.д.с. на  $\pi/2$ . Следовательно, ось магнитного потока займет положение, указанное на рис. 8.20, при индуктивной нагрузке, когда ротор пройдет вперед на угол  $\pi/2$ , а при емкостной нагрузке не дойдет на угол  $\pi/2$  до того положения, которое он занимал при активной нагрузке.

На рис. 8.20, б (индуктивная нагрузка) и рис. 8.20, в (емкост-

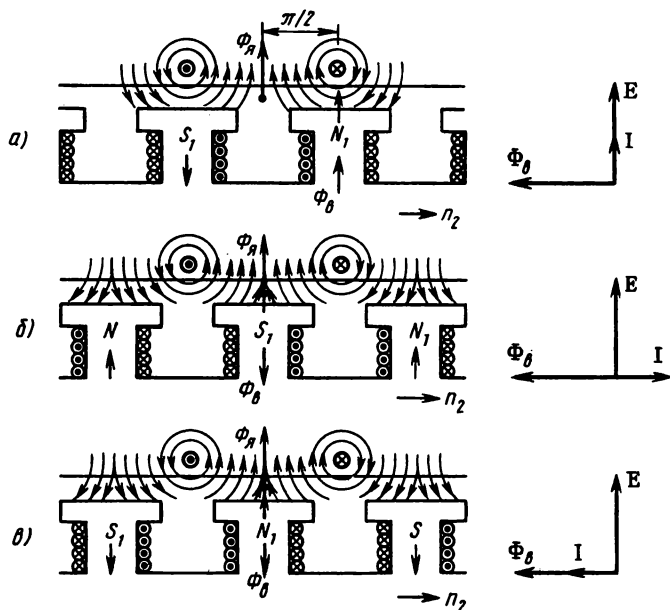


Рис. 8.20

ная нагрузка) видно, что реакция якоря действует вдоль оси полюса, но при индуктивной нагрузке магнитный поток якоря  $\Phi_{\text{Я}}$  направлен встречно, а при емкостной — согласно с первичным потоком, т. е. в первом случае ослабляет, а во втором случае усиливает магнитное поле машины.

Обычно нагрузочный ток имеет активную и индуктивную составляющие (ток отстает от напряжения по фазе), поэтому реакция якоря имеет поперечную и продольную составляющие, в целом уменьшает магнитный поток машины. Из-за этого э.д.с. нагруженного генератора меньше, чем при холостом ходе.

Обмотка статора имеет активное и индуктивное сопротивление, поэтому в рабочем режиме напряжение на внешних зажимах машины дополнительно уменьшается на величину падения напряжения в обмотке ( $I\sqrt{R_1^2 + X_1^2} \approx IX_1$ , так как  $R_1 \ll X_1$ ).

По этим причинам процентное изменение напряжения синхронного генератора при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке значительно больше, чем у трансформатора (при индуктивном токе достигает 20—40 %), а внешняя характеристика  $U = f(I)$  более мягкая.

На рис. 8.21 показаны внешние характеристики синхронного генератора при активной 1, индуктивной 2 и емкостной 3 нагрузках. В таком виде характеристики снимают экспериментально при постоянных значениях тока возбуждения ( $I_b = \text{const}$ ), коэффициента мощности нагрузки ( $\cos \varphi = \text{const}$ ), частоты вращения ротора ( $n_2 = \text{const}$ ).

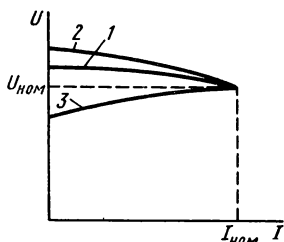


Рис. 8.21

При этом сначала устанавливают номинальный режим, т. е. нагружают генератор номинальным током  $I_{\text{ном}}$  при номинальном напряжении  $U_{\text{ном}}$ , а затем разгружают его.

**Параллельная работа синхронной машины с электрической сетью.** Единичные синхронные генераторы работают только на автономных электростанциях малой мощности. Чаще всего синхронную машину включают в электрическую сеть, где уже работают другие синхронные генераторы. В этих случаях говорят о параллельной работе синхронной машины с сетью.

Синхронный генератор можно включить в сеть только после предварительной подготовки, которая состоит в том, что ротор приводят в движение с частотой вращения, близкой к синхронной; включают возбуждение и регулируют его так, чтобы напряжение на зажимах генератора было равно напряжению в сети; синхронизируют генератор с сетью. В результате синхронизации должны быть выполнены следующие условия: напряжения на зажимах генератора и в сети должны быть равны по величине и противоположны по фазе, частота и порядок чередования фаз напряжения генератора и в сети должны быть одинаковыми.

Непосредственно после включения в сеть синхронный генератор работает вхолостую. Этому режиму соответствует векторная диаграмма рис. 8.22, а, где показаны равные по величине и противоположные по направлению векторы напряжения в сети  $U_c$  и э.д.с. генератора  $E$ . Вектор  $E$  отстает от магнитного потока на угол  $90^\circ$ .

Если увеличить ток в обмотке возбуждения, то э.д.с. генератора увеличится на  $\Delta E$  и в обмотке статора появится ток  $I_a$ , отстающий от  $\Delta E$  на  $90^\circ$  (рис. 8.22, б), так как активное сопротивление обмотки статора значительно меньше индуктивного ( $R_a \ll X_a$ ). Ток  $I_a$  отстает от э.д.с. на четверть периода, поэтому активная мощность генератора  $P_r = U_r I \cos 90^\circ = 0$ , т. е. увеличением тока возбуждения генератор нагрузить активной мощностью нельзя.

Для того чтобы нагрузить генератор активной мощностью, надо увеличить вращающий момент первичного двигателя (уве-



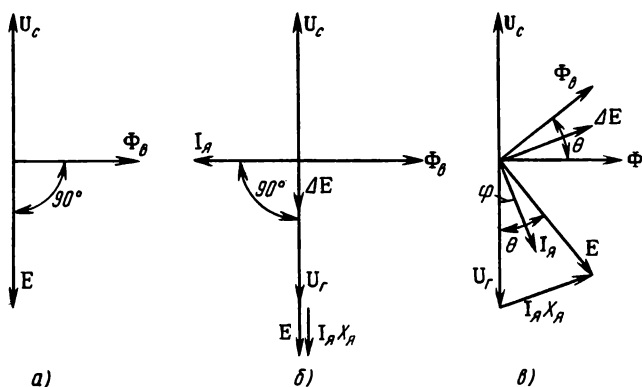


Рис. 8.22

личить расход пара в паровой турбине, воды в гидротурбине). С увеличением момента первичного двигателя ротор генератора продвинется вперед на некоторый угол  $\theta$ , что повлечет за собой изменение фазы магнитного потока  $\Phi_\delta$  и э.д.с.  $E$  на такой же угол. На векторной диаграмме рис. 8.22, *в* это отражено поворотом вектора  $\Phi_\delta$  и  $E$  по ходу вращения на угол  $\theta$ .

В результате этого в обмотке статора появляется разность напряжений  $\Delta E = E - U_r$ , под действием которой возникает нагрузочный ток  $I_a$ . Но в данном случае по отношению к напряжению генератора  $U_r$  ток имеет активную и реактивную составляющие. Поэтому генератор имеет активную мощность  $P = U_r I_a \cos \varphi$ , которой соответствует электромагнитный момент на валу генератора, противодействующий вращающему моменту первичного двигателя.

На основе векторной диаграммы рис. 8.22, *в* можно получить выражение электромагнитного момента, который, как показывает расчет, пропорционален синусу угла  $\theta$ :  $M = M_{\max} \sin \theta$ , где  $M_{\max}$  — наибольшая величина момента, которую синхронная машина развивает при угле  $\theta = 90^\circ$ .

Зависимость электромагнитного момента от угла  $\theta$ , выраженную графически, называют угловой характеристикой синхронной машины (рис. 8.23).

Угол  $\theta$ , как видно на векторной диаграмме, заключен между вектором магнитного потока ротора  $\Phi_\delta$  и вектором результирующего магнитного потока машины  $\Phi$ .

Это обстоятельство используют для наглядного представления силового взаимодействия между ротором и статором в различных режимах синхронной машины. При холостом ходе, когда

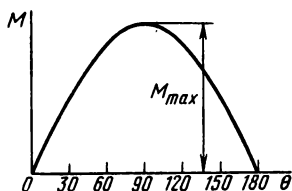


Рис. 8.23

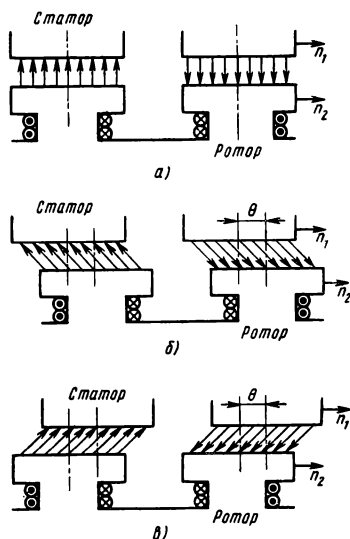


Рис. 8.24

$\theta = 0$ ,  $\Phi = \Phi_{\text{в}}$ , против северного полюса ротора находится южный полюс статора, а оси обоих полюсов в пространстве совпадают (рис. 8.24, а).

В генераторном режиме (рис. 8.24, б) оси полюсов ротора и статора сдвинуты в пространстве на угол  $\theta$ , причем по ходу вращения ротор находится впереди, так как является ведущим звеном.

Электромагнитный момент машины препятствует увеличению угла  $\theta$ . Однако некоторое увеличение вращающего момента первичного двигателя приводит к увеличению угла  $\theta$ , соответствующего увеличению противодействующего электромагнитного момента. Равенство моментов восстанавливается, и генератор работает при несколько большем угле  $\theta$ , но с той же частотой вращения.

Устойчивая работа генератора возможна в пределах изменения угла  $\theta$  от 0 до  $90^\circ$ . Если угол  $\theta$  превысит  $90^\circ$ , то электромагнитный момент уменьшится, что повлечет дальнейшее увеличение угла и уменьшение электромагнитного момента. В этом случае синхронная работа генератора с сетью нарушается и он отключается от сети приборами автоматической защиты.

**Синхронная машина в режиме двигателя.** Синхронную машину, работающую параллельно с сетью, можно перевести в режим двигателя. Постепенное уменьшение вращающего момента первичного двигателя вызовет уменьшение угла  $\theta$  и при  $\theta = 0$  насту-

пит промежуточный режим между генератором и двигателем, когда синхронная машина не отдает энергию в сеть, как генератор, и не потребляет энергии из сети, как двигатель. Если затем к валу машины приложить тормозной момент, а первичный двигатель отключить, то ротор отстанет от вращающегося магнитного поля на угол  $\theta$ , который будет отрицательным ( $\theta < 0$ ). Активная мощность изменит знак, следовательно, изменит направление электромагнитный момент, который теперь будет вращающим. В режиме двигателя ведущим звеном является магнитное поле статора, которое увлекает за собой ротор (рис. 8.24, в). При увеличении момента сопротивления увеличивается угол  $\theta$ , а частота вращения ротора остается без изменения (в пределах устойчивой части угловой характеристики на рис. 8.23).

Такой способ перевода синхронной машины в режим двигателя рассмотрен для наглядности, но на практике он не применяется. Однако без предварительного разгона ротора до частоты вращения, близкой к синхронной, не обойтись, так как неподвижный ротор из-за механической инерции не идет вслед за вращающимся полем и магнитная связь между статором и ротором установиться не может. Иначе говоря, пусковой момент синхронного двигателя равен нулю, если нет у него специального приспособления. Таким приспособлением является пусковая обмотка, которая заложена в пазы на полюсных наконечниках и устроена по типу короткозамкнутой обмотки асинхронного двигателя.

В этом случае пуск в ход синхронного двигателя состоит из двух этапов: *первый этап* — асинхронный разгон ротора до частоты вращения, близкой к синхронной, *второй этап* — включение постоянного тока в обмотку возбуждения. После этого частота вращения ротора достигает синхронной (говорят, что двигатель втягивается в синхронизм). Асинхронный пуск синхронных двигателей большой мощности проводят, если необходимо и возможно, при пониженном напряжении, например, по схеме рис. 8.13, б.

**Реактивный синхронный электродвигатель.** Трех- и однофазные синхронные реактивные двигатели малой мощности (от единиц до нескольких сотен ватт) применяют в автоматике и телемеханике, в схемах сигнализации, синхронной связи, в киноаппаратуре, бытовых электро- и радиоприборах. Основные преимущества таких двигателей состоят в том, что они просты по устройству, включаются в обычную силовую или осветительную сеть и при постоянной частоте в сети имеют постоянную частоту вращения; основной недостаток — низкий коэффициент мощности ( $\cos \varphi \approx \approx 0,6$ ). Принципиальной особенностью реактивных двигателей является отсутствие обмотки возбуждения на роторе с явно выраженными полюсами (рис. 8.25).

Ферромагнитный сердечник ротора намагничивается вращающимся магнитным полем обмотки статора; полюса ротора стремятся занять относительно вращающегося поля такое положение, при котором магнитный поток будет наибольшим.

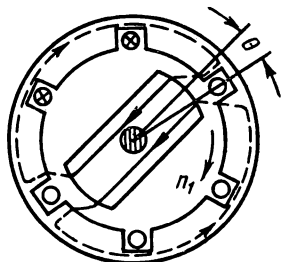


Рис. 8.25

Это универсальное свойство электромагнитных систем в данном случае проявляется в том, что создается вращающий момент, под действием которого ротор вращается с частотой, равной частоте вращения поля. Для пуска реактивные двигатели имеют на роторе пусковую обмотку (асинхронный пуск).

### Контрольные вопросы и задачи

1. Почему ротор турбогенератора делают неявнополюсным, а у гидрогенератора на роторе много явно выраженных полюсов?

2. В обмотке статора синхронного генератора э.д.с.  $E = 4,44 \Phi f_1 Nk$ . Как изменится величина э.д.с., если: увеличить ток в обмотке возбуждения? уменьшить частоту вращения ротора  $n_2$ ?

3. Внешние характеристики трансформатора и синхронного генератора приблизительно одинаковой мощности, в относительных единицах  $U/U_{ном} = f(I_1/I_{ном})$  изображены в общих осях координат. Какое взаимное положение эти характеристики занимают на чертеже?

4. Если вращающий момент первичного двигателя увеличить так, что угол  $\theta$  превысит  $90^\circ$ , синхронная работа генератора с сетью нарушается. В таком случае говорят, что синхронный генератор выпадает из синхронизма. Может ли выпасть из синхронизма из-за перегрузки синхронный двигатель: без пусковой обмотки на роторе? с пусковой короткозамкнутой обмоткой на роторе?

5. После пуска синхронный двигатель вошел в синхронизм. Какое влияние оказывает на работу синхронного двигателя в рабочем режиме пусковая короткозамкнутая обмотка на роторе?

**Задача 8.9.** Технические характеристики синхронного генератора:  $S_{ном} = 30 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ;  $n_{ном} = 1900 \text{ об/мин}$ ; мощность на валу  $P_{мх} = 35 \text{ кВт}$  (при  $\cos \varphi = 1$ ),  $P_{мх} = 28,5 \text{ кВт}$  (при  $\cos \varphi = 0,8$ );  $U_{ном} = 400 \text{ В}$ ;  $f = 50 \text{ Гц}$ . Определить: число пар полюсов  $p$ ; номинальный ток  $I_{ном}$ ; к.п.д. генератора  $\eta$ ; вращающий момент на валу  $M$  при  $\cos \varphi = 1$  и  $\cos \varphi = 0,8$ . Выполнить расчет по условию данной задачи для генератора, имеющего технические характеристики:  $S_{ном} = 60 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ;  $n = 1000 \text{ об/мин}$ ;  $U_{ном} = 400 \text{ В}$ ;  $P_{мх} = 64,9 \text{ кВт}$  (при  $\cos \varphi = 1$ ),  $P_{мх} = 53,5 \text{ кВт}$  (при  $\cos \varphi = 0,8$ ).

**Задача 8.10.** Для синхронного электродвигателя определить: число пар полюсов  $p$ ; активную мощность на зажимах  $P_2$ ; номинальные значения тока  $I_{ном}$ , момента  $M_{ном}$ ; пусковые характеристики: ток  $I_{п}$ , момент (при асинхронном пуске)  $M_{пуск}$ ; максимальный момент  $M_{мах}$ ; мощность потерь при номинальной нагрузке  $\Delta P$ ; реактивную мощность  $Q$ . Даны следующие

технические характеристики:  $P_{\text{ном}}=600$  кВт;  $U_{\text{ном}}=3000$  В;  $n_{\text{ном}}=600$  об/мин;  $\eta_{\text{ном}}=92,2\%$ ;  $\cos \varphi=0,66$  (при опережающем токе);  $k_{\text{п.т}}=I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}=5,4$ ;  $k_{\text{п.т}}=M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}=1,7$ ;  $k_{\text{тах}}=M_{\text{тах}}/M_{\text{ном}}=2,8$ . Выполнить аналогичные расчеты для асинхронного электродвигателя, имеющего технические характеристики:  $P_{\text{ном}}=575$  кВт;  $U_{\text{ном}}=6000$  В;  $n_{\text{ном}}=1000$  об/мин;  $\eta_{\text{ном}}=93\%$ ;  $\cos \varphi=0,8$ ;  $k_{\text{п.т}}=I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}=5$ ;  $k_{\text{п.т}}=M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}=1,4$ ;  $k_{\text{тах}}=M_{\text{тах}}/M_{\text{ном}}=2,3$ .

## ГЛАВА 9

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Развитие электрических машин началось с использованием постоянного тока. Несмотря на длительный период развития машин постоянного тока, по масштабам применения они уступают более простым, надежным и дешевым машинам переменного тока.

Однако остаются многие области техники и технологии, где машины постоянного тока имеют безусловные преимущества, а в некоторых случаях незаменимы.

Электродвигатели постоянного тока могут развивать большой пусковой момент, позволяют плавно регулировать частоту вращения в широких пределах. Поэтому их применяют в качестве тяговых двигателей на всех видах электрического транспорта, в подъемных устройствах; в автоматизированных электроприводах сложных агрегатов (прокатные станы и др.). В автоматике машины постоянного тока применяют в качестве исполнительных устройств, преобразователей сигналов, измерителей скорости и т. д. Там, где используют электродвигатели постоянного тока, необходимы соответствующие им источники электроэнергии. Генераторы постоянного тока применяют также для питания установок электролиза, зарядки аккумуляторов и в других случаях.

#### § 9.1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Конструктивная схема машины постоянного тока (рис. 9.1, а) в основном такая же, как и у других электрических машин: внутри неподвижной части — статора (станина 1, магнитные полюса 2, подшипниковые щиты 3, подшипники 4) находится ротор (сердечник якоря 8, коллектор 7, вал ротора 5, вентилятор 6), опорой которому служат подшипники, укрепленные в боковых щитах.

Однако в устройстве этих частей имеются существенные особенности. Там, где у машины переменного тока на валу ротора укреплены контактные кольца, у машины постоянного тока нахо-

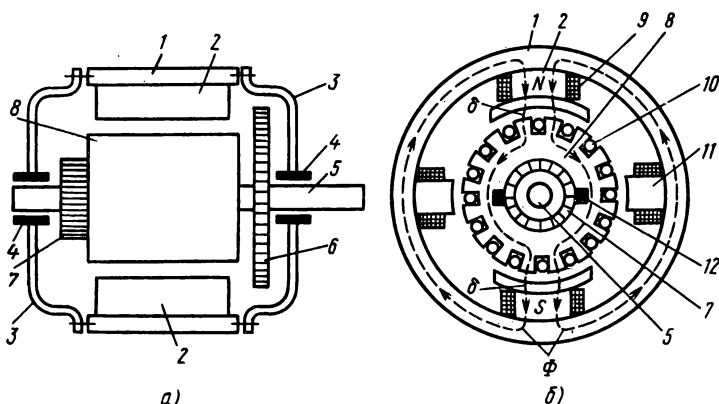


Рис. 9.1

дится наиболее характерная ее часть — коллектор. Расположением коллектора обусловлена и другая особенность — магнитные полюса 2 с обмоткой возбуждения 9 неподвижны (находятся на статоре), а основная обмотка 10 (якорная) вращается в магнитном поле (расположена на роторе).

**Магнитная цепь.** Основной магнитный поток машины  $\Phi$  создает намагничивающая сила обмотки возбуждения 9 (см. рис. 9.1, б для двухполюсной и рис. 9.2, а для четырехполюсной машины), на пути его находятся: сердечники полюсов (северного  $N$  и южного  $S$ ), сердечник якоря 8, два воздушных зазора  $\delta$ , ярмо 1 (часть станины).

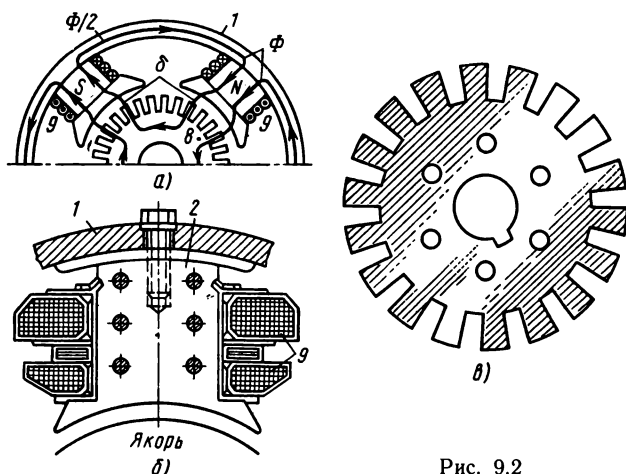


Рис. 9.2

Станина, являясь частью магнитопровода, служит также опорой всей конструкции, поэтому ее изготавливают из стали — материала с хорошими магнитными и механическими свойствами. Главный полюс (рис. 9.2, б) имеет стальной сердечник 2 (набран из отдельных листов), полюсный наконечник (форма его обеспечивает необходимое распределение магнитной индукции в воздушном зазоре), катушку обмотки возбуждения 9 (надета на сердечник полюса). Эта катушка намотана медным проводом на электроизоляционный каркас. Кроме главных имеются дополнительные полюса (цельный сердечник 11 и на нем обмотка) (см. рис. 9.1, б), которые служат для улучшения рабочих свойств машины (см. § 9.2).

Магнитные полюса крепят шпильками к станине так, что дополнительные полюса находятся посередине между главными.

Якорь состоит из сердечника 8 и рабочей обмотки 10, которая уложена в его пазах. Сердечник якоря цилиндрической формы, набран из листов электротехнической стали (рис. 9.2, в).

**Коллектор.** В процессе вращения ротора проводники обмотки якоря движутся в магнитном поле и оказываются поочередно то под северным, то под южным полюсом. Поэтому направление э.д.с., индуцированной в проводниках, периодически меняется на противоположное. Изменяется и величина э.д.с., так как в пределах одного полюсного деления магнитная индукция вдоль воздушного зазора не одинакова. Для того чтобы получить постоянное напряжение на внешних зажимах генератора, необходимо выпрямляющее устройство. Таким устройством является коллектор с наложенными на его рабочую поверхность щетками (12 на рис. 9.1, б).

Принцип действия коллектора рассмотрим сначала на простейшей модели (рис. 9.3) двухполюсного генератора, обмотка якоря которого представлена одной секцией (одним витком). Активные стороны секции соединены с полукольцами простейшего коллектора, на которые наложены две щетки А, Б.

Предположим, что магнитная индукция под полюсом распределена по синусоидальному закону  $B = B_m \sin \beta$  (см. § 4.1), тогда и э.д.с. в секции изменяется во времени по этому же закону. Если щетки расположены на нейтрали машины, то со щеткой А соединена сторона 1 секции, находящаяся под северным полюсом, а со щеткой Б — соединена сторона 2 секции, которая находится под южным полюсом (рис. 9.3, а). Применяя правило правой руки, нетрудно определить полярность щеток. При вращении ротора против движения часовой стрелки полярность щетки А положительная (+), а щетки Б отрицательная (—).

Такая полярность щеток сохраняется постоянно, так как при вращении ротора, когда проводники секции меняются местами

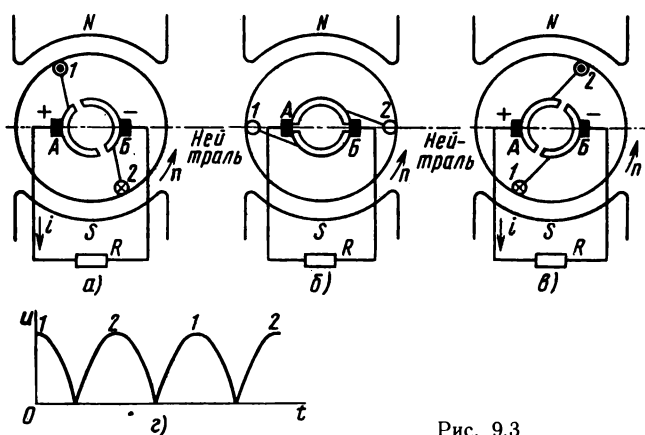


Рис. 9.3

под полюсами, одновременно происходит смена коллекторных пластин под щетками (ср. рис. 9.3, а, в). Момент перехода проводников секции через нейтраль и смены пластин под щетками показан на рис. 9.3, б. В этот момент э.д.с. в секции  $e=0$ , промежутки между пластинами перекрыты щетками и секция замкнута накоротко.

График на рис. 9.3, г показывает, что напряжение между щетками постоянно по направлению, но переменное по величине (пульсирующее напряжение).

Если на якоре расположить несколько секций обмотки и соответственно увеличить количество коллекторных пластин (рис. 9.4, а), то переключение их под щетками будет происходить чаще,

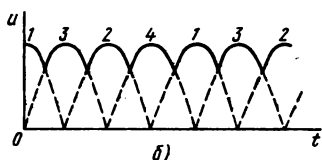
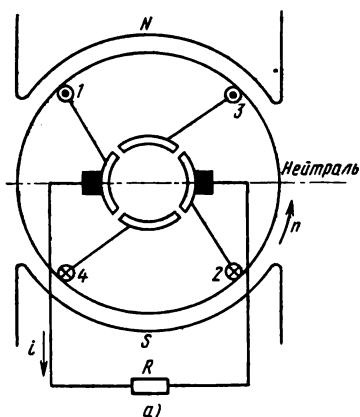


Рис. 9.4



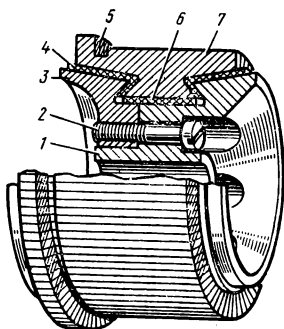


Рис. 9.5

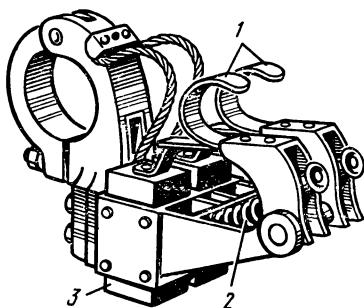


Рис. 9.6

а пульсации напряжения значительно уменьшатся. Это подтверждает рис. 9.4, б, где показан график напряжения между щетками генератора, который имеет две секции (1—2 и 3—4), сдвинутые по якору на  $90^\circ$ , и четыре пластины на коллекторе. Пульсации напряжения практически незаметны уже при 16 секциях в обмотке якоря.

Рабочая поверхность коллектора реальной машины (рис. 9.5) образована ребрами пластин 7 из холоднокатаной меди. Медные коллекторные пластины разделены между собой электроизоляционными миканитовыми прокладками 4, 6, а также изолированы от деталей (нажимного кольца 3, стяжного болта 2), которыми пластины и изоляционные прокладки прочно удерживаются на корпусе 1, как единая конструкция и коллектор в целом крепится на валу ротора.

Коллекторные пластины со стороны якоря имеют выступы 5 (петушки), к которым припаивают проводники, соединяющие их с секциями якорной обмотки.

К рабочей поверхности коллектора прилегают угольно-графитовые или металлоугольные щетки, которые находятся в щеткодержателях (рис. 9.6). Щетки 3 прижаты к коллектору пружинами 2 через промежуточные откидные детали 1 (курки).

Щеткодержатели надежно изолированы от корпуса машины, насажены на щеточную траверсу, которая закреплена на подшипниковом щите или на станине, но позволяет смещать щетки по окружности коллектора. Все щетки одинаковой полярности электрически соединены между собой и с внешним зажимом на щитке машины.

**Обмотка якоря.** Обмотка якоря машины постоянного тока во многом похожа на обмотку статора синхронной машины, но в отличие от нее замкнута на себя. В зависимости от порядка соеди-

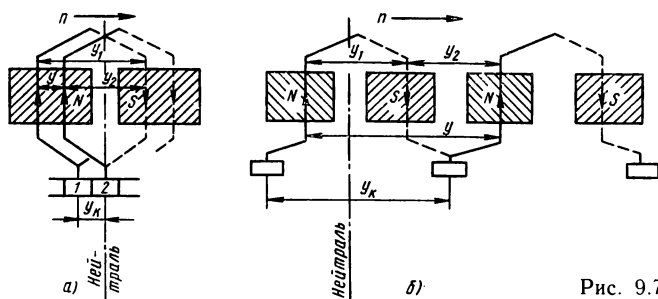


Рис. 9.7

нения секций между собой различают обмотки петлевые и волновые. Их нетрудно различить, если следовать от одной секции к другой по схеме обмотки (рис. 9.7). Первый шаг  $y_1$ , т. е. расстояние между сторонами одной секции, выраженное числом пазов, выполняют одинаково для обеих обмоток так, чтобы он был приблизительно равен полюсному делению  $\tau$ , и рассчитывают по формуле

$$y_1 = z/2p \pm \epsilon,$$

где  $z$  — число пазов в сердечнике якоря;  $p$  — число пар полюсов;  $\epsilon$  — дробное число, дополняющее дробную величину  $z/2p$  до целого числа ( $\epsilon < 1$  или  $\epsilon = 0$ ).

Второй шаг  $y_2$  (между концом данной и началом следующей секции) делают по отношению к направлению первого шага не одинаково: в волновой обмотке — в том же направлении, а в петлевой — в противоположном. Поэтому результирующий шаг  $y$  (между началами двух соседних секций) в петлевой обмотке равен разности ( $y = y_1 - y_2$ ), а в волновой — сумме ( $y = y_1 + y_2$ ) частных шагов.

Начало каждой секции соединено с концом предыдущей секции и с соответствующей пластиной коллектора. Следовательно, при перемещении от одной секции к другой по якорю одновременно делают шаг по коллектору ( $y_k$ ).

При вращении ротора в проводниках обмотки якоря индуцируется э.д.с., направление которой изменяется на противоположное, когда данный проводник переходит через нейтраль, так как для него изменяется полярность полюса. Рассматривая секции обмотки (рис. 9.7, а, б) и применяя правило правой руки, можно установить, что э.д.с. в проводниках одной секции складываются. В двух соседних секциях э.д.с. тоже направлены одинаково по отношению к направлению обмотки, т. е. складываются, если соответственные их стороны находятся под полюсом одинаковой

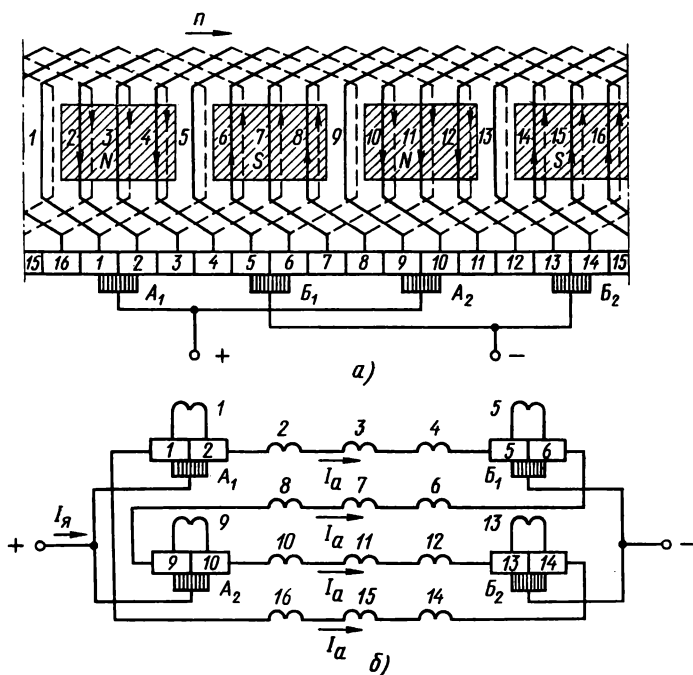


Рис. 9.8

полярности. Эти положения отражены и на развернутых схемах обмоток: простой петлевой (рис. 9.8, а, б) и простой волновой (рис. 9.9, а, б), построенных по результатам решения задач 9.1 и 9.2.

При следовании по схеме обмотки встречается группа секций с одинаковым направлением э.д.с. (например, на схеме рис. 9.8, а, б секции 2, 3, 4). Эта группа составляет одну ветвь обмотки. Далее идет секция, в которой э.д.с. равна нулю (проводники этой секции находятся в данный момент на нейтрали), а за ней — вторая ветвь, в которой э.д.с. направлена противоположно первой ветви. В простой петлевой обмотке число ветвей равно числу полюсов; в простой волновой их всего две при любом числе пар полюсов. Выделение в обмотке ветвей с одинаковым направлением э.д.с. во всех секциях позволяет решить вопрос о расположении щеток.

Щетки на коллекторе надо расположить так, чтобы разность потенциалов между ними была наибольшая. В этом случае полно-

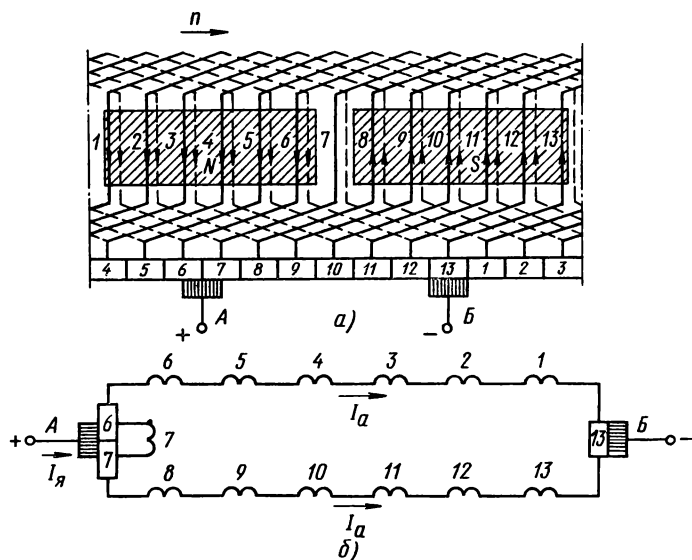


Рис. 9.9

стью использована э.д.с. обмотки, равная э.д.с. одной ветви. Следовательно, одна из двух щеток должна быть соединена с началом, а другая с концом ветви. Между началом и концом ветви расстояние по якорю равно полюсному делению  $\tau$ , а по коллектору это соответствует  $k/2p$  коллекторных делений, где  $k$  — число пластин на коллекторе. Здесь надо также отметить, что ширина щетки больше ширины коллекторной пластины, поэтому щетка перекрывает несколько пластин и замыкает накоротко присоединенные к ним секции обмотки. При правильной установке щетка замыкает накоротко секции, активные стороны которых находятся в нейтральной зоне между полюсами (см. электрическую схему обмотки на рис. 9.8, б).

### Контрольные вопросы и задачи

1. Обмотка якоря машины постоянного тока имеет несколько ветвей и в каждой из них наводится э.д.с. Почему э.д.с. обмотки якоря равна э.д.с. одной ветви?
2. Генератор постоянного тока работает с постоянной частотой вращения якоря и при постоянном токе в обмотке возбуждения. Как изменяется напряжение на зажимах генератора при увеличении его нагрузки?
3. На валу двигателя постоянного тока увеличен момент сопротивления, а напряжение на его зажимах неизменно. Как изменится ток в обмотке якоря электродвигателя?

4. В какую сторону относительно направления вращения якоря смещается физическая нейтраль в машине постоянного тока: в режиме генератора? в режиме двигателя?

5. Почему в машинах постоянного тока компенсационную обмотку и обмотку добавочных полюсов включают последовательно с обмоткой якоря?

**Задача 9.1.** Построить развернутую схему простой петлевой двухслойной обмотки по следующим данным: число пар полюсов  $p=2$ ; число пазов в сердечнике якоря  $z=16$ .

Решение. Шаги обмотки по якорю: первый шаг

$$y_1 = z/2p \pm \epsilon = 16/4 \pm 0 = 4 \quad (\epsilon=0);$$

второй шаг  $y_2 = y_1 - y = 4 - 1 = 3$ , так как результирующий шаг простой петлевой обмотки  $y=1$ .

Для простой петлевой двухслойной обмотки  $k=s=z=16$  ( $s$  — число секций,  $k$  — число коллекторных пластин). Далее построение проведено в следующем порядке:

1) начерчены стороны секций (верхний слой — сплошная линия, нижний слой — пунктирная) и пронумерованы пазы и секции;

2) нанесены контуры полюсов и их обозначения  $N-S-N-S$ , причем ширина полюса принята приблизительно 0,8  $\tau$ ;

3) изображены и пронумерованы коллекторные пластины (пластина № 1 соединена с началом секции № 1);

4) нанесены лобовые части секций, соединения между секциями и коллекторных пластин с секциями;

5) поставлены щетки. Расстояние между щетками составляет  $k/2p = 16/4 = 4$  коллекторных деления;

6) определена полярность щеток (по правилу правой руки); соединены между собой щетки одинаковой полярности; нанесены соединения щеток с внешними зажимами.

**Задача 9.2.** Построить развернутую схему простой волновой двухслойной обмотки, если известны:  $p=1$ ;  $z=13$ .

Решение. Число секций  $s=z=13$ , число пластин коллектора  $k=s=13$ . Результирующий шаг обмотки по якорю равен шагу по коллектору:

$$y_k = y = \frac{k \pm 1}{p} = \frac{13 - 1}{1} = 12.$$

$$y_1 = z/2p \pm \epsilon = 13/2 - 1/2 = 6; \quad y_2 = y - y_1 = 12 - 6 = 6.$$

На рис. 9.9, а, б показаны развернутая и электрическая схемы обмотки.

## § 9.2. РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрические машины постоянного тока изготавливают для работы в качестве генераторов электрической энергии и в качестве электродвигателей. Те и другие машины имеют свои особенности и рассмотрены далее отдельно. Однако имеются вопросы, общие для генераторов и двигателей.

**Э.д.с. и электромагнитный момент машины постоянного тока.** Основой для выражения э.д.с. обмотки якоря является закон электромагнитной индукции. По формуле (3.35) можно определить мгновенную величину переменной э.д.с. в проводнике, так как магнитная индукция вдоль воздушного зазора распределена неравномерно. Средней величине магнитной индукции под полюсом соответствует средняя величина э.д.с. одного проводника  $E_{ср} = B_{ср} v l$ . Окружная скорость проводника  $v = \pi D n / 60 = 2\pi r n / 60$ , где  $D$  — диаметр якоря;  $n$  — частота вращения, об/мин;  $p$  — число пар полюсов;  $\tau$  — полюсное деление, тогда  $E_{ср} = B_{ср} l \tau 2\pi n / 60$ . Но  $l \tau = S$  — площадь одного полюсного деления, а  $B_{ср} S = \Phi$  — магнитный поток одного полюса, поэтому  $E_{ср} = 2\pi n \Phi / 60$ .

Э.д.с. обмотки якоря равна э.д.с. одной параллельной ветви, поэтому

$$E = E_{ср} N / 2a = \frac{pN}{60a} \Phi n,$$

где  $N$  — число проводников всей обмотки якоря;  $a$  — число пар параллельных ветвей.

Из величин, входящих в формулу, можно изменять только  $\Phi$  и  $n$ , другие у построенной машины остаются неизменными. Обозначив постоянный коэффициент  $pN/60a = C_E$ , получим формулу

$$E = C_E \Phi n. \quad (9.1)$$

В обмотке нагруженной машины имеется электрический ток, поэтому на проводники обмотки со стороны магнитного поля действуют электромагнитные силы [см. формулу (3.24)]. Относительно вала ротора эти силы создают электромагнитный момент  $M_{эм} = B_{ср} I_a l n D / 2$ , где  $I_a$  — ток в проводнике обмотки якоря.

Выразив, как и ранее,  $\pi D = 2\pi \tau$ , а  $B_{ср} l \tau = \Phi$ , получим  $M_{эм} = \frac{pN}{\pi} \Phi I_a$ .

Ток в проводнике  $I_a$  — это ток одной ветви обмотки якоря. Он является частью общего тока машины  $I_{я} = I_a 2a$ , поэтому

$$M_{эм} = pN \Phi I_{я} / (2\pi a).$$

Величина  $pN/(2\pi a) = C_M$  постоянна для данной машины, следовательно, электромагнитный момент пропорционально зависит от тока в обмотке якоря и магнитного потока:

$$M_{эм} = C_M \Phi I_{я}. \quad (9.2)$$

**Обратимость машины постоянного тока.** Известный принцип обратимости электрических машин относится и к машинам постоянного тока. В генераторном режиме (см. рис. 9.4, а) ротор при-

водят во вращение первичным двигателем, который развивает движущий механический момент  $M_{\text{мх}}$ .

К зажимам генератора подключен приемник электрической энергии. Под действием э.д.с. обмотки якоря в электрической цепи обмотка — электроприемник образуется постоянный электрический ток  $I = E / (R + R_{\text{я}})$ , где  $R$  — сопротивление электроприемника;  $R_{\text{я}}$  — внутреннее сопротивление цепи якоря. Учитывая, что  $IR = U$ , найдем, что э.д.с. генератора больше напряжения на его зажимах на величину падения напряжения в цепи якоря

$$E_{\text{г}} = U + I_{\text{я}} R_{\text{я}}. \quad (9.3)$$

Электромагнитный момент противодействует вращению, но при равенстве  $M_{\text{мх}} = M_{\text{эм}}$  поддерживается постоянная частота вращения ротора генератора. Механическому моменту на его валу соответствует механическая мощность  $P_{\text{мх}} = M_{\text{мх}} \omega$ , где  $\omega = 2\pi n / 60$  — угловая частота вращения ротора.

Учитывая равенство моментов, получим равенство механической и электромагнитной мощностей:

$$P_{\text{мх}} = M_{\text{эм}} 2\pi n / 60 = \frac{\rho N}{2\pi a} \Phi I_{\text{я}} \frac{2\pi n}{60} = \frac{\rho N}{60a} \Phi n I_{\text{я}} = E_{\text{г}} I_{\text{я}} = P_{\text{эм}}.$$

Это равенство указывает на то, что механическая энергия, переданная генератору от первичного двигателя, полностью преобразуется в электрическую.

В отличие от генератора к зажимам электродвигателя вместо электроприемника подключают источник электрической энергии, а его вал соединяют механической передачей с рабочей машиной — приемником механической энергии (вместо первичного двигателя — источника механической энергии для генератора).

На зажимы электродвигателя подается напряжение  $U$ , под действием которого возникает ток в обмотке якоря. Магнитное поле машины действует на ток в проводниках обмотки, отчего образуется электромагнитный момент. Если полярность напряжения на зажимах машины, переведенной в режим двигателя, сохранить такой же, как в режиме генератора, направление тока в обмотке изменится. Следовательно, изменит свое направление электромагнитный момент, который будет направлен в сторону вращения ротора, т. е. станет движущим. Направления вращения якоря и магнитного потока сохраняются, поэтому сохраняется направление э.д.с. в обмотке, которая теперь направлена навстречу току (ее называют против-э.д.с.).

Напряжение на зажимах электродвигателя больше э.д.с. на величину падения напряжения в цепи якоря

$$U = E_{\text{д}} + I_{\text{я}} R_{\text{я}}. \quad (9.4)$$

Частота вращения ротора постоянна при том же условии равенства моментов  $M_{эм} + M_c$ , где  $M_c$  — момент сопротивления на валу двигателя. Основную его часть составляет момент рабочей машины, которую электродвигатель приводит в движение.

Из равенства (9.4), умножив его на ток  $I_{я}$ , нетрудно получить баланс мощностей:  $UI_{я} = E_{\partial} I_{я} + I_{я}^2 R_{я}$ .

В левой части баланса находится электрическая мощность на входе (на внешних зажимах) двигателя, правая состоит из двух слагаемых: первое выражает электромагнитную мощность  $P_{эм} = E_{\partial} I_{я}$ , второе — мощность потерь в цепи якоря  $\Delta P_{я} = I_{я}^2 R_{я}$ .

Электромагнитная мощность  $P_{эм} = E_{\partial} I_{я} = \frac{pn}{60a} \Phi n I_{я}$ . Учитывая, что  $n = 60\omega/2\pi$ , получим

$$P_{эм} = \frac{pN}{60a} \frac{60}{2\pi} \Phi I_{я} \omega = M_{эм} \omega = M_{мх} \omega = P_{мх}.$$

Таким образом, электрическая энергия, поступающая в обмотку якоря электродвигателя, частично преобразуется в теплоту, а большая часть преобразуется в механическую энергию и передается рабочей машине, которую электродвигатель приводит в движение.

**Реакция якоря.** Явление реакции якоря, рассмотренное ранее в синхронной машине, имеется и в машине постоянного тока: основное магнитное поле полюсов изменяется под действием намагничивающей силы обмотки якоря.

При холостом ходе магнитное поле машины симметрично относительно оси полюсов, физическая нейтраль (плоскость, проведенная через точки на поверхности якоря, где магнитная индукция равна нулю) совпадает с геометрической нейтралью  $n-n'$  (рис. 9.10, а). В нагруженной машине ( $I_{я} \neq 0$ ) обмотка якоря является вторым источником намагничивающей силы, создает вторичное магнитное поле, направленное поперек оси полюсов (рис. 9.10, б).

В результате наложения вторичного поля на основное образуется результирующее несимметричное магнитное поле (рис. 9.10, в). Несимметрия состоит в том, что под одним краем полюса оба поля направлены встречно и магнитная индукция уменьшена, а под другим краем увеличена.

В связи с перераспределением магнитной индукции в воздушном зазоре произошло смещение физической нейтрали  $f-f'$  на некоторый угол  $\beta$ . Реакция якоря существенно ухудшает рабочие свойства машины постоянного тока. Если щетки установлены на геометрической нейтрали, а физическая нейтраль смещена, то создаются условия для возникновения искрения на коллекторе



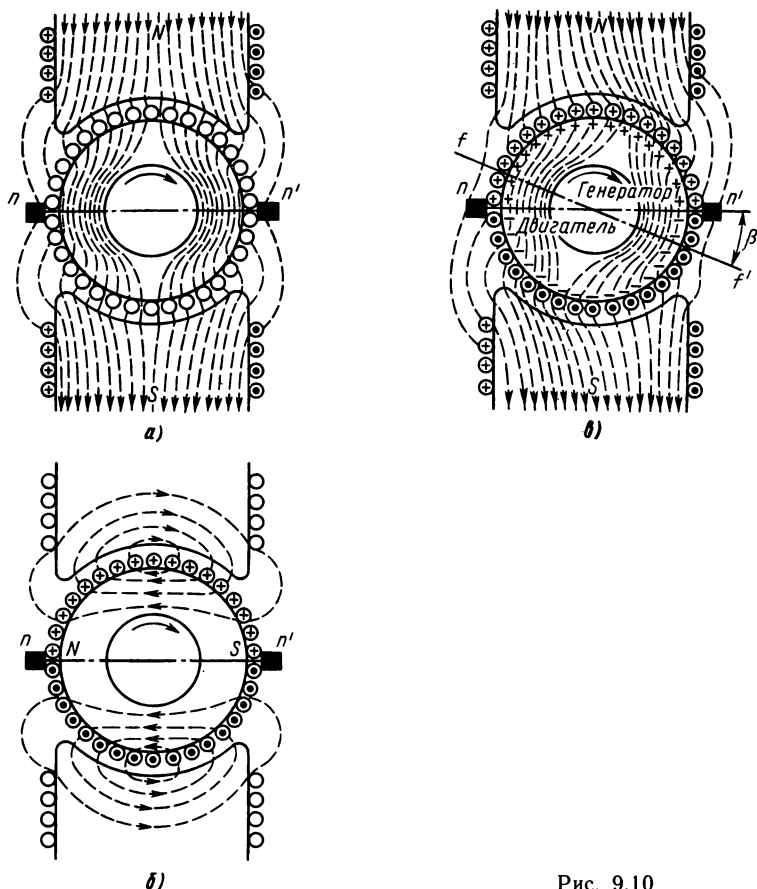


Рис. 9.10

(см. далее о коммутации). Этому способствует и местное увеличение магнитной индукции под одним краем полюса, так как увеличиваются мгновенные величины э.д.с. в секциях и напряжения между соседними коллекторными пластинами, что может привести к возникновению дуговых разрядов между пластинами и даже кругового огня на коллекторе. Более детальный анализ показывает, что в машине с насыщенной магнитной системой реакция якоря приводит к уменьшению средней магнитной индукции под полюсом. Размагничивающее действие усиливается при смещении щеток с геометрической нейтрали, так как вместе с этим смещается направление намагничивающей силы обмотки якоря и в ее составе появляется продольная составляющая, направленная встречно к основному магнитному потоку полюсов.

В результате размагничивания машины уменьшаются э.д.с. генератора и вращающий момент двигателя. Для устранения вредного влияния реакции якоря машины постоянного тока большой мощности (свыше 150 кВт) снабжают компенсационной обмоткой, которую укладывают в пазах на полюсных наконечниках, а включают последовательно с обмоткой якоря.

**Коммутация.** В процессе вращения ротора непрерывно происходит смена коллекторных пластин под щетками и одновременно секции обмотки якоря поочередно переходят из одной параллельной ветви в другую.

Рассматривая участок развернутой или электрической схемы обмотки якоря (см. рис. 9.8, а, б), можно проследить такой переход и установить, что в секции, которая переходит из одной ветви в другую, ток изменяет направление (см. также рис. 9.11).

Переключение секций обмотки якоря из одной ветви в другую посредством коллектора называют коммутацией. Время, в течение которого происходит переключение одной секции, называют периодом коммутации. В этот период времени переключаемая секция замкнута щеткой накоротко и ток в ней изменяется от  $I_a$  до  $-I_a$ , где  $I_a$  — ток одной параллельной ветви. Рассмотрим идеализированный процесс коммутации при следующих условиях: щетки расположены на геометрической нейтрали, ширина щетки равна ширине коллекторного деления, в переключаемой секции не наводится э.д.с.

В момент времени, предшествующий началу коммутации, под щеткой  $B_1$  находится пластина  $\delta$ , переключаемая секция  $\delta$  в левой ветви обмотки и ток в ней  $i = I_a$  (рис. 9.11, а). Как только щетка коснется пластины  $\delta$ , секция замыкается накоротко и образуется электрический контур, в который кроме этой секции входят контактные сопротивления между пластинами и щетками (рис. 9.11, б). В этом случае несложные рассуждения и выводы, которые здесь не приведены, позволяют получить зависимость тока в коммутируемой секции от времени  $i = I_a (1 - 2t/T)$ .

В середине периода коммутации, т. е. при  $t = T/2$ , ток  $i = 0$  (рис. 9.11, в); в конце его  $t = T$ ,  $i = -I_a$  (рис. 9.11, г).

График тока в переключаемой секции, соответствующий это-

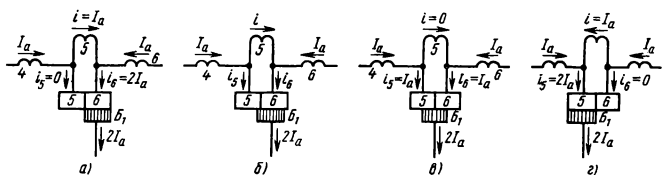


Рис. 9.11

му уравнению, показан на рис. 9.12 (прямая 1). Коммутацию по такому графику называют *прямолинейной*.

В действительности процесс коммутации осложнен тем, что в короткозамкнутой секции наводятся электродвижущие силы:  $e_L$  — э.д.с. самоиндукции, обусловленная изменением тока дан-

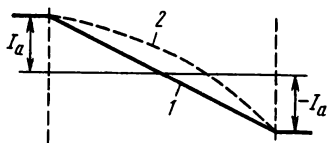


Рис. 9.12

ной секции [см. формулу (3.32)];  $e_M$  — э.д.с. взаимной индукции, связанная с изменением токов в других секциях, уложенных в тех же пазах, что и данная секция [см. формулу (3.33)];  $e_v$  — э.д.с. вращения (наводится потому, что из-за реакции якоря магнитная индукция на геометрической нейтрали не равна нулю [см. формулу (3.35)]).

Эти э.д.с. действуют в направлении тока  $i$ , т. е. задерживают его падение, что можно представить, как возникновение в переклюкаемой секции добавочного тока коммутации. Поэтому ток переходит через нуль во втором полупериоде коммутации (на рис. 9.12 кривая 2). Коммутацию в этом случае называют *замедленной*.

Однако основную роль здесь играет реактивная э.д.с., которая при малом периоде коммутации (при большой частоте вращения якоря) достигает значительной величины. Поэтому в момент размыкания секции между щеткой и пластиной возникает искра, на создание которой затрачивается энергия магнитного поля, соответствующая добавочному току коммутации  $i_k = e_p / R_{щ}$ . Ток  $i_k$  можно уменьшить путем увеличения сопротивления щеточного контакта  $R_{щ}$  (для этого применяют твердые щетки — графитные, металлоугольные). Но наиболее действенный метод улучшения коммутации заключается в устранении реактивной э.д.с. в короткозамкнутых секциях.

С этой целью устанавливают добавочные полюса и создают в зоне коммутации (в зоне геометрической нейтрали) добавочную магнитную индукцию такой величины и направления, чтобы в переклюкаемых секциях наводилась э.д.с., направленная встречно реактивной э.д.с.  $e_p$ .

#### Контрольные вопросы и задачи

1. Почему, в отличие от синхронной машины, обмотку якоря машины постоянного тока располагают на роторе, а магнитные полюса — на статоре?

2. Согласно закону электромагнитной индукции, э.д.с. в проводнике, движущемся в магнитном поле, выражается формулой (3.36). При таком условии э.д.с. будет постоянна. Можно ли постоянную э.д.с. получить без применения коллектора?

3. На рис. 9.3, г показан график напряжения между щетками. Какое напряжение занимают проводники секции по отношению к полюсам, когда напряжение между щетками равно нулю и когда оно наибольшее?

4. Какую величину будет иметь э.д.с. секции обмотки якоря, если ширина ее будет равна двойному полюсному делению (шаг  $y_1 = z/p$ )? если  $y_1 = 1$ ?

5. Вольтметр, включенный к зажимам четырехполюсного генератора постоянного тока при холостом ходе, показывает напряжение  $U_x$ . Чему равна суммарная э.д.с. всех секций? одной ветви обмотки якоря? двух соседних ветвей? всей обмотки?

**Задача 9.3.** Простая петлевая обмотка якоря двухполюсного генератора постоянного тока имеет  $s = 164$  секции по два витка в каждой ( $n = 2$ ). Магнитный поток полюса  $\Phi = 1,2 \cdot 10^{-2}$  Вб, частота вращения якоря  $n = 1000$  об/мин. Определить напряжение на зажимах генератора и электромагнитный момент, если сопротивление цепи якоря  $R_{\text{я}} = 0,15$  Ом, а ток якоря  $I_{\text{я}} = 75$  А. Решить ту же задачу, если обмотка якоря простая волновая с числом секций  $s = 167$ , а сопротивление цепи якоря  $R_{\text{я}} = 0,35$  Ом.

**Задача 9.4.** Четырехполюсный двигатель постоянного тока имеет на якоре простую волновую обмотку с числом активных проводников  $N = 620$ ; магнитный поток полюса  $\Phi = 0,036$  Вб, сопротивление цепи якоря  $R_{\text{я}} = 0,35$  Ом.

Определить электромагнитный вращающий момент и частоту вращения якоря, если напряжение на зажимах двигателя  $U = 550$  В, а ток в якоре  $I_{\text{я}} = 105$  А.

Решить задачу по тому же условию, если обмотка якоря простая петлевая с числом двухвитковых секций  $s = 156$ , напряжение на зажимах двигателя  $U = 220$  В, ток в якоре  $I_{\text{я}} = 55$  А, магнитный поток полюса  $\Phi = 1,98$  Вб.

### § 9.3. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Свойства и рабочие характеристики генераторов постоянного тока различны в зависимости от схемы возбуждения, т. е. от способа создания рабочего магнитного потока.

Различают два типа возбуждения: независимое (схемы с обмоткой возбуждения, с постоянным магнитом); самовозбуждение (схемы параллельная, последовательная, смешанная).

Наиболее полно и наглядно эксплуатационные свойства генераторов можно рассмотреть с помощью ряда функциональных зависимостей, которые выражают на графиках и называют характеристиками генератора. Основными из них являются: характеристика холостого хода  $U_x = f(I_{\text{я}})$  при  $I = 0$ ,  $n = \text{const}$ ; нагрузочная характеристика  $U = f(I_{\text{я}})$  при  $I \neq 0$ ,  $n = \text{const}$ ; внешняя характеристика  $U = f(I)$  при  $R_{\text{в}} = \text{const}$ ,  $n =$

$= \text{const}$ ; регулировочная характеристика  $I_b = f(I)$  при  $U = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ .

Здесь приняты обозначения:  $U_x$  — напряжение холостого хода;  $I_b$  — ток возбуждения;  $I$  — ток нагрузки;  $U$  — напряжение на внешних зажимах генератора при нагрузке;  $n$  — частота вращения якоря;  $R_b$  — сопротивление цепи возбуждения.

**Генератор независимого возбуждения.** Возбуждение называют независимым, если обмотка возбуждения присоединена к постороннему источнику, а с обмоткой якоря данного генератора не связана. Схема независимого возбуждения изображена на рис. 9.13, а, где также показаны простейшие аппараты управления и защиты, измерительные приборы; для изменения тока возбуждения служит регулировочный реостат  $R_{p.b.}$ , а в цепи якоря имеется нагрузочный реостат  $R_n$ .

По этой схеме проводят опыты, в результате которых можно построить характеристики генератора.

Для построения характеристики холостого хода якоря генератора приводят во вращение при разомкнутом выключателе  $B$  и токе возбуждения  $I_b = 0$ ; устанавливают номинальную частоту вращения ротора  $n_{\text{ном}}$  и затем ее поддерживают постоянной. Далее постепенно увеличивают ток возбуждения, записывают показания приборов: амперметра в цепи возбуждения ( $I_b$ ) и вольтметра, присоединенного к внешним зажимам генератора ( $U_x$ ).

Характеристика холостого хода  $U_x = f(I_b)$  (кривая 1 на рис. 9.13, б) по форме повторяет характеристику намагничивания магнитной цепи генератора  $\Phi = f(F_m)$ . В свою очередь, характеристика намагничивания магнитной цепи по форме подобна характеристике намагничивания материала (см. рис. 3.11), из которого она изготовлена (электротехническая сталь). В данном

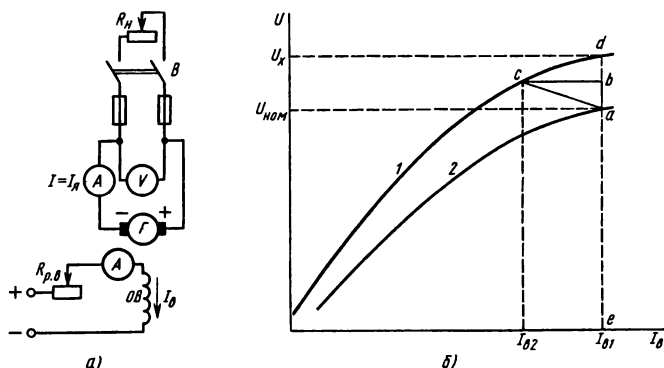


Рис. 9.13

случае рассуждения, приведенные в § 3.3, полностью объясняют характер кривой холостого хода.

При холостом ходе  $U_x = E$ , э.д.с. генератора пропорциональна величине магнитного потока  $\Phi$  [см. формулу (9.1)]. Следовательно, по оси ординат откладываются пропорциональные величины. То же можно сказать относительно оси абсцисс, так как намагничивающая сила  $F_m$  пропорциональна току возбуждения [см. формулу (3.7)].

На том же рисунке 9.13, б находится нагрузочная характеристика (кривая 2). Она расположена ниже характеристики холостого хода, так как напряжение на зажимах нагруженного генератора меньше напряжения холостого хода. Одна причина этого видна из формулы (9.3), где  $R_{\Sigma}$  — сопротивление всех участков цепи якоря: обмотки якоря ( $R_a$ ), обмотки добавочных полюсов ( $R_d$ ), компенсационной обмотки ( $R_k$ ), сопротивление контакта между щетками и коллектором ( $R_{щ}$ ):  $R_{\Sigma} = R_a + R_d + R_k + R_{щ}$ . Отрезок  $ab$  выражает величину  $I_a R_{\Sigma}$ .

Другая причина заключена в размагничивающем действии реакции якоря. При токе возбуждения  $I_{в1}$ , который требуется, чтобы при номинальной нагрузке генератора получить на его зажимах номинальное напряжение  $U_{ном}$ , отрезок  $db$  выражает величину снижения э.д.с. машины при нагрузке по сравнению с режимом холостого хода. Точка  $c$  на характеристике холостого хода определяет ток возбуждения  $I_{в2}$ , который требуется при тех же условиях, но при отсутствии реакции якоря. Треугольник  $abc$  называют реактивным.

Величины для построения внешней характеристики получают в результате следующего опыта: генератор приводят во вращение с номинальной частотой  $n_{ном}$ , нагружают номинальным током  $I_{ном}$  при номинальном напряжении  $U_{ном}$ .

Затем, не изменяя сопротивление в цепи обмотки возбуждения ( $R_{р.в} = \text{const}$ ) и поддерживая постоянной частоту вращения якоря ( $n = \text{const}$ ), постепенно уменьшают нагрузку генератора до нуля ( $I = 0$  при холостом ходе); записывают показания амперметра и вольтметра в цепи якоря.

Внешняя характеристика (см. рис. 9.15, кривая 1) показывает, что с увеличением тока нагрузки  $I$  напряжение  $U$  на зажимах генератора уменьшается по причинам, отмеченным ранее.

Относительное изменение напряжения генератора при увеличении тока нагрузки от нуля до номинальной величины выражают в процентах:  $\Delta U \% = (U_x / U_{ном} - 1) 100$ . Это отношение для генераторов независимого возбуждения составляет 5—10 %.

**Генератор параллельного возбуждения.** Свойство ферромагнитных материалов сохранять остаточную намагниченность (см. § 3.3) находится в основе самовозбуждения генераторов

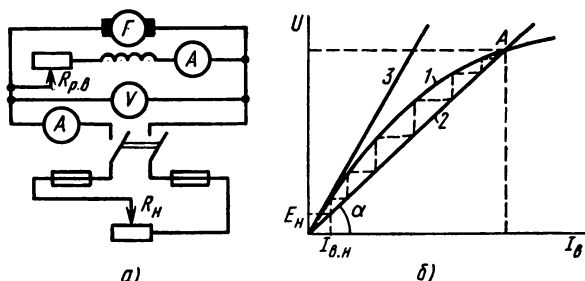


Рис. 9.14

постоянного тока, которое оказывается возможным в данном генераторе при соединении обмотки возбуждения с обмоткой якоря.

На рис. 9.14, а показана схема, где эти обмотки соединены параллельно, а на графике 9.14, б изображены характеристика холостого хода (кривая 1) и зависимость падения напряжения в цепи возбуждения от тока возбуждения  $U_x = I_\delta R_\delta$  (прямая 2). Изображение этих характеристик в общих осях позволяет наглядно проследить процесс самовозбуждения.

Если якорь вращается (например, с частотой вращения  $n_{\text{ном}}$ ), то в его обмотке остаточный магнитный поток  $\Phi_0$  наводит начальную э.д.с.  $E_H$ , которая вызывает в обмотке возбуждения малый начальный ток возбуждения  $I_{\delta,н}$ .

Этот ток создает намагничивающую силу  $I_{\delta,н} N_\delta$  обмотки возбуждения. Если она направлена согласно с потоком  $\Phi_0$ , то магнитный поток полюсов увеличится, что, в свою очередь, приведет к увеличению э.д.с. и последующему росту тока возбуждения, и т. д.

Окончанию процесса возбуждения соответствует точка А, в которой пересекаются характеристики 1 и 2, так как в этой точке равенство  $U_x = I_\delta R_\delta$  устойчиво.

Положение прямой 2 относительно осей координат зависит от величины сопротивления цепи возбуждения. В частности, с увеличением  $R_\delta$  угол наклона ее к оси абсцисс  $\alpha$  увеличивается. При некоторой величине сопротивления цепи возбуждения прямая  $U_x = I_\delta R_\delta$  становится касательной к характеристике холостого хода (прямая 3). В этом случае самовозбуждение генератора невозможно и соответствующую величину сопротивления называют критической ( $R_{\delta-кр}$ ).

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения (кривая 2 на рис. 9.15) менее жесткая, чем при независимом возбуждении (кривая 1), так как при увеличении тока на-

грузки происходит дополнительное уменьшение напряжения в связи с уменьшением тока возбуждения ( $\Delta U_n = 10 \div 30\%$ ).

По этой же причине с уменьшением сопротивления нагрузки  $R_n$  ток нагрузки  $I$  увеличивается до некоторой величины  $I_{\max}$ , а затем уменьшается и ток короткого замыкания  $I_k < I_{\max}$ . Тем не менее внезапное короткое замыкание опасно и для генератора параллельного возбуждения, так как магнитная цепь не успевает размагнититься и ток в якоре достигает опасного для машины значения  $I_k = (8 \div 12) I_{\text{ном}}$ .

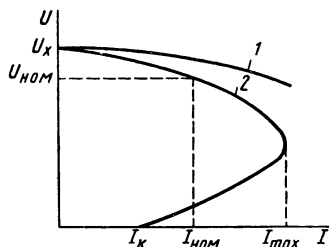


Рис. 9.15

**Генератор последовательного возбуждения.** При последовательном соединении обмотки возбуждения с обмоткой якоря (рис. 9.16, а) ток возбуждения равен току нагрузки ( $I_b = I$ ). Поэтому напряжение холостого хода при малой нагрузке невелико. С увеличением нагрузки увеличивается и ток возбуждения, следовательно, увеличиваются э.д.с. и напряжение на внешних зажимах генератора (см. внешнюю характеристику на рис. 9.16, б).

При токе нагрузки  $I = I_{\text{кр}}$  рост напряжения прекращается, а при дальнейшем увеличении нагрузки напряжение уменьшается. Такой характер внешней характеристики объясняется тем, что при магнитном насыщении машины прекращается рост основного магнитного потока, но не прекращается, а увеличивается падение напряжения в цепи якоря и действие реакции якоря.

Генераторы последовательного возбуждения в практике при-

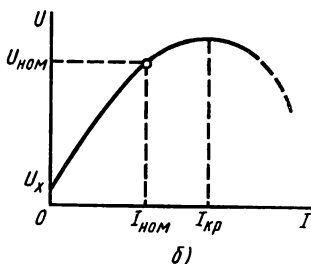
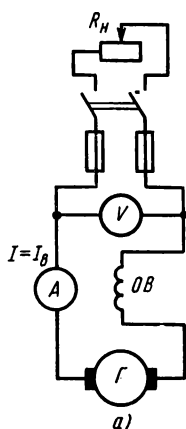


Рис. 9.16



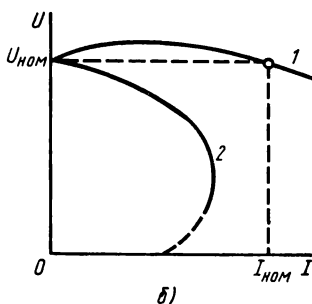
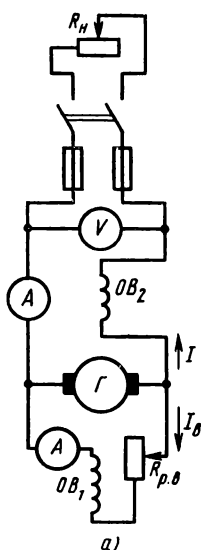


Рис. 9.17

меняют редко, учитывая большую зависимость напряжения от нагрузки.

**Генератор смешанного возбуждения.** Рабочий магнитный поток генератора при смешанном возбуждении создают две обмотки, одна из которых  $OB_1$ , соединена параллельно с обмоткой якоря, а другая  $OB_2$  последовательно (рис. 9.17, а).

Параллельная обмотка создает основную часть рабочего магнитного потока, последовательная подмагничивает машину, если включена согласно с параллельной.

В данном случае действие последовательной обмотки компенсирует размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в цепи якоря, поэтому напряжение на зажимах генератора с изменением нагрузки изменяется мало (внешняя характеристика 1 на рис. 9.17, б жесткая).

При встречном включении обмоток возбуждения их намагничивающие силы направлены противоположно, поэтому напряжение на зажимах генератора резко уменьшается с ростом тока нагрузки (внешняя характеристика 2).

#### Контрольные вопросы и задачи

1. На рис. 9.13 изображена характеристика холостого хода генератора постоянного тока (кривая 1). Как надо изменить масштабы величин по обеим осям координат, чтобы эта же кривая выражала характеристику намагничивания магнитной цепи машины?

2. Внешние характеристики генераторов независимого возбуждения и параллельного возбуждения показывают, что напряжение на зажимах машины уменьшается с ростом тока нагрузки. Почему относительное изменение напряжения увеличивается с ростом нагрузки в генераторах независимого возбуждения? параллельного возбуждения?

3. На рис. 9.15, 9.16, 9.17 показаны внешние характеристики четырех типов генераторов, отличающихся схемой возбуждения. Какая из этих характеристик наиболее предпочтительна: а) если от данного генератора получают питание силовые потребители, требующие постоянства напряжения? б) если генератор предназначен для питания сварочного агрегата?

4. В § 9.1 дано определение регулировочной характеристики генератора постоянного тока. Из него следует, что такая характеристика показывает, как надо изменять ток возбуждения, чтобы при изменении нагрузки напряжение на зажимах генератора не отклонялось от номинальной величины. Какой вид имеет график регулировочной характеристики генератора независимого возбуждения?

5. При попытке провести испытание генератора параллельного возбуждения оказалось, что он не возбуждается. Какие возможны причины отсутствия возбуждения?

**Задача 9.5.** Генератор независимого возбуждения с сопротивлением цепи якоря  $R_a = 0,4$  Ом при холостом ходе и частоте вращения ротора  $n_x = 740$  об/мин имеет напряжение  $U_x = 230$  В. Частота вращения ротора уменьшилась до  $n_1 = 725$  об/мин при включении нагрузки, когда установился ток  $I_1 = 60$  А. Найти новую величину напряжения на зажимах генератора, пренебрегая изменением магнитного потока.

Определить мощность генератора и его к.п.д. при нагрузках  $I_1 = 60$  А и  $I_2 = 40$  А, если при изменении нагрузки частота вращения якоря поддерживается постоянной, равной  $n_1$ . Изменением магнитного потока пренебречь.

**Задача 9.6.** Напряжение на зажимах генератора параллельного возбуждения  $U = 220$  В, сопротивление нагрузки  $R_n = 40$  Ом. Определить э.д.с. и ток якоря, если сопротивление цепи якоря  $R_a = 0,25$  Ом, сопротивление цепи возбуждения  $R_b = 44$  Ом. Определить мощность нагрузки и к.п.д. генератора, при нагрузках  $I_n = 60$  А и  $I_n = 40$  А, полагая, что э.д.с. при изменении нагрузки остается без изменения.

## § 9.4. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электродвигатели постоянного тока различают, как и генераторы, в зависимости от схемы возбуждения. Аналогия в данном случае обусловлена обратимостью электрических машин.

Рабочие характеристики и эксплуатационные свойства электродвигателей существенно различны, поэтому далее они рассмотрены отдельно для каждого типа двигателя, но вначале даны общие сведения, которые относятся ко всем типам электродвигателей постоянного тока.

**Общие сведения.** Энергия, которую электродвигатель получа-

ет в рабочем режиме из сети, в основном поступает в цепь якоря и лишь небольшая часть ее направляется в цепь возбуждения.

Это отражено на энергетической диаграмме двигателя постоянного тока рис. 9.18, где  $P = UI$  — электрическая мощность на входе двигателя,  $P_v = I_v^2 R_v = UI_v$  — мощность цепи возбуждения,  $P_{\text{я}} = P_1 - P_v$  — мощность цепи якоря.

Некоторую часть ее составляет мощность потерь в цепи якоря  $\Delta P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$ , а большая часть представляет электромагнитную мощность, которая выражает скорость преобразования электрической энергии в механическую:  $P_{\text{эм}} = P_{\text{мх}} = EI_{\text{я}}$ , что подробнее рассмотрено в § 9.2.

Величина полезной механической мощности  $P_2$  на валу двигателя получается за вычетом из  $P_{\text{мх}}$  мощности магнитных потерь  $P_c$  в сердечнике якоря и мощности механических потерь  $\Delta P_{\text{мх}}$  (от трения в подшипниках, щеток о коллектор, вращающихся частей о воздух).

Отношение полезной механической мощности  $P_2$  к электрической мощности на зажимах  $P_1$  выражает коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta = P_2 / P_1. \quad (9.5)$$

Вращающий момент электродвигателя постоянного тока выражает формула (9.2), которая показывает, что величина и направление момента зависят от величины и направления магнитного потока полюсов и тока в обмотке якоря  $M_{\text{эм}} = C_M \Phi I_{\text{я}}$ . Изменив направление одной из этих величин, можно изменить знак момента и, следовательно, изменить направление вращения ротора электродвигателя. Из формул (9.1), (9.2) получим для вращающего момента следующее выражение:

$$M_{\text{эм}} = \frac{C_M EI_{\text{я}}}{C_E n} = \frac{30 EI_{\text{я}}}{\pi n} = 9,55 P_{\text{эм}}. \quad (9.6)$$

На основе формул (9.1) и (9.3) нетрудно получить выражение для частоты вращения ротора

$$n = E / C_E \Phi = (U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}) / C_E \Phi, \quad (9.7)$$

подставив в него величину тока из формулы (9.4), получим выражение, связывающее частоту вращения и электромагнитный момент двигателя:

$$n = U / C_E \Phi = M_{\text{эм}} I_{\text{я}} / (C_E C_M \Phi^2). \quad (9.8)$$

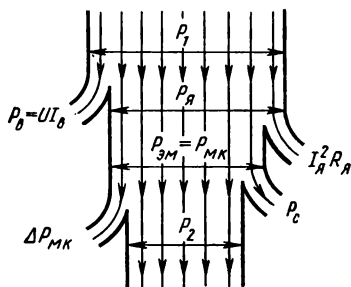


Рис. 9.18

Предположим, что напряжение на зажимах электродвигателя и сопротивление цепи якоря неизменны, тогда ток в якоре зависит от величины противо-э.д.с., которая пропорциональна частоте вращения ротора. Из формулы (9.7) следует

$$I_{\text{я}} = (U - C_E \Phi n) / R_{\text{я}}. \quad (9.9)$$

**Двигатель параллельного возбуждения.** Отличительная особенность этого типа двигателя состоит в том, что обмотка возбуждения включена параллельно с обмоткой якоря (рис. 9.19, а).

Для оценки эксплуатационных свойств двигателя большое значение имеют рабочие характеристики: зависимость частоты вращения, вращающего момента от мощности на валу двигателя  $n = f(P_2)$  и  $M = f(P_2)$  при  $U = \text{const}$  и  $I_{\text{я}} = \text{const}$  (рис. 9.19, б).

Первую из этих зависимостей, которую называют *с к о р о с т н о й х а р а к т е р и с т и к о й*, можно анализировать по формуле (9.7). С увеличением нагрузки на валу (с ростом  $P_2$ ) увеличиваются ток в якоре и падение напряжения в цепи якоря  $I_{\text{я}} R_{\text{я}}$ . Поэтому при  $U = \text{const}$  числитель в этой формуле уменьшается. При этом несколько уменьшается и знаменатель  $\Phi$  вследствие реакции якоря. Однако размагничивающее действие реакции якоря в данном случае сказывается слабее, в результате частота вращения с ростом нагрузки на валу двигателя уменьшается. Полное изменение частоты вращения при изменении внешней нагрузки на валу от номинальной величины до нуля (холостой ход) оценивают относительной величиной, выраженной в процентах:  $\Delta n \% = (n_x / n_{\text{ном}} - 1) 100$ .

Номинальное изменение частоты вращения для двигателей параллельного возбуждения составляет 2—8 %. Вращающий момент с мощностью на валу связан формулой (9.6), которая при  $n = \text{const}$  графически выражается прямой линией. Однако частота вращения, как ранее показана, с ростом нагрузки уменьшается, поэтому зависимость  $M = f(P_2)$  отклоняется от прямой. Формула (9.8) связывает частоту вращения  $n$  с вращающим момен-

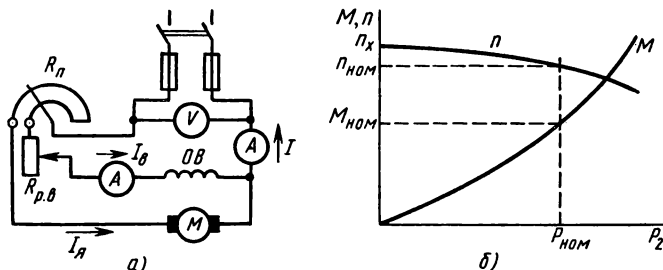


Рис. 9.19

том  $M$  и является математическим выражением механической характеристики двигателя  $n=f(M)$ .

Если ток возбуждения поддерживать неизменным ( $I_{\text{в}} = \text{const}$ ) и не учитывать действие реакции якоря, то магнитный поток  $\Phi$  можно считать постоянным ( $\Phi = \text{const}$ ). При этих условиях механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения прямолинейна (см. рис. 9.21, прямые 1, 2), причем с ростом момента частота вращения уменьшается. Наклон механической характеристики к оси абсцисс зависит от величины сопротивления цепи якоря, что также следует из формулы (9.8). При отсутствии в цепи якоря добавочного сопротивления  $R_{\text{д}}$  механическую характеристику двигателя называют естественной (прямая 1). В случае введения в цепь якоря добавочного сопротивления общее сопротивление цепи якоря ( $R_{\text{я}} + R_{\text{д}}$ ) увеличивается и наклон механической характеристики (теперь уже искусственной) увеличивается (прямая 2).

Естественные характеристики двигателя параллельного возбуждения относятся к типу жестких. С увеличением сопротивления в цепи якоря жесткость характеристик уменьшается.

**Двигатели последовательного и смешанного возбуждения.** При последовательном соединении обмотки возбуждения с обмоткой якоря схема электродвигателя показана на рис. 9.20, а. В этом случае ток возбуждения равен току якоря ( $I_{\text{в}} = I_{\text{я}}$ ), поэтому величина магнитного потока полюсов связана непосредственно с током нагрузки  $I$ .

Если магнитная система машины не насыщена, то величина магнитного потока полюсов пропорциональна току нагрузки  $\Phi = kI_{\text{я}}$ , где  $k$  — коэффициент пропорциональности, соответствующий прямолинейной части характеристики намагничивания магнитной цепи машины.

Следовательно, при малых нагрузках ( $I_{\text{я}}$  — мал) электромагнитный момент пропорционален квадрату тока нагрузки [см. формулу (9.2)]:  $M = C_M \Phi I_{\text{я}} = C_M k I_{\text{я}}^2 = C'_M I_{\text{я}}^2$ , а формула (9.7) показы-

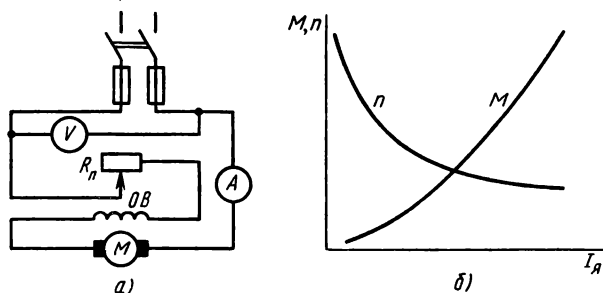


Рис. 9.20

вает, что частота вращения обратно пропорциональна току нагрузки:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_E k I_{\text{я}}} = \frac{1}{C'_E} \left( \frac{U}{I_{\text{я}}} - R_{\text{я}} \right).$$

На рис. 9.20, б изображены рабочие характеристики  $M = f(I_{\text{я}})$  и  $n = f(I_{\text{я}})$ , а на рис. 9.21 — механические характеристики двигателя последовательного возбуждения (кривые 3, 4). Рассматривая их, можно отметить следующие особенности двигателей последовательного возбуждения. Частота вращения ротора сильно зависит от нагрузки, особенно в области малых нагрузок при уменьшении тока частота вращения резко растет. При пуске ток в якоре большой, поэтому двигатель развивает большой пусковой момент. При больших нагрузках магнитная система насыщена, т.е. магнитный поток мало зависит от тока в якоре, поэтому рабочие и механические характеристики в этой области почти прямолинейны. При увеличении нагрузки мощность на входе двигателя растет медленнее, чем его вращающий момент, так как одновременно с ростом момента значительно уменьшается частота вращения.

Магнитный поток электродвигателя смешанного возбуждения создают две обмотки: одна  $OB_1$  соединена параллельно с обмоткой якоря (рис. 9.22), а другая  $OB_2$  — последовательно.

В магнитном отношении эти обмотки обычно включают согласно, поэтому рабочие свойства электродвигателя при смешан-

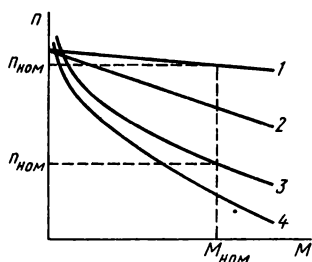


Рис. 9.21

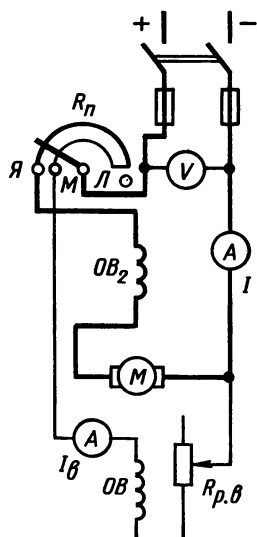


Рис. 9.22

ном возбуждении в сравнении с двигателями параллельного и последовательного возбуждения занимают промежуточное положение.

Механические характеристики, в частности, более мягкие, чем у двигателя параллельного возбуждения, и более жесткие, чем у двигателя последовательного возбуждения. При холостом ходе частота вращения ограничена величиной  $n_x$ , которая соответствует магнитному потоку, созданному параллельной обмоткой возбуждения.

**Пуск в ход двигателей постоянного тока.** Из формулы (9.9) видно, что наибольшего значения ток в якоре достигает при  $n=0$ , т. е. при неподвижном роторе, в частности в начальный момент пуска двигателя в ход.

При непосредственном включении двигателя в сеть на номинальное напряжение его пусковой ток  $I_n = U/R_a$  оказывается в 10—15 раз больше номинального, так как величина сопротивления относительно мала.

Такой большой пусковой ток может вызвать опасные последствия: резкий (ударного типа) толчок в приводе в начале пуска, при котором не исключены механические повреждения и даже разрушения движущихся частей в самом двигателе, в рабочей машине и связывающей их механической передаче; резкое снижение напряжения в сети, что нарушает нормальную работу других электроприемников, включенных в эту сеть; круговой огонь на коллекторе двигателя при пуске его в ход. По этим причинам допускают прямое включение в сеть только для двигателей малой мощности (до 0,5 кВт), а для пуска двигателей большей мощности применяют пусковые реостаты ( $R_n$  на рис. 9.19, а; 9.20, а; 9.22), которые включают последовательно в цепь якоря, чем ограничивают величину пускового тока в допустимых пределах.

Схема пускового реостата (одного из нескольких типов, применяемых в практике) показана на рис. 9.23, где полное сопротивление состоит из четырех секций. Контактную систему реостата составляют: холостой контакт 0, рабочий контакт 5, четыре промежуточных контакта (1, 2, 3, 4), рычаг 7, который электрически соединен с медной дугой 6 и в зависимости от его положения с одним из контактов.

Прежде чем замкнуть сетевой рубильник, необходимо проверить состояние регулировочного реостата  $R_{p.v}$  в цепи возбуждения и пускового реостата  $R_n$  в цепи якоря. Регулировочный реостат надо установить в такое положение, при котором его сопротивление наименьшее ( $R_{p.v}=0$ ). Рычаг 6 пускового реостата надо установить на холостой контакт 0 и только после этого можно замкнуть сетевой рубильник. После включения рубильника рычаг 6 пускового реостата переводят на первый промежуточный кон-

такт 1. В результате этой операции в цепь возбуждения подается полное напряжение, а в цепь якоря включается полное сопротивление пускового реостата —  $R_{п\max}$ , которое подобрано так, чтобы пусковой ток превышал величину тока якоря, но не более чем в 2—3 раза.

С ростом частоты вращения против-э.д.с. обмотки якоря увеличивается, а ток уменьшается. Когда ток уменьшится до некоторой заранее установленной величины, и для того, чтобы не затягивать процесс пуска двигателя, сопротивление пускового реостата следует уменьшить, переведя рычаг 6 на промежуточный контакт 2. Далее в таком же порядке рычаг 6 переводится на последующие промежуточные контакты и в конце пуска устанавливается на рабочем контакте 5 ( $R_{п}=0$ ).

**Регулирование скорости.** Выражение (9.7) раскрывает возможности регулирования частоты вращения ротора двигателей постоянного тока.

Для этого можно изменять напряжение на входных зажимах двигателя или магнитный поток полюсов. Регулирование магнитного потока в двигателях параллельного и смешанного возбуждения достигается проще всего путем изменения тока возбуждения, для чего в цепь параллельной обмотки возбуждения включают последовательно регулировочный реостат  $R_{р.в.}$

В двигателях последовательного возбуждения для этой цели применяют секционирование обмотки возбуждения или включение параллельно ей регулировочного реостата  $R_{р.в.}$

При уменьшении тока возбуждения частота вращения ротора увеличивается, причем увеличивается неограниченно, если ток возбуждения и магнитный поток уменьшать до нуля ( $I_{в}=0$  или  $\Phi=0$ ).

В последнем случае, особенно при обрыве цепи возбуждения, не исключена возможность механического повреждения двигателя (разнос двигателя).

#### *Контрольные вопросы и задачи*

1. На сетевом рубильнике поменяли местами зажимы двух проводов, соединяющих рубильник с двигателем постоянного тока. Изменится ли направление вращения ротора после такого переключения, если двигатель параллельного возбуждения? двигатель независимого возбуждения?

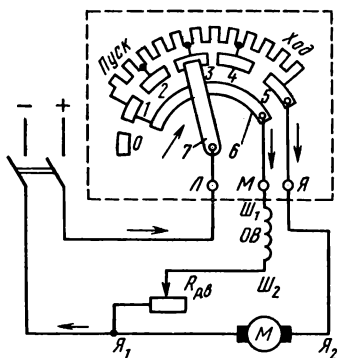


Рис. 9.23



2. Для соединения электродвигателя с рабочей машиной применяют различные механические передачи (зубчатый редуктор, ременная передача и т. д.). Почему не применяют ременную передачу для соединения рабочей машины с двигателем последовательного возбуждения?

3. Механические характеристики двигателей последовательного возбуждения лучше других удовлетворяют требованиям приводов транспортных и грузоподъемных машин. Какие особенности механической характеристики дают основания для применения двигателей последовательного возбуждения в качестве тяговых двигателей?

4. Почему перед пуском в ход двигателя параллельного возбуждения регулировочный реостат в цепи возбуждения устанавливают в положение, при котором его сопротивление равно нулю?

5. Как изменится частота вращения ротора двигателя, если изменить положение регулировочного реостата в цепи возбуждения: движок переместить вниз в схеме рис. 9.19, а; движок переместить вправо в схеме рис. 9.23?

**Задача 9.7.** На входе электродвигателя параллельного возбуждения  $U = 110$  В, ток  $I = 55,5$  А. Простая петлевая обмотка якоря имеет число проводников  $N = 300$ , сопротивление в рабочем режиме  $R_{\text{я}} = 0,1$  Ом. Число пар полюсов  $p = 1$ , магнитный поток полюса  $\Phi = 2 \cdot 10^{-2}$  Вб, ток возбуждения  $I_{\text{в}} = 5,5$  А, к.п.д. двигателя  $\eta = 0,82$ .

Определить частоту вращения якоря двигателя и его вращающий момент, пренебрегая реакцией якоря. Определить также частоту вращения якоря при токе в якоре  $R_{\text{я}} = 100$  А и сопротивление пускового реостата в цепи якоря  $R_{\text{пуск}} = 0,9$  Ом (реостат не выведен полностью); пусковой ток двигателя при отсутствии пускового реостата.

**Задача 9.8.** На входе двигателя последовательного возбуждения напряжения  $U = 110$  В, ток  $I = 10$  А. Частота вращения якоря  $n = 1700$  об/мин, момент на валу  $M = 4,1$  Н·м. Внутреннее сопротивление двигателя (входное на зажимах)  $R_{\text{вх}} = 2$  Ом. Определить э.д.с., электромагнитную мощность якоря, к.п.д. двигателя. Определить также частоту вращения якоря, мощность на валу и к.п.д., если при том же моменте на валу напряжение на зажимах снижено до  $U = 100$  В.

## ГЛАВА 10

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ

Средства механизации и автоматизации широко применяют-ся во всех отраслях народного хозяйства.

Дальнейшее развитие техники и технологии различных производств пойдет по линии ускоренного технического перевооружения с целью внедрения комплексной механизации и автоматизации производственных процессов с применением оборудования, машин, приборов с программным управлением, в том числе промышленных роботов; создания и внедрения гибких переналажи-

ваемых технологических комплексов, автоматизированных с помощью микропроцессоров и микроЭВМ.

Автоматизация производственных процессов облегчает условия работы людей, повышает производительность труда, надежность работы производственных машин и механизмов, улучшает качество продукции, уменьшает расход материалов и энергии.

Различают следующие системы автоматики: автоматический контроль (измерение), автоматическое управление, автоматическое регулирование. Подробное изучение систем автоматики не входит в задачи данного курса, поэтому далее приведены лишь некоторые сведения о них, а более подробно рассмотрены электрические и магнитные элементы автоматики, т. е. элементы, принципы действия которых основаны на использовании электрических и магнитных явлений.

### § 10.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕМЕНТАХ И СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ

В полном перечне элементов автоматики электрические и магнитные элементы наиболее многочисленны, но кроме них применяются электронные, оптические, механические, гидравлические, пневматические и другие элементы.

Для того чтобы выяснить назначение элементов автоматики, рассмотрим примеры простейших автоматических устройств.

**Автоматический контроль.** На рис. 10.1 показана схема дистанционного автоматического контроля уровня жидкости в резервуаре 1. С изменением уровня жидкости изменяется положение поплавка и связанного с ним подвижного контакта реостата 4. Вместе с этим изменяется отношение сопротивлений и токов в цепях катушек электромагнитного логометра 2, у которого положение стрелки на шкале зависит от отношения токов (см. § 6.4), а оно от уровня жидкости в резервуаре. Следовательно,

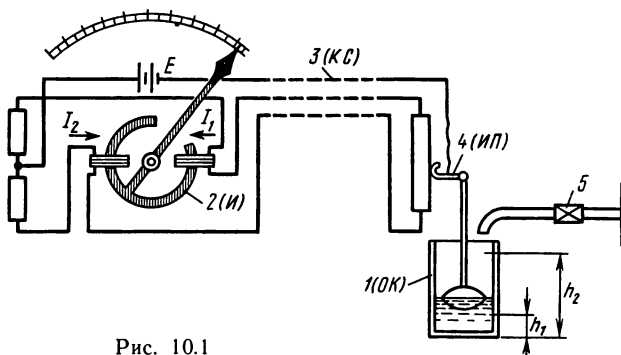


Рис. 10.1

шкалу измерителя можно градуировать непосредственно в единицах уровня или объема жидкости и при наличии линии связи 3 контролировать эти величины на некотором удалении от объекта контроля.

Измерительный преобразователь (в рассмотренном примере — поплавок и реостат с подвижным контактом) воспринимает измеряемую величину и изменение ее преобразует в изменение сопротивления и тока в цепях катушек логометра. В связи с теми функциями, которые выполняют измерительные преобразователи, их еще называют чувствительными элементами или датчиками.

Измеряемая величина от чувствительного элемента к измерителю передается по каналу связи, который в данном случае является промежуточным элементом системы. Каких-либо еще промежуточных элементов здесь нет, но в других случаях могут оказаться необходимыми усилительные элементы, шифраторы, дешифраторы и др.

В данном примере измеряемая величина поступает в измеритель не непосредственно, а как бы зашифрованной в виде отношения токов в катушках логометра. Измеритель здесь выполняет функцию дешифратора, поскольку заранее известная зависимость измеряемой величины от отношения токов позволяет градуировать шкалу в единицах измеряемой величины.

Измеритель непрерывно показывает измеряемую величину, т. е. выполняет конечную функцию всего устройства и в этом смысле является исполнительным элементом данной автоматической системы.

В рассмотренном примере контролируемую величину воспроизводит стрелочный указатель, однако вместо него или вместе с ним можно применить другое воспроизводящее устройство, которое записывает контролируемую величину или сигнализирует о выходе ее за пределы допустимых значений.

В этих случаях функция управления отсутствует. Однако в некоторых устройствах автоматического контроля последний (выходной) орган маркирует или сортирует промышленные изделия.

Систему автоматического контроля в общем случае можно представить в виде структурной схемы (рис. 10.2, а), где отмечены: *ОК* — объект контроля; *ИП* — измерительный преобразователь; *КС* — канал связи; *УО* — управляющий орган; *ВО* — воспроизводящий орган.

Конечные элементы *ВО* или *УО* на объект контроля никакого обратного воздействия не оказывают, т. е. система автоматического контроля разомкнута.

**Автоматическое управление и регулирование.** В разомкнутой

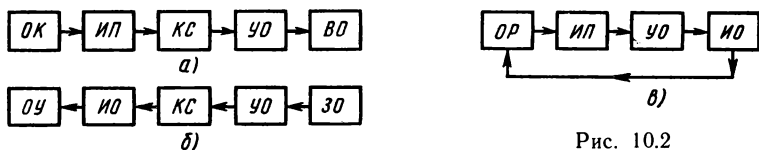


Рис. 10.2

системе управления (рис. 10.2, б) функция контроля отсутствует. На управляющий орган *УО* воздействует оператор или сигнал через задающий орган *ЗО* поступает от другой системы автоматики. Задание оператора может быть введено в соответствии с ранее подготовленной программой, например включить или выключить электродвигатель, закрыть или открыть задвижку в водопроводе или газопроводе и т. д.

Управляющий сигнал через канал связи поступает на исполнительный орган *ИО* (если не требуются предварительная расшифровка и усиление сигнала), который воздействует на объект управления *ОУ*.

Если управление осуществляется в зависимости от величины того или иного параметра, то этот параметр надо измерять.

Для примера рассмотрим в качестве объекта управления тот же резервуар с жидкостью, при условии, что уровень ее не должен выходить за пределы верхней  $h_2$  и нижней  $h_1$  отметок. Оператор должен наблюдать за показаниями измерителя уровня и при обусловленных уровнях направлять команду на закрытие или открытие крана 5 (см. рис. 10.1).

Утомительную обязанность оператора по наблюдению и регулированию уровня можно возложить на автоматическое устройство, которое имеет структурную схему рис. 10.2, в. Измерительный преобразователь *ИП* измеряет регулируемую величину (в данном случае уровень жидкости в резервуаре) и преобразует ее в величину другого вида, более удобную для воздействия на управляющий орган *УО*.

Управляющий орган воспринимает это воздействие и срабатывает при достижении одного из заданных значений регулируемой величины, т. е. дает команду на работу исполнительного органа *ИО*, который, в свою очередь, воздействует нужным образом на объект регулирования *ОР*.

Разновидностью подобной системы автоматического управления является автоматическая защита, назначение которой — прервать процесс при возникновении того или иного предельного режима.

Если разность между верхним и нижним пределами регулируемой величины (в примере с регулятором уровня жидкости  $\Delta h = h_2 - h_1$ ) сокращать, то можно представить себе систему, кото-

рая поддерживает с определенной точностью одно заданное значение регулируемой величины (уровня жидкости, скорости вращения вала или других величин).

Рассмотренная автоматическая система объединяет в себе функции контроля и управления, в ней осуществляется замкнутая цепь воздействий: объект управления — измерительный преобразователь — управляющий орган — исполнительный орган, который воздействует снова на объект управления.

Такую замкнутую систему автоматического управления называют системой автоматического регулирования.

К системе автоматического управления относятся также: система программного управления, в которой все операции управления выполняются по заранее заданной программе; следящая система, воспроизводящая на выходе с определенной точностью входное задающее воздействие, изменяющееся по заранее неизвестному закону.

Краткое рассмотрение примеров автоматических систем позволяет отметить, что они состоят из отдельных взаимосвязанных элементов, которые по назначению можно делить на три группы: чувствительные, исполнительные, промежуточные.

#### *Контрольные вопросы*

1. В технологической цепочке по производству шарикоподшипников установлен автомат для отбраковки шариков. К какой из трех автоматических систем можно отнести это устройство?

2. Почему в структурной схеме рис. 10.2, *а* не обозначен исполнительный орган *ИО*? Какой элемент этой схемы аналогичен ему по своим функциям?

3. Почему в структурной схеме рис. 10.2, *б* нет измерительного преобразователя? Какой элемент этой схемы аналогичен ему по своим функциям?

4. Система автоматического регулирования выполняет функции контроля и управления. Как это отражено в структурной схеме рис. 10.2, *в*?

5. В чем сходство и различие следящей системы и системы программного управления?

### **§ 10.2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

Основной характеристикой измерительного преобразователя является зависимость выходной величины  $y$  от контролируемой или регулируемой величины  $x$  на его входе, т. е.  $y=f(x)$ .

В большинстве случаев контролируемые входные величины измерительных преобразователей неэлектрические (механические, тепловые, оптические и др.).

Принципы действия и устройство измерительных преобразо-

вателей весьма разнообразны, но по характеру выходной величины их делят только на два типа: параметрические, генераторные.

Измерительный преобразователь называют *параметрическим*, если он изменение контролируемой неэлектрической величины преобразует в изменение электрической величины, являющейся параметром электрических цепей, т. е. в изменение сопротивления  $R$ , индуктивности  $L$  или емкости  $C$ . Соответственно параметрический преобразователь называют *резистивным*, *индуктивным* или *емкостным*.

**Резистивные преобразователи.** К этой группе относятся контактные, реостатные, тензометрические преобразователи, а также терморезисторы.

*Контактный* преобразователь в наиболее простом исполнении показан на рис. 10.3, а. Он состоит из подвижного измерительного штифта 1 и контактов 2, 3, 4, один из которых (3) прикреплен к штифту и перемещается вместе с ним.

В данном случае механическое перемещение штока преобразуется в электрический сигнал, обусловленный замыканием или размыканием контактов. При этом выходная величина преобразователя — сопротивление между контактами изменяется в пределах от бесконечности практически до нуля. Подобные преобразователи применяют, например, для контроля размеров деталей, в сортировочных автоматах. На рис. 10.3, а показана одна из возможных схем для сортировки деталей по размерам. Если размер детали 5 находится в пределах допустимых отклонений, то оба контакта разомкнуты, неоновые лампы не зажигаются, что означает годность детали. Когда под штифт попадает деталь, размер которой выходит за пределы допуска в ту или другую сторону (отклонение  $\geq \pm \Delta l$ ), чему соответствует расстояние

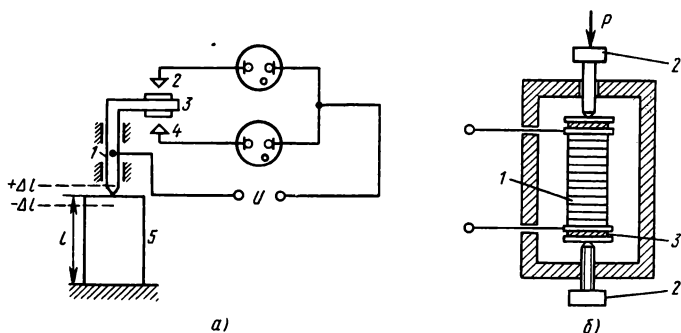


Рис. 10.3

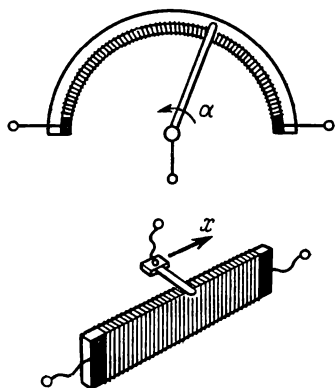


Рис. 10.4

между подвижным и неподвижными контактами, то одна из ламп загорается и сигнализирует о браке детали.

На рис. 10.3, б показан контактный преобразователь другого типа — столбик 1 из угольных шайб, зажатый винтами 2 между латунными дисками, изолированными от винтов слюдяными прокладками 3. От дисков сделаны отводы в измерительную цепь.

Электрическое сопротивление столбика складывается в основном из сопротивлений в контактах между шайбами, поэтому зависит от степени сжатия. По изменению электрического сопротивления столбика из угольных шайб определяют механическую силу  $F$ , давление  $P$ .

*Реостатный преобразователь* (рис. 10.4) по принципу действия подобен обычному реостату с движком, но отличается малыми размерами, тщательным и точным исполнением. Размеры его тем меньше, чем меньше мощность объекта, с которым он связан.

Чувствительным органом преобразователя является тонкий провод из сплавов высокого сопротивления (манганин, константан и т. д.), равномерно намотанный на каркас из изоляционного материала (пластмасса, керамика и др.). Движок (щетку) изготовляют из фосфористой бронзы, а в ответственных случаях — сплавов платины с иридием или бериллием.

Входная величина — угловое  $\alpha$  или линейное  $x$  перемещение — передается движку, с изменением положения которого изменяется выходная величина — сопротивление реостата.

Реостатные преобразователи применяют для измерения углов поворота, дистанционной передачи показаний различных приборов, измерения уровня жидкости (см. рис. 10.1), перемещения деталей, усилий, давления и других величин, которые можно преобразовать в перемещение.

*Тензометрические преобразователи* (тензорезисторы) основаны на явлении изменения сопротивления проводников и полупроводников при их растяжении или сжатии. Их применяют для измерения деформаций, давления, малых перемещений, вибраций и т. п. Для изготовления чувствительных элементов тензорезисторов используют тонкую проволоку или фольгу из сплавов высокого сопротивления (константана, никрома и др.), тензочув-

ствительные пленки, полупроводниковые кристаллические материалы.

На рис. 10.5, *а — в* показаны тензорезисторы из проволоки, фольги, полупроводниковой полоски. Для измерения деформаций тензорезистор приклеивают к поверхности исследуемой детали, которая подвергается в работе действию растягивающих или сжимающих усилий. При этом вместе с изменением размера детали изменяются длина и поперечное сечение проволоки или фольги и соответственно изменяется электрическое сопротивление (выходная величина) тензорезистора, который включен в измерительную схему, например мостовую.

У тензорезисторов из фольги по сравнению с проволоочными лучшая восприимчивость деформаций, что обеспечивает более высокую точность измерений. Тензорезистор, изображенный на рис. 10.5, *б*, имеет витки 2, чувствительные к растягивающим усилиям, и витки 1, воспринимающие сжимающие усилия, он наклеивается на мембрану и служит для измерения давления.

Чувствительность полупроводникового элемента по сравнению с неполупроводниковым значительно выше, причем сопротивление его изменяется в основном за счет изменения удельного сопротивления.

*Терморезисторы* — чувствительные элементы, электрическое сопротивление которых зависит от температуры. Их изготавливают из металлов с относительно большим температурным коэффициентом сопротивления  $\alpha$ , практически постоянным в рабочем диапазоне температур (меди от  $-50$  до  $150$  °С, платины от  $-200$  до  $600$  °С), из полупроводниковых материалов: окислов марганца, меди, кобальта, титана и др. Сопоставление свойств данного типа измерительных преобразователей показывает преимущества металлических терморезисторов: линейная зависимость сопротив-

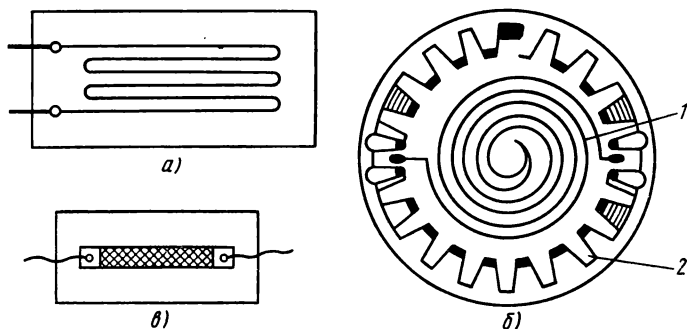


Рис. 10.5



ления от температуры [см. формулу (2.8)] в рабочем диапазоне температур, более широком, чем у полупроводниковых терморезисторов; возможность изготовления отдельных экземпляров терморезисторов с одинаковыми и стабильными параметрами, чем обеспечивается их взаимозаменяемость.

Полупроводниковые терморезисторы в сравнении с металлическими имеют следующие преимущества: в несколько раз большую чувствительность, значительно меньшую тепловую инерционность, высокое внутреннее сопротивление, что дает возможность при эксплуатации не учитывать сопротивление соединительных проводов.

Терморезисторы применяют для измерения температур, скорости газового потока, давления и глубокого вакуума и других величин, зависящих от изменения теплопроводности среды.

Для измерения температуры применяют термометры сопротивления, у которых чувствительными элементами являются металлические (проволочные) терморезисторы (проволочка намотана на каркас из пластмассы или слюды в защитном кожухе).

Измерительный преобразователь  $R_T$  входит в мостовую неуравновешенную схему в качестве одного плеча (рис. 10.6), три других плеча составлены из резисторов с постоянными сопротивлениями  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ . В одну диагональ включен источник питания, в другую — катушки логометра  $R_{K1}$  и  $R_{K2}$ , общая точка которых соединена с отрицательным полюсом источника через резистор  $R_4$ .

С изменением температуры контролируемого объекта сопротивление  $R_T$  терморезистора изменяется, поэтому меняются и токи в катушках логометра, что приводит к соответствующему отклонению стрелки измерителя, шкала которого градуирована в единицах температуры. Вольт-амперные характеристики терморезисторов нелинейные. На этом основано применение их в схемах стабилизаторов и индикаторов напряжения, тепловых бесконтактных реле.

**Индуктивные преобразователи.** Для создания индуктивных преобразователей, работающих на переменном токе, используют зависимость индуктивности электромагнитных элементов от формы, геометрических размеров, магнитного состояния их магнитной цепи, взаимного расположения и схемы включения обмоток. Для примера далее рассмотрены некоторые схемы индуктивных преобразователей.

В преобразователе по схеме рис. 10.7, а при изменении длины воздушного зазора  $\delta$  между сердечником и подвижным якорем изменяется магнитное сопротивление магнитопровода, следовательно, изменяется индуктивность и индуктивное сопротивление

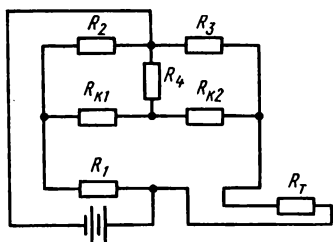


Рис. 10.6

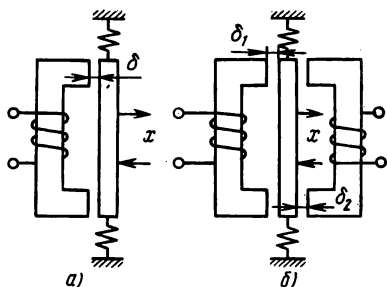


Рис. 10.7

обмотки. Поэтому ток в обмотке, включенной в электрическую цепь, зависит от величины зазора  $\delta$ .

Функциональная зависимость тока от измеряемой неэлектрической величины (силы, давления, линейного перемещения и др.) устанавливается, если под ее непосредственным или косвенным действием изменяется величина зазора  $\delta$  или площадь полюсов. Значительно более высокую чувствительность имеет дифференциальный преобразователь (рис. 10.7, б), так как при отклонении якоря в данном случае индуктивность одной обмотки увеличивается, а другой уменьшается. Обмотки дифференциального преобразователя обычно включают в мостовую схему так, что они действуют согласно на изменение выходного тока.

Индуктивность катушки, как известно, зависит от магнитной проницаемости материалов сердечника [см. формулу (3.10)], которая у некоторых ферромагнитных материалов меняется при упругих деформациях. На этом основано действие магнитоупругих индуктивных преобразователей, которые применяют для измерения больших усилий.

**Емкостные преобразователи.** Зависимость электрической емкости конденсатора от его размеров, взаимного расположения обкладок и диэлектрической проницаемости диэлектрика [см. формулу (1.9)] находится в основе действия емкостных измерительных преобразователей. Для измерения линейных перемещений, углов поворота, а также величин, действие которых можно направить на изменение расстояния между пластинами или активной площади пластин (усилие, давление, момент и т. д.), применяют емкостные преобразователи — простой и дифференциальный (рис. 10.8, а, б).

Емкостный преобразователь с переменной площадью  $S$  пластины, показанный на рис. 10.8, в, представляет собой воздушный конденсатор, у которого одна часть пластин неподвижна, а дру-

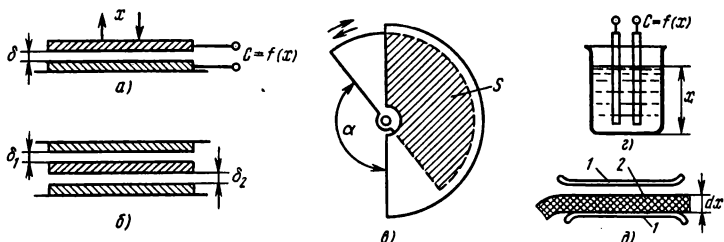


Рис. 10.8

гую можно поворачивать на некоторый угол  $\alpha$ . При этом емкость изменяется пропорционально углу поворота, который изменяется под действием некоторой измеряемой величины.

Для измерения уровня жидкостей, влажности веществ, толщины изделий из диэлектриков и т. д. применяют емкостные преобразователи с использованием зависимости емкости от диэлектрической проницаемости. Рис. 10.8, *г* поясняет принцип действия уровнемера: в контролируемый сосуд опущены электроды, емкость между которыми зависит от уровня  $x$  жидкости в сосуде, так как с изменением уровня изменяется диэлектрическая проницаемость среды между электродами. На рис. 10.8, *д* показан преобразователь для измерения толщины ленты из диэлектрика. С изменением толщины  $dx$  ленты 2 изменяются воздушный зазор и емкость между пластинами 1 конденсатора.

#### Контрольные вопросы

1. Какая лампа на схеме рис. 10.3, *а* сигнализирует о том, что размер детали больше допустимого? меньше допустимого?
2. Какую роль играет чувствительность измерительного преобразователя в оценке качества его работы?
3. Почему индуктивные измерительные преобразователи не используются в работе на постоянном токе?
4. Как изменяется величины магнитного сопротивления магнитопровода и индуктивного сопротивления обмотки измерительного преобразователя (см. рис. 10.7, *а*), при увеличении воздушного зазора?
5. В какую сторону изменяется емкость измерительного преобразователя (см. рис. 10.8, *д*) при увеличении и уменьшении толщины контролируемой ленты?

### § 10.3. ГЕНЕРАТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Измерительный преобразователь называют генераторным, если выходной величиной является э.д.с. или электрический заряд. В эту группу входят преобразователи индукционные, термоэлектрические, пьезоэлектрические.

**Индукционные преобразователи.** В практике применяют несколько типов индукционных преобразователей. Особенность одного из них состоит в том, что действие контролируемой неэлектрической величины направлено на изменение взаимоиндуктивности двух обмоток. Одна из них (первичная) включена к источнику переменного напряжения, во вторичной (выходной) обмотке наводится э.д.с., величина которой изменяется при изменении взаимоиндуктивности, т. е. при изменении потокоцепления вторичной обмотки. Изменение взаимоиндуктивности связано с изменением воздушного зазора, площади полюсов, магнитоупругих свойств сердечника или положения вторичной обмотки, если она подвижная.

На рис. 10.9, а показана схема дифференциального индукционного преобразователя с переменным воздушным зазором. Особенность его состоит в том, что одинаковые секции первичной обмотки  $N_1$  включены согласно, а вторичной  $N_2$  — встречно. При симметричном расположении подвижного якоря относительно электромагнитов и при переменном напряжении  $U_1$  на зажимах первичной обмотки вторичное напряжение равно нулю ( $U_2 = 0$ , сигнала нет). Если якорь получит некоторое смещение, на выходе преобразователя возникает сигнал.

Схемы индукционного преобразователя с переменной площадью полюсов показаны на рис. 10.9, б, с поворотной катушкой — на рис. 10.9, в. Индукционные преобразователи такого типа, как и индуктивные, чаще всего используют в сочетании с равновесными и неравновесными мостовыми схемами, а также компенсационной схемой, для измерения перемещений и других неэлектрических величин (усилие, момент, давление, угол поворота и т. д.), действием которых можно изменять длину воздушного зазора или положение поворота якоря, вторичной обмотки.

**Вращающиеся трансформаторы.** По устройству вращающийся трансформатор (ВТ) подобен асинхронной машине с фазным

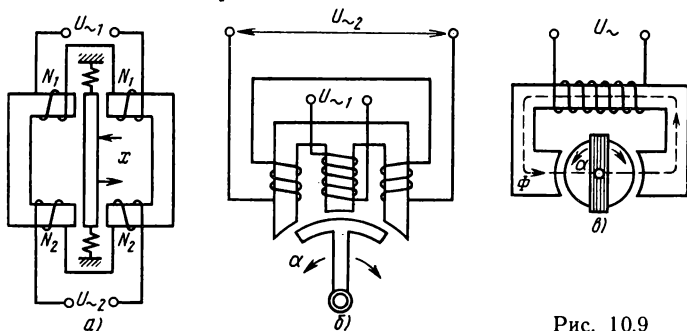


Рис. 10.9

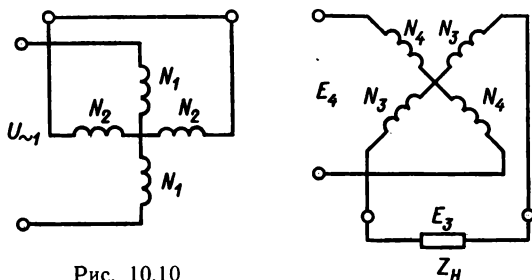


Рис. 10.10

ротором. На статоре расположены две первичные распределенные обмотки, сдвинутые в пространстве на угол  $90^\circ$  (рис. 10.10). Одну из них, называемую обмоткой возбуждения, включают в сеть переменного тока; схема включения другой обмотки зависит от назначения ВТ. Вторичные две обмотки, также сдвинутые в пространстве на  $90^\circ$ , уложены в пазах ротора. Так располагают обмотки, если трансформатор предназначен для работы с ограниченным поворотом ротора (поворотный трансформатор). В этом случае электрический контакт с обмотками ротора обычно осуществляется посредством спиральных пружин и наибольший угол поворота определяется предельным углом их закручивания.

В трансформаторе, который предназначен для работы в режиме непрерывного вращения, на роторе расположены первичные обмотки, а для электрической связи с обмоткой возбуждения служат контактные кольца и щетки.

Принцип работы вращающихся трансформаторов основан на изменении взаимной индуктивности между обмотками статора и ротора в связи с изменением угла поворота ротора. Первичная обмотка  $N_1$ , включенная на переменное напряжение, создает пульсирующий магнитный поток  $\Phi_1$ , который в обмотках ротора индуцирует э.д.с., амплитуда которых зависит от взаимного расположения обмоток ротора и статора. Амплитуда э.д.с. равна нулю, если оси обмотки ротора и статора взаимно перпендикулярны, и увеличивается по синусоидальному закону  $e_3 = E_m \sin \alpha$  при изменении угла  $\alpha$ . При этом в другой обмотке ротора э.д.с.  $e_4 = E_m \cos \alpha$ .

Вращающийся трансформатор, который на выходе дает два напряжения, сдвинутые по фазе на четверть периода, называют с и н у с н о - к о с и н у с н ы м (СКВТ).

В нагруженном трансформаторе токи вторичных обмоток создают вторичные магнитные потоки, которые изменяют магнитное поле ВТ, в связи с чем искажается зависимость э.д.с. от угла поворота. Для устранения такого искажения используют вторую

обмотку статора  $N_2$ , которую называют компенсационной. Схемы включения этой обмотки различны в зависимости от режима ВТ. В частности, при использовании ВТ в синусном режиме нагружается только одна обмотка ротора, а компенсационная обмотка замкнута накоротко (рис. 10.10).

Вращающиеся и поворотные трансформаторы служат для получения на зажимах вторичной обмотки (на выходе) напряжения, величина которого находится в определенной функциональной зависимости от угла поворота ротора.

Кроме синусно-косинусного трансформатора применяют линейный вращающийся трансформатор (ЛВТ), который на выходе дает э.д.с., пропорциональную углу поворота. Вращающиеся трансформаторы применяют в автоматике в качестве преобразователей угловых величин, а также функциональных элементов аналоговых счетно-решающих устройств.

**Тахогенераторы.** Для преобразования механического вращения в электрический сигнал применяют тахогенераторы — малые электрические машины постоянного и переменного токов.

Зависимость э.д.с. обмотки якоря машины постоянного тока от частоты вращения якоря и магнитного потока полюсов выражает формула (9.1):  $E = C_E \Phi n$ .

В режиме холостого хода при постоянном потоке электрическое напряжение на внешних зажимах тахогенератора (выходной электрический сигнал) пропорционально частоте вращения якоря (входной незлектрической величине). Отсюда следует, что с помощью тахометра можно измерять частоту вращения, вводить в автоматическую систему электрический сигнал, пропорциональный частоте вращения.

Постоянство магнитного потока можно обеспечить, если его создавать постоянным магнитом, или электромагнитом с постоянным током возбуждения.

В последнем случае, учитывая требования точности измерения, применяют схему независимого возбуждения. Тахогенератор с постоянным магнитом имеет существенное преимущество — ему не нужен дополнительный источник постоянного тока. Однако при электромагнитном возбуждении можно менять ток возбуждения и тогда э.д.с. будет зависеть не только от частоты вращения, но и от тока возбуждения. В этом случае выходной электрический сигнал находится в прямой зависимости от двух входных величин.

Этим открывается возможность применять тахогенератор в качестве элемента счетно-решающей техники, например для умножения двух величин, одна из которых изменяет ток возбуждения, а другая — частоту вращения вала тахогенератора.

Конструктивная схема тахогенератора постоянного тока

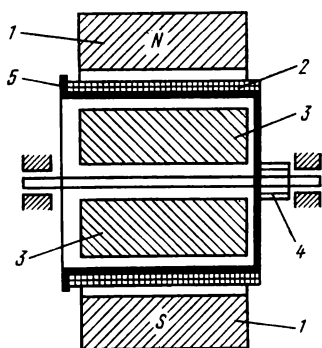


Рис. 10.11

с возбуждением от постоянных магнитов показана на рис. 10.11, где обозначены: 1 — постоянные магниты, расположенные на статоре; 2 — обмотка ротора; 3 — цилиндрический ферромагнитный сердечник, служащий для уменьшения магнитного сопротивления магнитопровода; 4 — коллектор; 5 — якорь в виде тонкостенного стаканчика из изоляционного материала.

Тахогенераторы переменного тока по принципу действия делят на синхронные и асинхронные. Выходная э.д.с. у них синусоидальной формы, что необходимо для некоторых схем.

*Синхронные* тахогенераторы не получили широкого применения, так как частота выходного напряжения изменяется с изменением частоты вращения, тахогенератор нечувствителен к изменению направления вращения. Более широкое распространение имеют *асинхронные* тахогенераторы, конструктивная схема которых приведена на рис. 10.12. На схеме видны: магнитопровод, состоящий из внешней части 3 с полюсами и внутреннего цилиндра 4; обмотки, расположены на сердечниках полюсов так, что их магнитные оси взаимно перпендикулярны.

Обмотка 1, называемая продольной, включается на переменное напряжение  $u = U_m \sin \omega t$  и является обмоткой возбуждения, так как создает пульсирующий магнитный поток возбуждения  $\Phi_1 = \Phi_{\text{вм}} \sin \omega t$ . Обмотка 2 является выходной или сигнальной, так как в ней наводится э.д.с. с амплитудой, пропорциональной частоте вращения ротора, и частотой, равной частоте тока в обмотке возбуждения. Ротор 5, изготовленный в виде тонко-

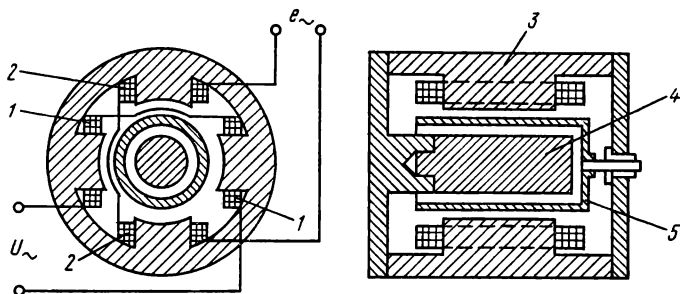


Рис. 10.12

стенного металлического стакана, укреплен на оси, а стенки его находятся в воздушном зазоре между полюсами и внутренним цилиндром магнитопровода. Если ротор неподвижен, то э.д.с. в выходной обмотке не наводится, так как магнитный поток возбуждения с ней не сцеплен.

При вращении ротора в нем кроме э.д.с. трансформации индуцируется э.д.с. вращения, так как ротор пересекает линии магнитной индукции поля возбуждения. Индуцированная э.д.с. создает в короткозамкнутом роторе токи, которые, в свою очередь, создают вторичный магнитный поток  $\Phi_2$ . Этот поток направлен вдоль оси сигнальной (выходной) обмотки и наводит в ней э.д.с., величина которой пропорциональна частоте вращения ротора, а фаза определяется направлением вращения.

#### *Контрольные вопросы*

1. На рис. 10.7, а и 10.9, а показаны схемы измерительных преобразователей, у которых изменение выходной величины связано с изменением воздушного зазора  $\delta$  между якорем и сердечником. В чем состоит принципиальное отличие между ними? Какой из них называют дроссельным, а какой трансформаторным?

2. Вращающийся трансформатор по устройству подобен асинхронной машине. Почему все-таки его называют трансформатором?

3. Тахогенератор постоянного тока по схеме независимого возбуждения дает более точный результат измерения частоты вращения, чем тахогенератор с самовозбуждением. Чем это объясняется?

4. При вращении тонкостенного ротора асинхронного тахометра (см. рис. 10.12) в нем индуцируются э.д.с. трансформации и э.д.с. вращения. В чем состоит сходство и различие этих э.д.с.?

5. В тахогенераторах в качестве источника магнитного поля применяют электромагниты или постоянные магниты. Какие ферромагнитные материалы применяют в том и другом случае?

### **§ 10.4. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА**

В автоматической системе на объект управления или регулирования непосредственно действует исполнительный орган.

Чаще всего это действие заключается в механическом движении с целью включения или отключения электрических цепей; открывания или закрывания клапанов, золотников, вентилях и задвижек; сцепления или расцепления валов; перемещения или поворота различных частей механизмов и т. п.

В числе исполнительных элементов автоматических систем широко применяют электромеханические устройства — электромагниты различных конструкций и электродвигатели.

**Электромагниты.** Исполнительные электромагниты, одинаковые по принципу действия, весьма разнообразны по конструкции. На рис. 10.13, а — в показаны конструктивные схемы электро-



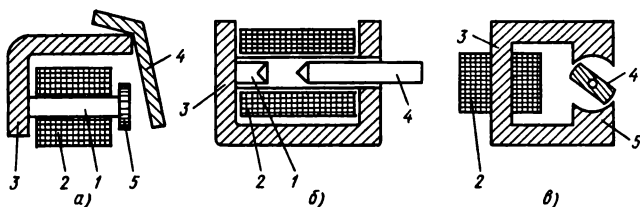


Рис. 10.13

магнитов: клапанного (а), прямоходового (б), с поперечным движением якоря (в). В каждой из этих схем имеется магнитопровод, в который входят сердечник 1, якорь 4, полюсный наконечник 5, ярмо 3. На сердечнике находится обмотка электромагнита 2. При включении электромагнита в электрическую цепь в обмотке возникает электрический ток, в результате чего подвижный якорь притягивается к сердечнику. Механическая связь якоря электромагнита с объектом управления или регулирования обеспечивает заданное действие исполнительного элемента в автоматической системе. Примерами практического применения электромагнитов в исполнительных устройствах могут служить электромагнитный клапан, электромагнитная муфта.

В электромагнитном клапане (рис. 10.14) подвижный якорь 2 электромагнита является также частью двухпозиционного клапана 3. Первая позиция (закрыто) соответствует отсутствию тока в катушке 1. При подаче сигнала на открытие клапана в катушку включается ток, сердечник втягивается внутрь катушки и клапан открыт для пропускания жидкости или газа.

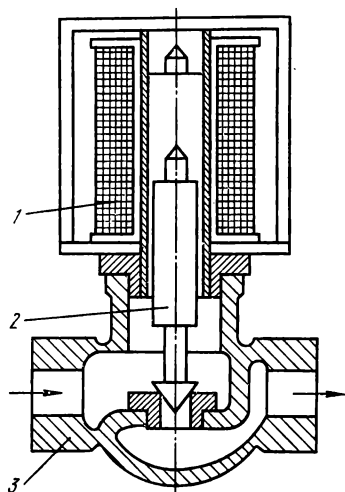


Рис. 10.14

Муфта служит для передачи движения от ведущего вала к ведомому. Электромагнитная муфта управляется электрическим сигналом, при подаче которого происходит сцепление валов, причем мощность входного сигнала значительно меньше мощности на ведомом валу. В данном случае электромагнитная муфта одновременно является усилителем мощности.

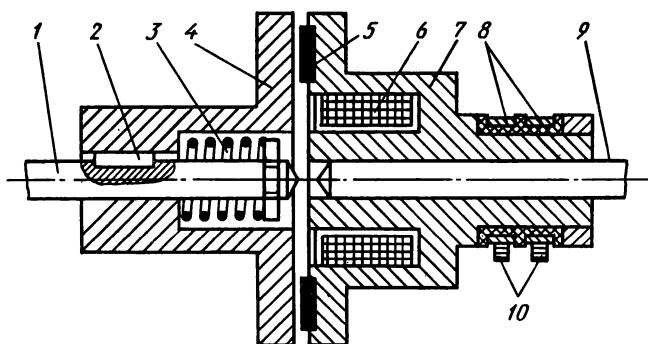


Рис. 10.15

В практике для автоматического управления механизмами применяют несколько типов электромагнитных муфт. В одном из них при электромагнитном управлении для передачи движения используется трение поверхностей из материалов с большим коэффициентом трения и малым износом (сталь, чугун, пластмассы).

Такая муфта показана на рис. 10.15. На ведущей оси 9 укреплен сердечник 7 электромагнита с обмоткой 6, которая включается в электрическую цепь управления через контактные кольца 8 и щетки 10. Тарельчатый якорь 4 электромагнита укреплен с помощью шпонки 2 на ведомой оси 1 так, что может перемещаться вдоль нее. При отсутствии тока в катушке якорь сдвинут влево под действием пружины 3, а при включении тока притягивается к сердечнику и прижимается к шайбе трения 5.

**Исполнительные электродвигатели постоянного тока.** В качестве исполнительных органов в автоматических системах широко применяют электродвигатели постоянного и переменного токов небольшой мощности, которые по принципу действия не отличаются от электродвигателей общего применения. Их особенности заключены в конструкции, а она определяется назначением и условиями работы, из которых надо особо отметить частые пуски и остановки, изменение направления вращения. В этих условиях от двигателей требуются устойчивость работы во всех режимах, высокая точность исполнения команд, широкий диапазон регулирования частоты вращения, малая инерционность, большой пусковой момент, малая мощность управления, малые габариты и вес.

В установках автоматического управления, в следящих системах применяются исполнительные двигатели постоянного тока серии СЛ. Двигатели этой серии устроены в принципе так же, как

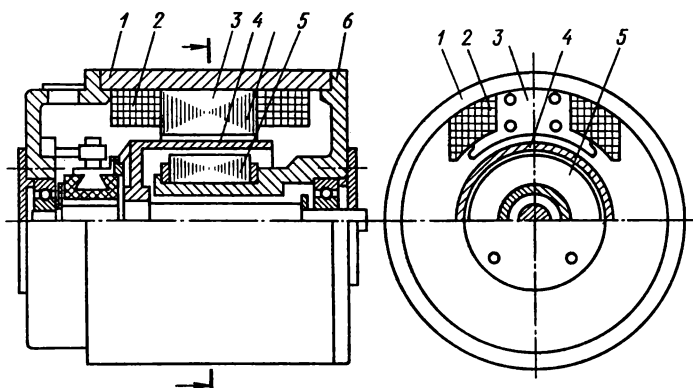


Рис. 10.16

двигатели постоянного тока общего назначения (отличаются в основном размерами); их выполняют по схеме независимого возбуждения или с постоянными магнитами. Для уменьшения инерционности, т. е. для увеличения быстродействия электродвигателя, необходимо уменьшить размеры и массу ротора. С этой целью изготавливают и применяют в схемах автоматики электродвигатели постоянного тока с полым якорем и печатной обмоткой якоря.

Устройство двигателя с полым ротором показано на рис. 10.16, где отмечены: 1 — станина; 2 — обмотка возбуждения; 3 — магнитный полюс; 4 — обмотка якоря; 5 — внутренняя часть статора; 6 — подшипниковый щит. Сердечник якоря отделен от обмотки и остается неподвижным, так как укреплен на выступе одного из подшипниковых щитов. Обмотку якоря в этом случае укладывают на цилиндрический каркас и заливают пластмассой. Таким образом, якорь малоинерционного двигателя представляет собой полый стакан, состоящий из проводников обмотки, скрепленных пластмассой. Стакан укреплен на одном валу с коллектором, а стенки его находятся в воздушном зазоре между полюсами и неподвижным сердечником.

Печатная обмотка якоря отличается тем, что ее наносят электрохимическим способом на внешнюю и внутреннюю части полого цилиндра, заранее изготовленного из электроизоляционного материала.

К преимуществам двигателей с полым ротором, кроме малой инерционности, относятся также более простое устройство ротора, более легкие условия коммутации (отсутствие искрения на коллекторе) вследствие малой индуктивности обмотки якоря.

**Исполнительные электродвигатели переменного тока.** В автоматике наибольшее применение имеют асинхронные двухфазные электродвигатели с короткозамкнутым ротором и полым ротором. Некоторые сведения об исполнительных электродвигателях этого типа даны в § 8.4. В частности, там указано, что на статоре двигателя расположены две обмотки, сдвинутые в пространстве на  $90^\circ$ . Если токи в обмотках сдвинуты по фазе на четверть периода, то образуется круговое вращающееся магнитное поле, при котором двухфазный двигатель имеет наилучшие энергетические характеристики.

Одна из обмоток статора при работе двухфазного исполнительного двигателя постоянно включена под напряжением (обмотка возбуждения ОВ), другая — обмотка управления ОУ, включается по сигналу соответствующего элемента автоматической системы в тот момент, когда требуется привести ротор в движение. Сдвиг фаз токов в обмотках ОВ и ОУ достигается включением в цепь обмотки управления фазосмещающего элемента (например, конденсатора), но чаще всего путем применения специальных схем управления, фазовращателей.

Частота вращения исполнительного двухфазного асинхронного электродвигателя регулируется путем изменения управляющего напряжения по амплитуде, по фазе или изменением амплитуды и фазы одновременно. Изменение направления вращения достигается путем изменения фазы управляющего напряжения на  $180^\circ$  (включение в противофазе).

Для уменьшения инерционности, повышения быстродействия и точности работы асинхронные исполнительные двигатели изготавливают с полым немагнитным ротором (рис. 10.17). В отличие от двигателя с короткозамкнутой обмоткой, ротор этого типа обмотки не имеет, а изготовлен из алюминия или его сплава в виде тонкостенного стакана 1, который посредством втулки 6 укреплен на валу 5.

Неподвижный магнитопровод собирают из листов электротехнической стали, но в данной конструкции он состоит из двух частей: внутренней 4 и внешней 2 (с обмоткой 3). В воздушный зазор между ними входят стенки полого ротора.

Вращающееся магнитное поле, создаваемое токами в обмотках статора, индуцирует вихревые токи в полом роторе. Вращающий момент возникает в результате силового действия вращающегося магнитного поля статора, на токи, индуцированные в роторе, и вращает ротор по направлению вращения поля статора. Исполнительные электродвигатели такого типа изготавливают мощностью от десятых долей ватта до нескольких сотен ватт в расчете на промышленную частоту 50 Гц и повышенные частоты от 400 до 1000 Гц. Основной недостаток их обусловлен значитель-

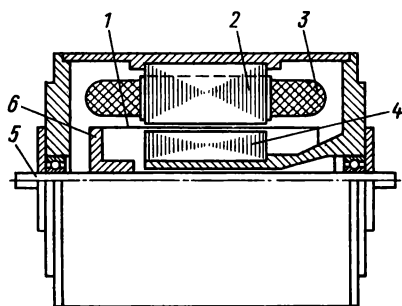


Рис. 10.17

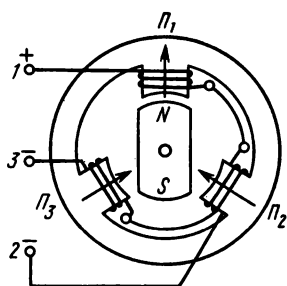


Рис. 10.18

ной величиной немагнитного зазора между внутренней и внешней частями статора (0,4—1,5 мм, включая толщину стенки ротора 0,1—0,25 мм). В связи с этим двигатель с полым немагнитным ротором имеет большой намагничивающий ток (0,8—0,9 от номинального тока), низкий коэффициент мощности и относительно небольшой к.п.д.

**Шаговые электродвигатели.** Характер работы многих автоматических устройств требует применения привода дискретного (прерывистого) действия. В этих случаях используют шаговые электродвигатели, ротор которых поворачивается на фиксированный угол (делает один шаг) под действием управляющего импульса. В ответ на серию импульсов ротор делает серию шагов, число которых равно числу управляющих импульсов. Такой характер действия шаговых двигателей позволяет применять их в устройствах с числовым программным управлением (например, промышленные роботы, металлообрабатывающие станки), а также в механизмах типа счетчика импульсов, лентопротяжек и т. п.

В настоящее время известно немало конструктивных вариантов шаговых электродвигателей. Рассмотрим для примера некоторые из них.

На рис. 10.18 показана схема шагового двигателя с тремя явно выраженными полюсами на статоре, обмотки которого соединены звездой и получают питание по линии из трех проводов, один из которых имеет полярность, противоположную полярности двух других.

Ротор является постоянным магнитом, который, взаимодействуя с магнитными полюсами статора, может поворачиваться на угол  $60^\circ$ , останавливаясь после каждого шага в устойчивом положении. Положение ротора на рис. 10.18 соответствует отмеченной там же полярности проводов и полюсов. Для того чтобы ротор сделал следующий шаг по часовой стрелке, надо изменить по-

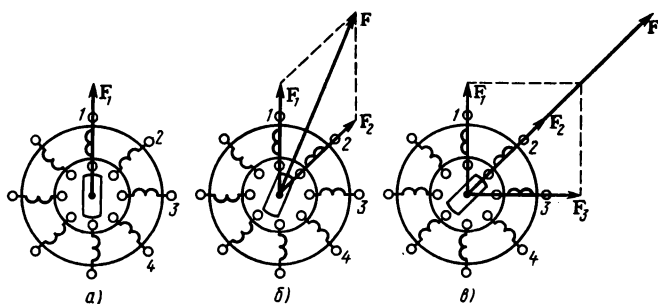


Рис. 10.19

лярность полюса  $\Pi_2$ , т. е. изменить направление тока в проводе 2, для следующего шага — в проводе 1, а затем в проводе 3 и т. д., что достигается с помощью специального устройства, называемого коммутатором.

Принцип действия многофазного шагового электродвигателя с невозбужденным ротором поясняет схема рис. 10.19, а. Управляющий импульс можно подавать на обмотки в обычном порядке (1, 2, 3, ...,  $m$ ), в таком же порядке делает шаги ротор, устойчивые положения которого совпадают с осями обмоток, поэтому таких положений  $m$ .

Однако управляющее напряжение можно подавать одновременно на несколько обмоток и этим увеличивать намагничивающую силу и синхронизирующий момент ротора.

В этих случаях устойчивые положения зависят от количества одновременно питаемых обмоток: при четном их числе они находятся между осями двух средних обмоток, а при нечетном — совпадают с осью средней обмотки (рис. 10.19, б, в).

#### Контрольные вопросы

1. Для электромагнитных систем имеется общая закономерность: электромагнитные силы действуют в направлении, которое соответствует увеличению магнитного потока. Как проявляется эта закономерность в электромагнитах, показанных на рис. 10.13?

2. В числе достоинств исполнительного двигателя постоянного тока с полым ротором отмечено отсутствие искрения на коллекторе вследствие малой индуктивности обмотки якоря. Почему индуктивность обмотки якоря влияет на условия коммутации?

3. Основной недостаток исполнительного асинхронного двигателя с полым ротором связан с величиной немагнитного зазора в его магнитной цепи. Почему с увеличением немагнитного зазора увеличивается ток намагничивания и уменьшается к.п.д. двигателя?

4. Неподвижный магнитопровод исполнительных двигателей с полым

ротором состоит из двух частей — внешней и внутренней (см. рис. 10.16, 10.17). Как объяснить эти конструктивные особенности исполнительных двигателей?

5. В каком порядке надо менять полярность полюсов, чтобы ротор шагового двигателя (см. рис. 10.18) перемещался против движения часовой стрелки?

## § 10.5. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ

В структурной схеме системы автоматики промежуточные элементы занимают положение между чувствительными и исполнительными элементами. Они составляют наиболее многочисленную группу элементов, так как функций их очень многообразны.

К промежуточным элементам относятся: стабилизаторы напряжения и тока, реле, распределители, усилители, управляющие (программные) устройства, генераторы импульсов, каналы связи и многие другие.

В данном параграфе рассмотрим те из них, принцип действия которых основан на силовом действии магнитного поля.

**Реле.** В автоматике применяют многочисленную группу элементов релейного действия, которое состоит в том, что при определенных значениях входной величины  $x$  выходная величина  $y$  изменяется скачком (график на рис. 10.20, а). Изменение выходной величины от  $y_1$  до  $y_2$  при  $x = x_2$  называют срабатыванием, а изменение от  $y_2$  до  $y_1$  при  $x = x_1$  — отпусканием реле. От рода входной величины зависят принцип работы и конструкция реле и в связи с этим различают реле электрические, тепловые, фотореле и др. Наиболее многочисленна группа электромеханических реле, в которых изменение электрической величины (тока,

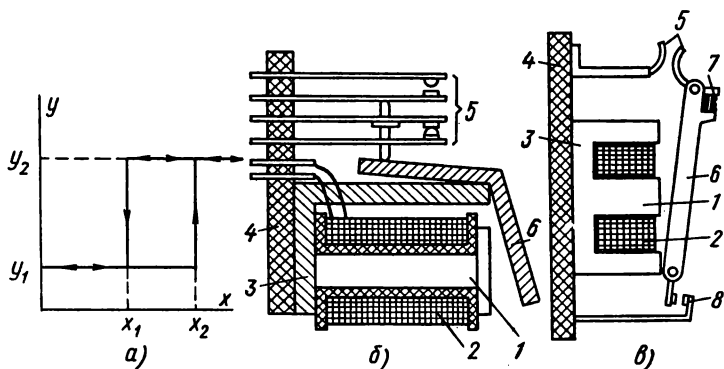


Рис. 10.20

напряжения, мощности) вызывает механическое перемещение подвижного элемента, в результате чего переключаются электрические контакты. В группу электромеханических входят электромагнитные, магнитоэлектрические, электродинамические, индукционные и другие реле, а из них чаще можно встретить реле электромагнитные. На рис. 10.20, б показана конструктивная схема электромагнитного реле клапанного типа, где отмечены части стального магнитопровода (1 — сердечник, 2 — катушка электромагнита; 3 — ярмо; 4 — изоляционное основание; 5 — контакты; 6 — подвижный якорь).

При отсутствии тока в катушке якорь под действием пружины (в данном реле ее роль выполняют пружинящие контактные пластины) или собственного веса находится в наибольшем удалении от сердечника. В результате включения тока в катушку якорь притягивается к сердечнику и происходит переключение контактов: одни из них (нормально разомкнутые) замыкаются, а другие (нормально замкнутые) размыкаются. Такое реле называют нейтральным, так как его работа не зависит от направления тока в катушке. Кроме нейтральных применяют поляризованные реле (рис. 10.21), в магнитопровод которых введен постоянный магнит 1. При включении тока в обмотку 5 подвижный якорь 2 притягивается к сердечнику 4 в ту или другую сторону и подвижный контакт замыкается с одним из неподвижных контактов 3 в зависимости от направления тока.

Электромагнитные реле имеют некоторые конструктивные отличия в зависимости от рода тока (постоянный, переменный). В частности, в реле переменного тока магнитный полюс раздвоен и на одну половину его надет медный короткозамкнутый виток. Этим достигается сдвиг по фазе магнитных потоков в двух половинах полюса. Поэтому общий магнитный поток полюса никогда не равен нулю, несмотря на то, что ток в обмотке переходит через нуль дважды за период. Этим достигаются устранение вибраций якоря и надежность работы реле.

Входная мощность реле невелика, а контакты его могут выполнять переключения в электрической цепи значительно большей мощности. С этой точки зрения реле выступает в роли усилителя мощности.

В некоторых случаях переключение в управляемой электрической цепи является конечной задачей автоматического устройства и реле в таких случаях может играть роль исполнительного элемента. Примером тому является работа электромагнитного контактора, который по принципу действия не отличается от электромагнитного реле (на рис. 10.20, в детали контактора обозначены так же, как у реле). Отличие состоит в том, что контактор предназначен для переключений в электрической цепи относи-



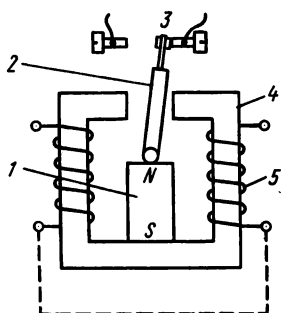


Рис. 10.21

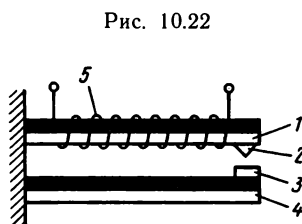


Рис. 10.22

тельно большой мощности (например, для включения и выключения электродвигателя), следствием чего являются значительное увеличение его размеров и некоторые другие конструктивные особенности. В частности, основные контакты, рассчитанные на большие токи, помещают в дугогасительные камеры. Для надежности при каждом включении они притираются и плотно прижимаются друг к другу, что обеспечивается не только большой силой притяжения якоря к сердечнику, но и действием пружины 7 на подвижном контакте. Одновременно с силовыми контактами работают вспомогательные контакты 8 (блок-контакты), которые используются в цепях управления (см. рис. 10.20, в).

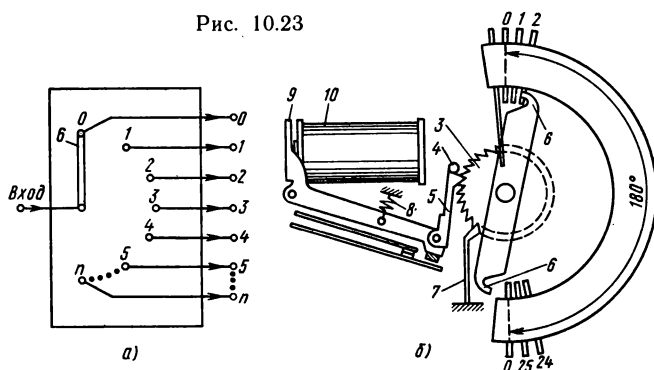
**Электротермические реле.** Из группы электротермических (тепловых) реле чаще других применяют биметаллические реле, принцип действия которых поясняет рис. 10.22.

Биметаллическая пластинка 1 — это две прочно скрепленные сваркой или пайкой полосы из металлов с резко различными коэффициентами теплового расширения, например латуни и инвара (сплав железа с никелем). Такая пластинка при нагревании изгибается и контакты 2, 3 замыкаются, при охлаждении она снова выпрямляется, а контакты размыкаются. Биметаллическая пластинка нагревается тем больше и быстрее, чем больше электрический ток в нагревателе (обмотка 5).

Для устранения влияния температуры окружающей среды иногда контакт 3 также крепится на биметаллической пластинке 4.

Реле этого типа имеет значительную тепловую инерцию, вследствие чего контакты движутся медленно и работа их этим осложняется. Для облегчения работы контактов применяют приспособления, которые при достижении определенной температуры заставляют контакты скачком менять положение или помещают биметаллические пластины с контактами в вакуум, что значительно усложняет реле.

Рис. 10.23



Однако тепловая инерция оказалась полезной при применении биметаллических реле для защиты электродвигателей от перегрузок. Такое реле не успевает сработать при пуске электродвигателя, когда ток кратковременно увеличивается, но надежно защищает при длительных перегрузках, дает сигнал на отключение двигателя.

**Шаговые распределители.** В автоматике, вычислительной технике, телефонии применяют распределители, с помощью которых осуществляется поочередное переключение в измерительных или исполнительных цепях.

Как можно решить подобную задачу, дает представление схема на рис. 10.23, а. Подвижная щетка 6 поочередно соединяет входной зажим с одним из выходных зажимов (0, 1, 2, ...) и, таким образом, распределяет, например, управляющие сигналы. Возможно и обратное поступление сигналов от контролируемых объектов, которые поочередно подключаются к одному приемнику.

Конструктивная схема электромеханического шагового распределителя показана на рис. 10.23, б, где видны контактная система (набор неподвижных контактных ламелей 0, 1, 2, ..., 24, 25, подвижные щетки 6) и электромагнитный привод (электромагнит и храповой механизм). Контактные ламели расположены по дуге окружности (180 или 120°) в несколько рядов (от четырех до восьми) и на каждый ряд имеется своя щетка, которая состоит из двух пружинящих пластин, соприкасающихся с ламелью с двух сторон для надежности контакта. Щетки по контактному полю перемещаются шагами, причем каждый шаг совершается непосредственно под действием пружины 8 посредством движущей собачки 5, которая доходит до упора 4 и поворачивает на один шаг храповое колесо 3, укрепленное на одной оси со щетками.

При подаче в обмотку 10 электромагнита очередного управляющего импульса якорь 9 притягивается к сердечнику, натягивает пружину и передвигает движущую собачку обратно на один зуб, при этом стопорная собачка 7 удерживает храповое колесо и щетки в фиксированном положении. По окончании управляющего импульса подвижная система распределителя делает очередной шаг. С последним шагом щетка сходит с последней ламели, но одновременно противоположный конец щетки замыкается с первой рабочей ламелью. Этим исключается холостой пробег подвижной части распределителя.

**Сельсины.** В различных технических устройствах применяют дистанционные передачи угловых перемещений, причем оси, не связанные между собой механически, поворачиваются синхронно.

Такие передачи осуществляют в большинстве случаев с помощью однофазных сельсинов — малых индукционных электрических машин. В передаче используются два одинаковых сельсина (датчик и приемник), которые соединены между собой линией связи.

Схема синхронной связи на однофазных сельсинах представлена на рис. 10.24. Сельсин в данном случае имеет однофазную обмотку на статоре (обмотка возбуждения ОВ) и трехфазную обмотку на роторе (синхронизирующая обмотка ОС). Обмотки возбуждения обоих сельсинов включены в общую сеть переменного тока, обмотки синхронизации соединены между собой трехпроводной линией связи.

Переменный магнитный поток, созданный током обмотки возбуждения, индуцирует в фазах обмотки ротора э.д.с., величина которой зависит от пространственного их расположения.

Если фазы обмоток ротора обоих сельсинов расположены одинаково относительно своих обмоток возбуждения, то в соответствующих фазах сельсина-датчика и сельсина-приемника,

соединенных проводом линии, индуцируются одинаковые по величине встречно направленные э.д.с. В этом случае тока в обмотках синхронизации нет и положение роторов датчика и приемника называют согласованным.

При повороте ротора сельсина-датчика на некоторый угол  $\alpha$  равновесие э.д.с. в одноименных фазах датчика и приемника нарушается и тогда в обмотках

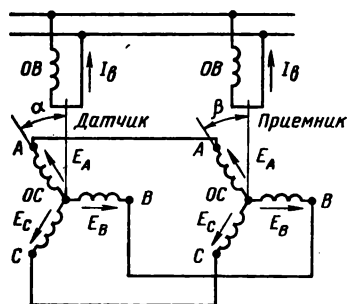


Рис. 10.24

и проводах линии связи появляются уравнивающие токи. На токи в обмотках ротора действует магнитное поле статора, в результате чего возникает вращающий (синхронизирующий) момент, который поворачивает ротор сельсина-приемника на угол  $\beta$ , т. е. в положение, согласованное с ротором сельсина-датчика. Величина синхронизирующего момента зависит от угла рассогласования  $\theta = \alpha - \beta$  между положениями роторов датчика и приемника ( $M = M_{\max} \sin \theta$ ). Если сельсин-приемник на своем валу практически не имеет механической нагрузки (например, на валу укреплен только стрелка указателя поворота), то такой режим называется **и н д и к а т о р н ы м**.

При наличии механической нагрузки точность работы передачи значительно понижается, поэтому применяют трансформаторную схему, в которой в сеть включена только обмотка возбуждения сельсина-датчика, а такая же обмотка сельсина-приемника является выходной. Напряжение от зажимов этой обмотки подается на усилитель, а далее на обмотку управления исполнительного двигателя, вал которого механически связан с валом сельсина-приемника. Исполнительный двигатель поворачивает ротор сельсина-приемника на угол  $\beta$  до согласованного положения сельсинов и останавливается при  $\alpha = \beta$ , если система работает в режиме ограниченного поворота.

Электрическая связь вращающихся обмоток сельсинов с неподвижными проводами линии осуществляется через скользящие контакты (кольца и щетки), поэтому такие сельсины называют **к о н т а к т н ы м и**.

Конструкции контактных сельсинов мало отличаются от синхронных или однофазных асинхронных машин малой мощности, а в зависимости от места расположения обмоток и формы магнитных полюсов различают сельсины с явновыраженными полюсами на статоре или роторе, причем обмотка возбуждения, сосредоточенная, расположена на сердечниках полюсов; сельсины с неявновыраженными полюсами, у которых обмотка возбуждения распределенная, уложена в пазах. Синхронизирующие обмотки всегда распределенные, и фазы их соединяют звездой.

Наличие скользящих контактов ухудшает технические характеристики сельсинов, поэтому широкое применение получают бесконтактные сельсины, отличительной особенностью которых является расположение обмоток возбуждения и синхронизации на статоре, а на роторе, имеющем явновыраженные полюса, обмотки нет. Однако полюса ротора входят в магнитную цепь, по которой замыкается магнитный поток, созданный током обмотки возбуждения, и свою задачу они выполняют так же, как и в контактном сельсине, поскольку величина сцепления магнитного потока с обмотками синхронизации зависит от положения ротора.

### *Контрольные вопросы.*

1. Что такое ток срабатывания и ток отпускания электромагнитного реле?

2. Как следует изменить (увеличить или уменьшить) натяжение возвратной пружины электромагнитного реле, чтобы уменьшить ток срабатывания? Как при этом изменится ток отпускания?

3. Для устранения влияния температуры окружающей среды тепловое реле иногда имеет кроме основной еще и компенсационную биметаллическую пластинку (см. рис. 10.22, поз. 5). Как объяснить действие компенсационной пластинки?

4. На рис. 10.23, б показана схема шагового распределителя с обратным приводом. Чем отличается от него распределитель с прямым приводом?

5. Для передачи в кабину пилота информации о положении закрылков на самолетах применяют сельсинные передачи. Какой режим (индикаторный или трансформаторный) следует использовать для такой передачи?

### **§ 10.6. ФЕРРОМАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ**

В основе действия ферромагнитных элементов находится явление магнитного насыщения ферромагнитных материалов и связанная с ним нелинейная зависимость  $B=f(H)$  магнитной индукции от напряженности поля в ферромагнитных сердечниках (см. § 3.3).

На этой основе работают стабилизаторы напряжения, магнитные усилители, бесконтактные реле, магнитные логические и запоминающие элементы.

Перечисленные устройства в структурных схемах автоматических систем занимают промежуточное положение, так же как электромеханические элементы, рассмотренные в предыдущем параграфе. Однако надо отметить существенное преимущество ферромагнитных элементов, которое заключается в отсутствии подвижных частей, вследствие чего они имеют практически неограниченный срок службы, не требуют постоянного ухода, обладают высокой надежностью.

**Ферромагнитные стабилизаторы напряжения.** Стабилизатор напряжения поддерживает постоянной величину выходного напряжения  $U_2$  при изменении в определенных пределах напряжения  $U_1$  на его входе. Ферромагнитные стабилизаторы действуют на переменном токе.

В простейшем ферромагнитном стабилизаторе напряжения имеются два последовательно соединенных дросселя  $Dp_1$  и  $Dp_2$  (рис. 10.25, а). К зажимам дросселя  $Dp_2$  подключается нагрузка, чаще всего активная  $R_n$ . Стабилизирующее действие показано на рис. 10.25, б, где изображены вольт-амперные характеристики:

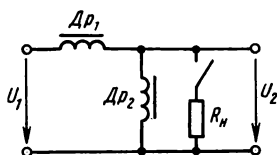


Рис. 10.25

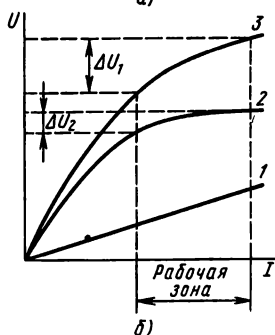
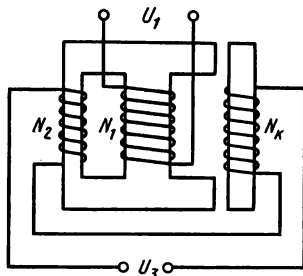


Рис. 10.26



1 — ненасыщенного дросселя  $Dr_1 - U_{dr1} = f(I)$ ; 2 — насыщенного дросселя  $Dr - U_{dr2} = f(I)$ ; 3 — всей цепи  $U_1 = f(I)$ .

Вольт-амперная характеристика всей цепи построена согласно равенству  $U_1 = U_{dr1} + U_{dr2}$ , т. е. сложением ординат характеристик дросселей.

Сопоставление изменения входного напряжения  $\Delta U_1$  с изменением напряжения на выходе  $\Delta U_2$  показывает, что  $\Delta U_2 \ll \Delta U_1$ , т. е. при отклонении напряжения в сети от номинальной величины напряжение на нагрузке изменяется значительно меньше.

Рассмотренная схема стабилизации напряжения имеет ряд недостатков, в том числе относительно низкий коэффициент стабилизации ( $k_c = \Delta U_1 / \Delta U_2 = 4 \div 5$ , где значения  $\Delta U$  выражаются в процентах к номинальным значениям соответствующих напряжений); малые величины к.п.д.  $\cos \phi$  и др.

Улучшение свойств стабилизатора достигается расположением его обмоток на специальном трехстержневом сердечнике (рис. 10.26). Входное напряжение подается на обмотку  $N_1$  среднего стержня, в рабочем режиме ненасыщенного. Выходная обмотка  $N_2$  расположена на левом стержне. Последовательно с ней включена компенсационная обмотка  $N_k$ , расположенная на правом стержне, также ненасыщенном при наличии воздушного зазора. Этот стержень можно перемещать и изменять в нем величину магнитного потока.

В данном случае стабилизатор имеет трансформаторную схе-

му. Первичная обмотка  $N_1$  включается в электрическую сеть, напряжение которой  $U_1$  является входным напряжением стабилизатора. Выходное напряжение  $U_3$  является разностью напряжений вторичных обмоток  $U_1 = U_2 - U_k$ , так как компенсационная обмотка включена встречно с основной обмоткой  $N$ . При изменении напряжения в сети э.д.с. обмотки  $N_2$  изменяется мало, так как стержень, на котором она находится, имеет малое поперечное сечение и поэтому работает в режиме сильного магнитного насыщения. Действие компенсационной обмотки направлено на уменьшение изменений выходного напряжения стабилизатора при изменении входного напряжения. Применяют и другие варианты схемы ферромагнитных стабилизаторов, из которых следует отметить автотрансформаторную и феррорезонансные схемы.

В схеме феррорезонансного стабилизатора имеется конденсатор, который включают последовательно или параллельно с обмоткой, находящейся на насыщенном стержне. Наличие конденсатора уменьшает реактивный ток, улучшает технико-экономические характеристики, расширяет диапазон и повышает точность стабилизации напряжения.

**Магнитные усилители.** Из всех ферромагнитных элементов автоматики магнитные усилители имеют наиболее широкое и разнообразное применение. Их изготавливают в большом диапазоне мощностей и применяют как в точных измерительных устройствах мощностью в несколько долей ватта, так и в схемах автоматического управления крупными установками и машинами. К тем преимуществам, которые ранее отнесены ко всем ферромагнитным элементам, в отношении магнитных усилителей можно добавить возможность усиления очень слабых сигналов постоянного тока (до  $10^{-19}$  Вт), большой коэффициент усиления по мощности ( $10^3$ — $10^6$  в одном каскаде), более высокий к.п.д., чем у электронных и электронно-ионных усилителей, и др.

Возможность использования явления магнитного насыщения ферромагнитных материалов для создания усилителей можно показать на примере простейшего дросселя с подмагничиванием постоянным током (рис. 10.27, а, б). В данном случае на ферромагнитном замкнутом сердечнике имеются две обмотки:  $N_1$  — обмотка основная включается в цепь переменного тока,  $N_0$  — обмотка дополнительная включается в цепь постоянного тока.

Из формул (3.30) и (7.1) следует, что магнитный поток в ферромагнитном сердечнике по величине и форме определяется напряжением на обмотке, расположенной на этом сердечнике. Если напряжение изменяется по синусоидальному закону, то и магнитный поток имеет такую же форму, так как активное сопротивление обмотки мало по сравнению с индуктивным ( $R \ll X_1$ ), и можно считать напряжение равным э.д.с. самоиндукции  $U \approx E =$

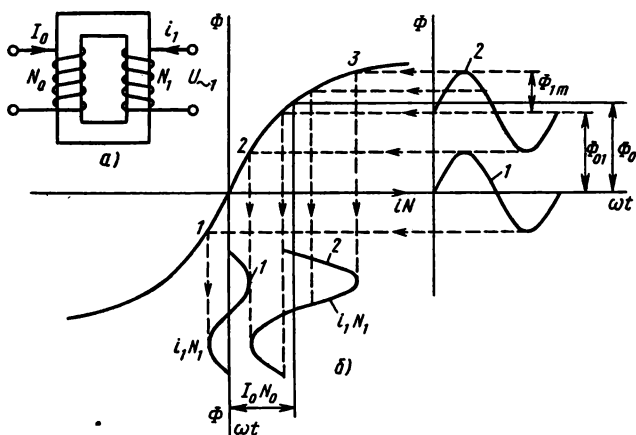


Рис. 10.27

$= 4,44fN_1\Phi_m$ ;  $\Phi_m = U/4,44fN_1$ . При отсутствии постоянного тока в дополнительной обмотке магнитный поток изменяется согласно уравнению  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$  (кривая 1), а ток в основной обмотке имеет синусоидальную форму, если рабочая точка на характеристике намагничивания сердечника не выходит за пределы прямолинейного участка 1—2.

При подмагничивании сердечника постоянным током магнитный поток в сердечнике выражается суммой из двух слагаемых  $\Phi = \Phi_{01} + \Phi_{1m} \sin \omega t$ , где  $\Phi_{01}$  — постоянная часть потока, обусловленная намагничивающей силой  $i_0N_0$  дополнительной обмотки. В этом случае рабочая точка перемещается в область магнитного насыщения (участок 2—3), магнитная проницаемость материала сердечника значительно уменьшается и соответственно уменьшается индуктивное сопротивление основной обмотки. При неизменном значении приложенного напряжения ток в основной обмотке значительно увеличивается (ср. кривые 2 и 1). Из этого также следует, что изменением постоянного тока в обмотке подмагничивания (в управляющей цепи) можно изменять значение переменного тока в основной обмотке, т. е. в управляемой цепи.

Рассмотренная схема дросселя насыщения имеет существенный недостаток — переменный магнитный поток индуцирует в обмотке  $N_0$  переменную э.д.с., поэтому в управляющей цепи возникает переменная составляющая тока, которая искажает процесс. Этот недостаток можно устранить, если каждую из обмоток ( $N_1$  и  $N_0$ ) выполнить из двух одинаковых частей и расположить на двух сердечниках (рис. 10.28, а). Две части каждой обмотки соединяются между собой последовательно, но части обмотки переменного тока ( $N_{11}$ ) включаются согласно, а части



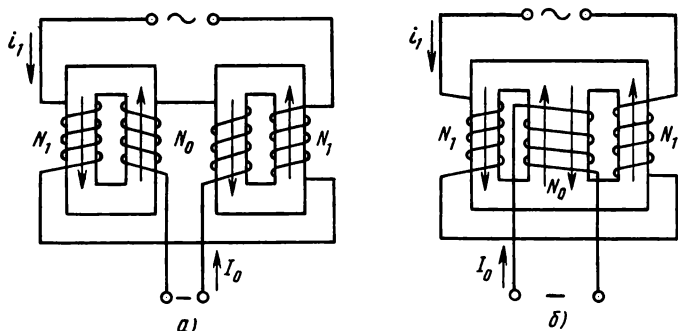


Рис. 10.28

обмотки постоянного тока — встречно. При таком включении в управляющей обмотке индуктируются две равные э.д.с., направленные встречно, а результирующая э.д.с. в управляющей цепи равна нулю и переменная составляющая тока не возникает.

Такой же результат достигается в дросселе с трехстержневым сердечником (рис. 10.28, б), если управляющая обмотка  $N_0$  расположена на среднем стержне, а обмотка переменного тока разделена на две одинаковые части, которые расположены на крайних стержнях и соединены последовательно согласно. При таком включении переменные составляющие магнитного потока в среднем стержне направлены противоположно, поэтому результирующий переменный магнитный поток в нем равен нулю и переменная э.д.с. в управляющей обмотке не индуцируется.

Дроссели насыщения позволяют регулировать ток или напряжение в электрической цепи переменного тока, мощность которой может быть во много раз больше мощности управляющей цепи.

В связи с этим дроссели насыщения применяют в различных схемах магнитных усилителей мощности, тока и напряжения.

Если в цепь переменного тока трехстержневого дросселя насыщения последовательно с обмоткой  $N_1$  включить нагрузочное сопротивление  $R_n$ , то получится простейшая схема магнитного усилителя (рис. 10.29). При подаче сигнала на управляющую обмотку индуктивное сопротивление обмотки  $N_1$  в управляемой цепи уменьшается, а ток увеличивается, поэтому увеличиваются напряжение и мощность на выходе усилителя.

Основной характеристикой магнитного усилителя является зависимость действующей величины тока в нагрузке от тока управления  $I_n = f(I_{уп})$ , которую называют характеристикой управления (рис. 10.29, б). Коэффициент усиления применительно к усилителям мощности определяют выражением  $k_p =$

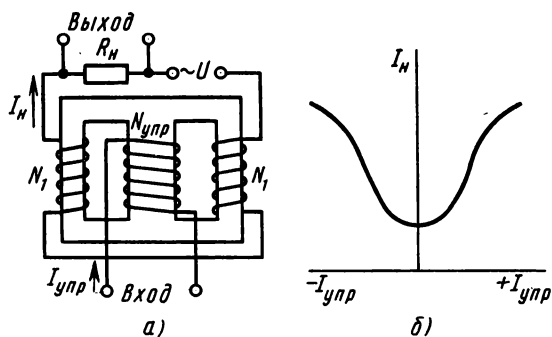


Рис. 10.29

$= \Delta P_n / \Delta P_{упр} = I_n^2 R_n / I_{упр}^2 R_{упр}$ , где  $R_{упр}$  — сопротивление управляющей обмотки.

Дроссели насыщения, предназначенные для работы в схемах магнитных усилителей, изготавливают на сердечниках из трансформаторной стали, если требуется относительно большая выходная мощность, а коэффициент усиления в пределах 10—1000.

В схемах автоматики часто требуется большое усиление слабых сигналов, тогда применяют сердечники из железоникелевых сплавов (пермаллоев), которые имеют большую магнитную проницаемость в слабом магнитном поле и насыщаются при небольшом увеличении напряженности магнитного поля (см. кривую  $B=f(H)$  на рис. 3.12, б).

Благодаря большой величине магнитной проницаемости при отсутствии подмагничивания постоянным током (при холостом ходе) усилитель имеет малый ток в основной обмотке и малые потери энергии. Переход сердечника в состояние магнитного насыщения при подаче слабого сигнала позволяет получить большой коэффициент усиления по мощности ( $k_p = 1000 \div 10\,000$  и более), а по напряжению ( $k_u$ ) может достигать десятков и даже сотен тысяч.

Магнитный усилитель по схеме рис. 10.29, а работает одинаково независимо от направления тока в обмотке управления, так как кривая намагничивания симметрична относительно начала координат. Магнитные усилители такого типа называют односторонними (неревверсивными).

Если требуется, чтобы усилитель реагировал на изменение полярности входного сигнала, применяют дроссель с начальным подмагничиванием постоянным током (рис. 10.30).

Для этого на том же стержне дросселя, кроме управляющей обмотки, располагают обмотку начального подмагничивания  $N_0$ ,

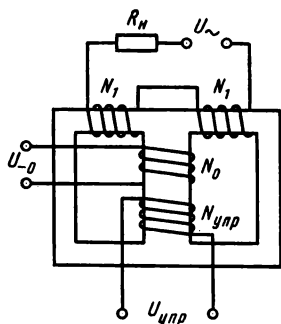


Рис. 10.30

в которой направление постоянного тока не изменяется. При одной полярности управляющего сигнала намагничивающие силы этих обмоток складываются, а при другой вычитаются, чем и обеспечивается различие токов в управляемой цепи.

В устройствах автоматики бывает необходимо, чтобы при отсутствии входного сигнала напряжение на выходе было равно нулю, а при изменении полярности управляющего сигнала фаза выходного напряжения изменялась бы на  $180^\circ$ .

Этим требованиям отвечает дифференциальная схема (рис. 10.31), в которой имеется два одинаковых дросселя, собранных по схеме рис. 10.30.

Обмотки переменного тока  $N_1$  включены через общее нагрузочное сопротивление  $R_H$  к двум одинаковым секциям питающего трансформатора  $T_p$ . Обмотки начального подмагничивания  $N_0$  соединены последовательно и подключены к источнику постоянного напряжения  $U_0$ . Управляющие обмотки  $N_{упр}$  тоже соединены последовательно, а намотаны так, что при подаче сигнала их намагничивающая сила в одном дросселе (на рис. 10.31 в левом) складывается с намагничивающей силой обмотки начального подмагничивания, а в другом вычитается. При отсутствии управляющего сигнала ток в нагрузке  $I_H = 0$ , так как составляющие его два тока в данной симметричной схеме равны по значению, но направлены противоположно.

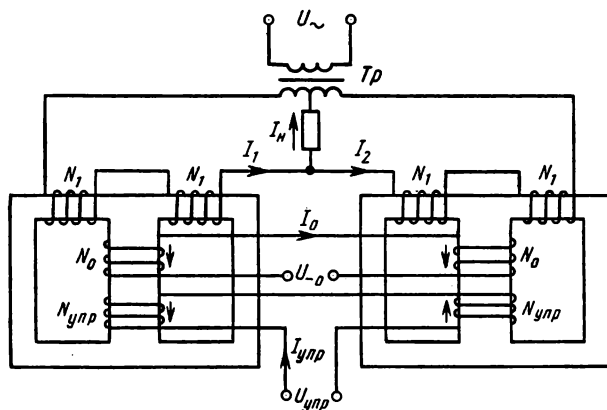


Рис. 10.31

При подаче сигнала переменный ток в обмотке  $N_1$  слева увеличивается, а справа уменьшается, поэтому появляется ток в нагрузке. Аналогично действует схема при изменении полярности управляющего сигнала, но при этом преобладает ток правого дросселя, а фаза общего нагрузочного тока изменяется на  $180^\circ$ .

Такой же результат дают мостовая и трансформаторная схемы магнитных усилителей. Для увеличения коэффициента усиления и схемы магнитных усилителей вводят обратную связь, например, так, как показано на рис. 10.32 применительно к дроссельному магнитному усилителю. В цепь переменного тока включен выпрямитель  $B$  по мостовой схеме. Выпрямленный ток направляется в обмотку обратной связи и таким образом создается дополнительное подмагничивание. В результате чувствительность усилителя к входным сигналам значительно увеличивается, т. е. управление выходным током возможно при гораздо меньших изменениях управляющего тока, чем без обратной связи.

Магнитные усилители, как и все устройства, обладающие индуктивностью, имеют магнитную инерцию, которая в данном случае проявляется тем, что от момента подачи управляющего сигнала до соответствующих изменений выходных величин проходит некоторое время. Уменьшение инерционности достигается увеличением частоты питающего источника, однако этот путь ведет к усложнению установок и росту магнитных потерь в сердечниках.

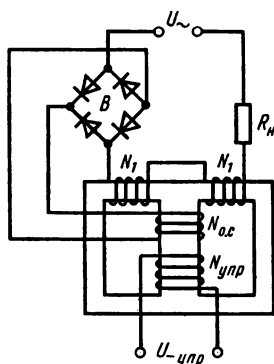


Рис. 10.32

### Контрольные вопросы

1. Какая связь между вольт-амперными характеристиками  $I$  дросселей (см. рис. 10.25) и характеристиками намагничивания материалов их сердечников?
2. Почему ферромагнитные стабилизаторы напряжения работают только в цепях переменного тока?
3. Какую роль в работе магнитного усилителя играет подмагничивание его сердечника постоянным током?
4. Почему магнитные усилители большой мощности изготавливают на ферромагнитных сердечниках из трансформаторной стали, а для усиления слабых сигналов применяют сердечники из железоникелевых сплавов (пермаллоев)?
5. Какую роль играет обратная связь в магнитном усилителе?

## § 10.7. ИМПУЛЬСНЫЕ ФЕРРОМАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В устройствах автоматики широко применяются элементы дискретного действия. Из таких элементов ранее были рассмотрены электромеханические реле, шаговые распределители (переключатели), шаговые электродвигатели.

С развитием и широким внедрением в практику цифровых вычислительных и управляющих машин появилась потребность в элементах дискретного действия: высоконадежных в эксплуатации, простых по устройству, малогабаритных, дешевых. Этим требованиям, связанным с многочисленностью таких элементов (десятки и сотни тысяч в одной машине), отвечают различные по принципу действия бесконтактные элементы дискретного действия — электронные, ферромагнитные, комбинированные. Широко применяются, в частности, ферромагнитные элементы: бесконтактные реле, устройства для формирования и передачи импульсов, логические элементы, запоминающие устройства и др.

Ферромагнитные элементы цифровых вычислительных и управляющих машин создаются с использованием ферромагнитных материалов с прямоугольной петлей магнитного гистерезиса (рис. 10.33). Чаще всего применяют ферритовые сердечники, которые изготовляют методами порошковой металлургии из оксидов железа ( $\text{Fe}_2\text{O}$ ), магния ( $\text{MgO}$ ), марганца ( $\text{MnO}$ ), иногда с добавками других оксидов.

**Ферромагнитные бесконтактные реле.** Магнитный усилитель с обратной связью можно перевести в релейный режим, если эту связь сделать достаточно сильной.

Отношение напряженности магнитного поля обмотки обратной связи к соответствующей напряженности переменного поля при отсутствии тока в обмотке управления называют коэффициентом обратной связи  $k_{o.c} = H_{o.c}/H_n$ . Этот коэффици-

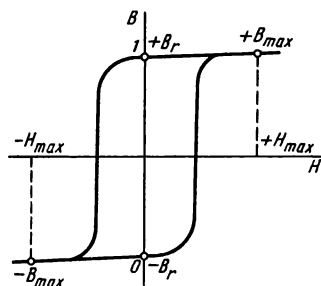


Рис. 10.33

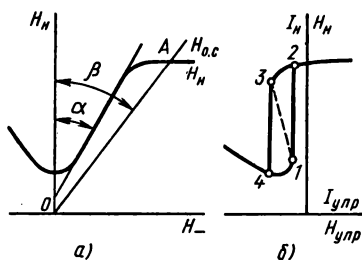


Рис. 10.34

ент для данного усилителя постоянный, поэтому зависимость  $H_n = f(H_{o.c})$  выражается прямой линией  $OA$  (рис. 10.34,  $a$ ), наклон которой (угол  $\beta$ ) к оси ординат зависит от величины  $k_{o.c}$ . Изменяя ее, можно изменять ход характеристики управления.

Положение и крутизна правой ветви характеристики управления усилителя без обратной связи определяются углом  $\alpha$ . Если  $\beta > \alpha$ , то характеристика управления усилителя с обратной связью становится аналогичной характеристике реле (ср. рис. 10.34,  $b$  и 10.20,  $a$ ). Построение характеристики управления выполнено в данном случае с учетом того, что общая напряженность магнитного поля подмагничивания  $H$  складывается из напряженности поля обратной связи  $H_{o.c}$  и управляющего поля  $H_{упр}$ , т. е.  $H_{упр} = H - H_{o.c}$ . При постепенном увеличении управляющего тока (и пропорциональной ему величины  $H_{упр}$ , начиная с отрицательных значений) переменный ток в нагрузке плавно изменяется по нижней ветви кривой до точки 1, а затем скачком увеличивается до точки 2 и далее снова изменяется плавно. Уменьшение управляющего тока вызывает плавное изменение нагрузочного тока до точки 3, а затем скачком в точку 4 и далее плавно по нижней ветви. Такая характеристика напоминает характеристику поляризованного реле с односторонним преобладанием. Если применить дополнительную обмотку постоянного подмагничивания током положительной полярности, можно всю характеристику управления сместить вправо и получить двухпозиционное бесконтактное реле без преобладания или далее с преобладанием в другую сторону.

**Феррорезонансное реле.** Для создания бесконтактных реле используется также явление феррорезонанса. В схемах феррорезонансных реле нет обмоток обратной связи и выпрямителей, поэтому они более надежны, особенно на высоких частотах (несколько мегагерц), а их быстроедействие позволяет делать сотни тысяч переключений в секунду.

В феррорезонансном контуре к индуктивной катушке (к обмотке переменного тока, расположенной на ферромагнитном сердечнике) конденсатор включен последовательно (резонанс напряжений) или параллельно (резонанс токов).

Явление феррорезонанса напряжений рассмотрим с помощью схемы рис. 10.35,  $a$ , где последовательно соединены катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником  $L$ , конденсатор  $C$  и нагрузочный резистор  $R_n$ . При таком соединении ток  $i$  в цепи отстает от напряжения  $u_L$  на катушке на  $90^\circ$  и опережает напряжение  $u_C$  на конденсаторе тоже на  $90^\circ$  (потери энергии в катушке и конденсаторе приняты равными нулю, а ток в цепи — синусоидальным). Следовательно, векторы напряжений  $U_L$  и  $U_C$  находятся в противофазе (рис. 10.35,  $b$ ), Входное напряжение  $U$  на зажи-

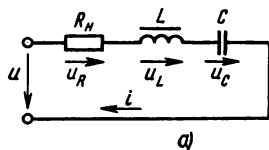
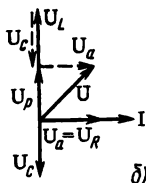


Рис. 10.35



мах цепи уравновешено суммой активного  $U_a = U_p$  и реактивного  $U_p = U_L - U_C$  падений напряжения:  $U = U_a + U_p$ .

Вольт-амперная характеристика катушки  $U_L(I)$  по форме повторяет характеристику намагничивания (рис. 10.36); характеристика конденсатора  $U_C(I)$  — прямая, проходящая через начало координат ( $U_C = IX_C$ ).

Величину емкости можно подобрать так, что прямая  $U_C(I)$  пересекает кривую  $U_L(I)$  в некоторой точке  $A$ , которая является точкой резонанса. В этой точке величины  $U_L$  и  $U_C$  одинаковы, а их разность  $U_p$  равна нулю (кривая  $U_p(I)$  имеет точку на оси ординат). На рис. 10.36 построены также вольт-амперная характеристика резистора  $U_R(I)$  и общая характеристика цепи  $U(I)$  с учетом активного падения напряжения:  $U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}$ .

График  $U(I)$  показывает, что с ростом напряжения ток в цепи сначала плавно увеличивается от 0 до  $I_2$  (участок 0—2), затем скачком увеличивается до  $I_4$  (участок 2—4) и далее снова плавно уменьшается до  $I_3$  (участок 4—3), а затем скачком уменьшается до  $I_1$  (участок 3—1) и далее опять уменьшается плавно.

Характер изменения тока в данном случае такой же, как у рассмотренного ранее ферромагнитного реле с обмоткой обратной связи.

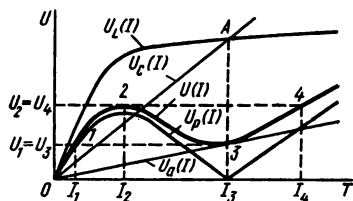


Рис. 10.36

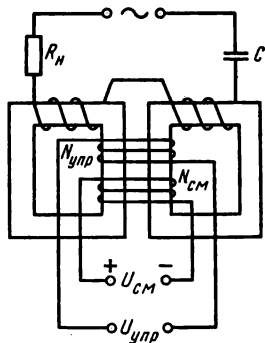


Рис. 10.37

Схема одного из типов феррорезонансного реле приведена на рис. 10.37. Кроме основной обмотки переменного тока на сердечнике имеются две обмотки постоянного тока: обмотка управления  $N_{упр}$  и обмотка смещения  $N_{см}$ . При подмагничивании магнитным полем постоянного тока уменьшается магнитная проницаемость  $\mu$  материала сердечника, поэтому уменьшаются индуктивное сопротивление основной обмотки и падение напряжения в ней.

Следовательно, изменение тока в обмотке управления влияет на вольт-амперную характеристику контура. Это показано на рис. 10.38, а, где изображены характеристики  $U(I)$ , соответствующие различным величинам тока  $I_{упр}$  ( $I_{упр1} > I_{упр2} > I_{упр3}$ ). С помощью этих характеристик можно проследить релейное действие данной схемы при неизменной амплитуде синусоидального напряжения  $U$  в рабочей цепи.

Если ток в обмотке управления  $I_{упр} < I_{упр1}$ , то в рабочей цепи ток  $I$  не превышает значения  $I_1$  ( $I \leq I_1$ ). При плавном увеличении управляющего тока  $I_{упр}$  рабочий ток  $I$  также плавно увеличивается до  $I_3$  (рабочая точка переходит с одной характеристики на другую, а при токе  $I_3$  она находится на характеристике  $I_{упр3}$ ), после чего скачком увеличивается до  $I_2$ , а затем опять плавно увеличивается.

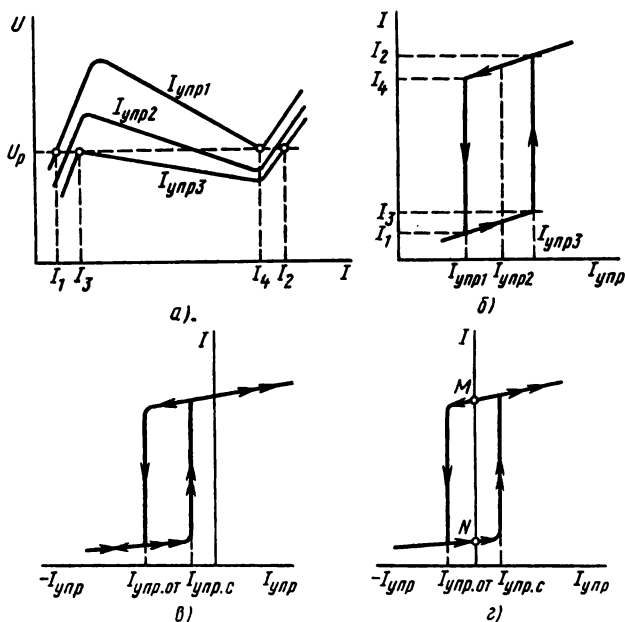


Рис. 10.38



При уменьшении управляющего тока  $I_{упр}$  рабочий ток  $I$  сначала плавно уменьшается до величины  $I_4$ , а затем скачком до  $I_1$  (см. также рис. 10.38, а).

**Режимы феррорезонансного реле.** Релейную характеристику  $I(I_{упр})$  можно смещать вдоль оси абсцисс, причем направление и величина смещения зависят от направления и величины постоянного тока в обмотке смещения  $N_{см}$ . В зависимости от положения релейной петли относительно оси ординат различают три режима реле: повторитель, инвертор, триггер (рис. 10.38). Режиму повторителя соответствует положение релейной петли справа от оси ординат. В этом случае по сигналу на входе (ток  $I_{упр}$  в обмотке управления) выходная величина (ток  $I$  в рабочей обмотке) скачком изменяется от минимального до максимального значения (рис. 10.38, б).

В режиме инвертора (рис. 10.38, в) релейная петля смещена в положение слева от оси ординат, выходная величина скачком изменяется от максимального до минимального значения по соответствующему сигналу на входе (если в режиме повторителя сигнальный ток  $I_{упр}$  в обмотке управления считать положительным, то в режиме инвертора сигнальный ток имеет противоположное направление, т. е. он отрицательный).

Положение релейной петли в триггерном режиме показано на рис. 10.38, г, из которого следует, что при отсутствии сигнала на входе выходная величина может иметь как максимальное, так и минимальное значения, что зависит от предшествующего состояния реле. Предположим, что до данного момента последний сигнал на входе был положительным ( $+I_{упр}$ ). Выходная величина, приняв максимальное значение, остается такой и после снятия сигнала (состояние реле характеризуется точкой  $M$ ). Только при возникновении отрицательного сигнала выходная величина скачком изменится до минимального значения и останется такой при отсутствии сигнала (точка  $N$ ). Повторный переход из точки  $N$  в точку  $M$  произойдет, если снова на вход будет подан положительный сигнал.

**Запоминающие устройства цифровых вычислительных машин.** Действие цифровых вычислительных машин (ЦВМ) основано на двоичной системе счисления, в которой используются только две цифры 0 и 1. Применение двоичной системы обусловлено тем, что элементы, применяемые для записи цифр, наиболее надежно и стабильно работают, если имеют два устойчивых состояния, например контакт реле замкнут или разомкнут, электронная лампа заперта или открыта, магнитный сердечник насыщен до состояния  $+B$ , или  $-B$ , и т. п. При этом одно состояние выражает цифру 1, а другое — 0.

Свойство ферромагнитного сердечника сохранять сколь угодно

но долго состояние остаточного магнетизма вместе с возможностью перемагничивания от  $+B_r$  до  $-B_r$  позволяет запоминать информацию в виде остаточной магнитной индукции и передавать информацию в виде электрических импульсов в другие элементы.

Запоминающие устройства (ЗУ) цифровых вычислительных машин делят на оперативные (ОЗУ) и внешние (ВЗУ). В оперативных запоминающих устройствах применяют чаще всего ферритовые сердечники диаметром 0,4—1 мм. Такой сердечник и три обмотки на нем образуют ячейку памяти (рис. 10.39), которая обеспечивает возможность записи, хранения и считывания информации. Предположим, что сердечник в состоянии остаточной намагниченности имеет магнитную индукцию  $-B_r$ , т. е. выражает цифру 0.

Для того чтобы записать 1, в обмотку записи  $N_1$  подают импульс тока  $i_z$ , величина и полярность которого соответствуют напряженности магнитного поля  $+H_{\max}$ . В результате магнитная индукция в сердечнике изменяется от  $-B_r$  до  $+B_{\max}$ , поэтому в выходной обмотке  $N_3$  индуцируется импульс э.д.с. отрицательной полярности с амплитудой  $E_1$ . С уменьшением тока при окончании импульса записи магнитная индукция уменьшается до остаточной величины  $+B_r$ , т. е. в сердечнике будет записана 1.

Считывание 1 выполняется при подаче импульса тока  $i_c$  отрицательной полярности в обмотку считывания  $N_2$ , при котором создается напряженность поля  $-H_{\max}$ . Магнитная индукция при этом изменяется от  $+B_r$  до  $-B_{\max}$ , а в выходной обмотке  $N_3$  наводится импульс э.д.с.  $E_1$  положительной полярности, который выражает факт считывания. При уменьшении тока в конце импульса считывания магнитная индукция изменяется от  $-B_{\max}$  до  $-B_r$  и в обмотке  $N_3$  наводится э.д.с.  $E_1$  отрицательной полярности. Далее сердечник остается в состоянии остаточной намагниченности с индукцией  $-B_r$ , что соответствует записи 0.

Импульс тока  $i_c$  в обмотку  $N_2$  подается и при считывании 0. Магнитная индукция при этом уменьшается от  $-B_r$  до  $-B_{\max}$ , а по окончании действия импульса она снова изменяется от  $-B_{\max}$  до  $-B_r$ ; в выходной обмотке  $N_3$  наводится импульс э.д.с.  $E_2$ , а сердечник остается в прежнем состоянии с остаточной магнит-

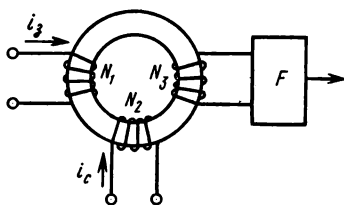


Рис. 10.39

ной индукцией —  $B_r$ . Импульсы э.д.с.  $E_1$  и  $E_2$ , наводимые в выходной обмотке  $N_3$ , воспринимает формирователь сигналов  $F$ , который усиливает импульс, соответствующий 1, и подавляет импульс, выражающий 0.

Так с помощью ферритовых сердечников выполняются запись и считывание информации. Формирование и передача импульсов происходят также в различных переключающих устройствах на ферритовых сердечниках, к числу которых можно отнести логические элементы, сдвиговые регистры, дешифраторы, триггерные схемы.

Для построения внешних запоминающих устройств применяются в основном элементы с магнитной записью — магнитные ленты, барабаны, диски. Информация в них записывается и хранится в тонком (10—30 мкм) слое ферромагнитного материала, который наносят на поверхность запоминающих устройств с помощью лака, содержащего мельчайшие частицы ферромагнитного порошка, или гальваническим способом. Запись и считывание информации в данном случае происходит так же, как запись и воспроизведение звука магнитофоном, с помощью специальных электромагнитов — магнитных головок.

Магнитная головка состоит из сердечника с воздушным зазором и обмотки (рис. 10.40). Для записи информации в обмотку головки подаются импульсы тока, вследствие чего создаются импульсы магнитного потока. При наличии воздушного зазора в сердечнике магнитный поток замыкается через слой ферромагнитного материала, в котором происходит местное намагничивание.

В процессе записи поверхность, несущая ферромагнитный слой, равномерно движется относительно магнитной головки (зазор между ними всего десятки микрон), поэтому каждый импульс оставляет в этом слое свой след — элементарный намагниченный участок, причем характер намагниченности зависит от полярности импульса тока. Информацию можно записать по двум или трем уровням. В первом случае 1 записывается однополярным импульсом, а 0 — отсутствием импульса. В этом случае надежность запоминающего устройства снижена тем, что цифра 0 и отсутствие информации изображаются одинаково.

Более надежной является запись по трем уровням, когда 1 и 0 записываются импульсами тока разной полярности, а отсутствие импульса означает отсутствие информации.

Для считывания информации

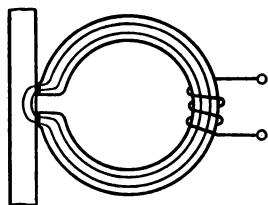


Рис. 10.40

поверхность запоминающего устройства пропускают под той же или аналогичной по устройству магнитной головкой и в тот момент, когда мимо нее проходит намагниченный участок, в сердечнике возникает импульс магнитного потока, который в обмотке, расположенной на сердечнике, наводит импульс э.д.с. считывания.

Импульсы э.д.с. возникают при считывании 1 и 0, но они отличаются полярностью и это дает возможность расшифровать записанную ранее информацию, которая в данном случае сохраняется (не стирается) в процессе считывания. Для стирания ее (при необходимости) применяют специальную магнитную головку, в обмотке которой создается переменный ток с постоянно убывающей амплитудой, чем достигается полное размагничивание ферромагнитной поверхности.

### *Контрольные вопросы*

1. Почему вольт-амперная характеристика  $U_L(I)$  катушки с ферромагнитным сердечником по форме повторяет характеристику намагничивания материала сердечника  $B(H)$ ?

2. Феррорезонансное реле может быть в режимах повторителя и инвертора. В чем состоит основное различие этих режимов?

3. В чем состоит основная особенность действия триггера?

4. Почему для изготовления ферромагнитных запоминающих элементов ЦВМ применяют магнитные материалы с прямоугольной петлей магнитного гистерезиса?

5. Почему полное размагничивание ферромагнитного сердечника катушки достигается в том случае, если в обмотке имеется переменный ток с плавно убывающей амплитудой?

## ГЛАВА 11

### ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Во всех отраслях народного хозяйства для выполнения технологических и иных производственных операций применяют многочисленные машины — орудия, или рабочие машины и механизмы различного назначения (металлорежущие станки, прокатные станы, подъемно-транспортные механизмы, насосы, вентиляторы, молотилки, зерноочистительные, мукомольные, швейные, обувные и т. д.).

Рабочая машина приводится в движение машиной-двигателем посредством передаточного механизма (муфты, зубчатого редуктора, ременной передачи и т. п.). Машину-двигатель и передаточный механизм объединяют общим названием **привод**.

В настоящее время большинство рабочих машин приводят в движение электродвигателями и соответственно такой привод

называют электрическим. Современное производство в большинстве случаев требует той или иной степени автоматизации электроприводов, начиная с относительно простых операций дистанционного пуска и остановки и кончая выполнением функций регулирования и управления сложными взаимосвязанными комплексами различных производственных механизмов. Автоматическое управление электроприводами, составляющее основу автоматизированного производства, имеет большое народнохозяйственное значение.

### **§ 11.1. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО МЕХАНИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ**

Преимущества электропривода в сравнении с другими типами привода (с применением двигателей внутреннего сгорания, паровых и гидравлических турбин и т. д.) связаны с положительными свойствами электродвигателей: диапазон мощностей, на которые строят электродвигатели, весьма широк — от нескольких ватт до десятков тысяч киловатт; частоту вращения электродвигателей можно регулировать в широких пределах (в отношении 1:100 и более); механические характеристики электродвигателей удовлетворяют всем требованиям рабочих машин; управление электродвигателями очень простое и не требует от оператора больших физических усилий; электродвигатели дают возможность в высокой степени автоматизировать производственные процессы.

Однако из этого не следует, что все вопросы электропривода решаются просто, так как функции рабочих машин, их конструкции, условия работы, а следовательно, и требования к приводу очень разнообразны.

**Механические характеристики электроприводов.** При изучении электрических машин для каждого типа электродвигателя была рассмотрена его механическая характеристика  $n = f(M)$  — зависимость частоты вращения от вращающего момента (см. рис. 8.11 и 9.21).

Аналогичными зависимостями  $n = f(M_c)$  характеризуются рабочие машины с той лишь разницей, что по оси абсцисс откладывают величины момента сопротивления, приведенного к валу двигателя.

Вследствие большого разнообразия производственных механизмов различны и их механические характеристики, но тем не менее их можно объединить в четыре основные группы (рис. 11.1).

1. *Момент сопротивления не зависит от скорости (прямая 1).* Такого типа механическую характеристику имеют подъемные

краны, лебедки, механизмы подачи металлорежущих станков, конвейеры с постоянной массой передвигаемого материала и т. п. К этой группе можно отнести все механизмы, у которых момент сопротивления создается в основном силами трения, которые мало меняются в рабочих пределах изменения скорости.

2. Момент сопротивления увеличивается по линейному закону с увеличением скорости (прямая 2). Примером такой зависимости является механическая характеристика генератора постоянного тока с независимым возбуждением, если к нему в качестве нагрузки подключен приемник электрической энергии с постоянным сопротивлением.

3. Момент сопротивления изменяется обратно пропорционально скорости (кривая 3). Такую механическую характеристику имеют некоторые металлорежущие станки (токарные, фрезерные и др.), моталки в металлургической промышленности и др.

4. Момент сопротивления увеличивается по нелинейному (параболическому) закону с увеличением скорости (кривая 4). Подобную механическую характеристику имеют вентиляторы, центробежные насосы, гребные винты и т. д.

**Выбор электродвигателя по механическим характеристикам.** При выборе типа электродвигателя к данной рабочей машине необходимо прежде всего проверить соответствие друг другу их механических характеристик, обеспечивающее устойчивую работу привода.

На рис. 11.1 вместе с типовыми механическими характеристиками рабочих машин показана механическая характеристика двигателя постоянного тока параллельного возбуждения (прямая 5). Она пересекает кривую 4 в точке *a*, которая соответствует устойчивой работе привода с частотой вращения  $n_1$ , при равенстве моментов:  $M_{д1} = M_{с1}$ .

При изменении нагрузки на валу двигателя равенство моментов нарушится, что повлечет за собой постепенное изменение частоты вращения. Например, при увеличении нагрузки до  $M_{с2}$  ( $M_{д2} < M_{с2}$ ) частота вращения уменьшается, а момент двигателя увеличивается и этот переходный процесс закончится, когда равенство моментов восстановится ( $M_{д2} = M_{с2}$ ) при частоте вращения  $n_2$  ( $n_2 < n_1$ ), после чего привод снова будет работать устойчиво.

Для выбора типа электродвигателя важно значение имеют

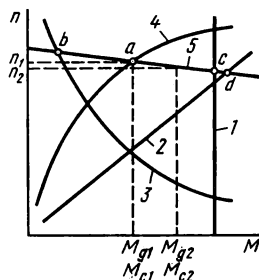


Рис. 11.1

требования производственного механизма в части регулирования скорости привода. Можно назвать немало рабочих машин, скорость которых остается практически постоянной (механизм передвижения подъемного крана, вентилятор и др.). Для привода подобных рабочих машин соответствует электродвигатель с жесткой механической характеристикой.

В других случаях, например, больше подходит мягкая механическая характеристика электродвигателя.

Некоторые производственные механизмы требуют точной синхронизации вращения отдельных частей или автоматического изменения частоты вращения двигателя.

**Выбор конструктивного типа электродвигателя.** Электродвигатели изготавливают, учитывая: способ сопряжения их с рабочими машинами (горизонтальное или вертикальное расположение вала, фланцевое крепление, на стояковых или щитовых подшипниках и т. д.); способ защиты от воздействия окружающей среды; способ охлаждения (вентиляции).

Для того чтобы конструкции электродвигателей наиболее полно соответствовали условиям окружающей среды, помещения, где они могут быть установлены, разделены на следующие типы: сухие отапливаемые; сухие неотапливаемые; открытый воздух; сырые; пыльные различных категорий; сырые и пыльные; с едкими парами и газами; пожароопасные; взрывоопасные.

В соответствии с этой классификацией помещений и в целях защиты от неблагоприятного или даже вредного взаимного влияния электродвигателей и окружающей среды изготавливают следующие конструктивные типы электродвигателей: *открытые* (без специальных приспособлений, закрывающих вращающиеся и токоведущие части); *защищенные* (с приспособлениями для защиты от попадания внутрь электродвигателя мелких предметов); *влагозащищенные* (с приспособлениями, препятствующими попаданию внутрь электродвигателя капель, брызг, грязи); *закрытые* (с естественным охлаждением через наружную поверхность корпуса); *закрытые обдуваемые* (с охлаждением посредством обдувания поверхности корпуса вентилятором, установленным на валу электродвигателя); *закрытые продуваемые* (с охлаждением посредством продувания воздуха внутри электродвигателя отдельным вентилятором); *взрывобезопасные* (с повышенной прочностью корпуса, обеспечивающей локализацию возможного взрыва только внутри электродвигателя); *герметические* (с полной изоляцией внутренней части электродвигателя от окружающей среды).

Кроме перечисленных типов изготавливают электродвигатели с противосыростной и противокислотной изоляцией; электродвигатели в тропическом исполнении (для работы в условиях жарко-

го влажного климата при температуре окружающей среды  $50^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности воздуха  $95\%$ ).

При выборе электродвигателя нужно учитывать и его экономические показатели: к.п.д.,  $\cos \varphi$ , стоимость, габариты и массу, надежность в эксплуатации и др.

### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Механическая характеристика электродвигателя (см. рис. 11.1, прямая 5) пересекает характеристики производственных механизмов в точках  $a, b, c, d$ . Будет ли устойчивой работа электропривода в сочетании данного электродвигателя с каждым из представленных механизмов?

2. Электродвигатели постоянного тока различают по схеме возбуждения: с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением. Какой из этих типов электродвигателей наиболее подходит по механическим характеристикам для привода подъемного механизма?

3. Для управления, контроля работы электродвигателя применяют различную аппаратуру (рубильники, контакторы, электроизмерительные приборы и др.). Входят ли эти аппараты и приборы в состав электропривода?

4. В сухом отапливаемом помещении, где по условиям работы можно установить защищенный электродвигатель, за неимением такого установили двигатель в закрытом исполнении. Какие недостатки в работе электропривода связаны с такой заменой?

5. При выборе электродвигателя в числе других показателей нужно учитывать его габариты и вес. Почему габариты и вес отнесены к экономическим показателям электродвигателей?

**Задача 11.1.** Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением имеет номинальные величины:  $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$ ,  $I_{\text{ном}} = 153 \text{ А}$ ,  $\eta = 0,89$ ,  $n_{\text{ном}} = 100 \text{ об/мин}$  и сопротивление цепи якоря  $R_{\text{я}} = 0,11 \text{ Ом}$ . Пренебрегая реакцией якоря и током холостого хода, построить механические характеристики двигателя: естественную и при добавочном сопротивлении в цепи якоря  $R_{\text{д}} = 0,39 \text{ Ом}$ .

**Задача 11.2.** Построить механическую характеристику трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором, для которого известны:  $P_{\text{ном}} = 35 \text{ кВт}$ ;  $n_{\text{ном}} = 730 \text{ об/мин}$ ; активное сопротивление фазы ротора  $R_2 = 0,01 \text{ Ом}$ ; индуктивное сопротивление фазы неподвижного ротора  $X_{2\text{н}} = 0,082 \text{ Ом}$ . *Пояснение:* механическую характеристику  $n = f(M)$  асинхронного трехфазного двигателя можно построить по четырем точкам, рассматривая режимы: 1) холостой ход; 2) номинальный; 3) критический ( $M_{\text{max}}$ ,  $s_{\text{max}}$ ); 4) начальный моменты пуска. Для определения частоты вращения и момента двигателя кроме приведенных ранее формул можно использовать приближенные выражения:  $s_{\text{max}} = R_2/X_{2\text{н}}$ ;  $M = \frac{2M_{\text{max}}}{s/s_{\text{max}} + s_{\text{max}}/s}$ , где  $M_{\text{max}}$  и  $s_{\text{max}}$  — момент и скольжение в критическом режиме.



## § 11.2. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ

Значение правильного расчета мощности электродвигателя велико, так как от этого в значительной степени зависят технические и экономические показатели работы электропривода.

При установке электродвигателя завышенной мощности увеличиваются капитальные затраты, снижаются к.п.д. двигателя, коэффициент мощности (в установках переменного тока), увеличивается непроизводительная нагрузка электрической сети.

Недостаточная мощность электродвигателя является причиной понижения производительности рабочей машины, а систематическая перегрузка электродвигателя ведет к преждевременному выходу его из строя и даже несет возможность аварии.

**Нагревание и охлаждение электродвигателей.** В работе электродвигатель нагревается за счет потерь энергии в нем. Предположим, что нагрузка электродвигателя и мощность потерь постоянны, т. е. количество теплоты, выделяемой в двигателе в единицу времени, не меняется ( $Q_1 = \text{const}$ ).

Часть этой теплоты  $Q_2$  передается окружающей среде, если температура двигателя превышает температуру среды. Принимая теплоотдачу пропорциональной разности температур двигателя и среды, можно представить процесс нагревания двигателя: температура его  $\theta$  растет до некоторой установившейся величины ( $\theta_{\text{уст}}$ ), при которой количество теплоты, передаваемой окружающей среде, равно количеству теплоты, выделяемой в двигателе за счет потерь энергии ( $Q_1 = Q_2$  при  $\theta = \theta_{\text{уст}}$ ). График изменения температуры двигателя в процессе нагрева показан на рис. 11.2 (кривая 1).

Если электродвигатель, нагретый в период работы, отключен от сети, то он постепенно охлаждается (график 2 на рис. 11.2), так как теплота в нем не выделяется ( $Q_1 = 0$ ), а в окружающую среду передается ( $Q_2 \neq 0$ ). При этих условиях температура двигателя уменьшается до тех пор, пока не сравняется с температурой окружающей среды.

Величина допустимой температуры ( $\theta_{\text{доп}}$ ) электродвигателя зависит от свойства изоляционных материалов, использованных в его конструкции.

По нагревостойкости электроизоляционные материалы делят на несколько классов (А, Е, В, Г, Н, С). Изоляция класса А (хлопчатобумажные ткани, пряжа, бумага и т. п.) имеет допустимую температуру 105 °С, а изоляция класса С (слюда, стекло, керамика и т. п.) допускает предельную температуру 180 °С. Остальные классы занимают промежуточные положения по на-

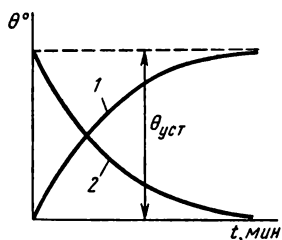


Рис. 11.2

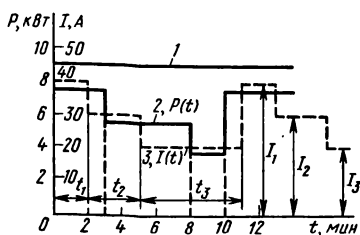


Рис. 11.3

гревостойкости, и это следует учитывать при выборе электродвигателей для заданных условий работы и их эксплуатации.

**Выбор электродвигателей по мощности.** Для выбора электродвигателя по мощности необходимо сопоставить потребную (расчетную) мощность рабочей машины  $P_p$  с номинальной мощностью электродвигателя  $P_{ном}$ . Электродвигатель выбирают по каталогу согласно условию, по которому его номинальная мощность должна быть равна или несколько больше потребной мощности рабочей машины:

$$P_{ном} \geq P_p. \quad (11.1)$$

Условиями работы производственных механизмов определяются режимы работы электродвигателей, которые по принятой классификации разделены на восемь групп. Из них рассмотрим три режима.

1. *Продолжительный режим.* В этом режиме продолжительность работы такова, что все части электродвигателя нагреваются до установившейся температуры ( $\theta_{уст}$  на рис. 11.2). Нагрузка в продолжительном режиме может быть постоянной или переменной, что видно на рис. 11.3, где показаны примеры нагрузочных диаграмм продолжительного режима: график 1 — с постоянной нагрузкой, графики 2, 3 — с переменной нагрузкой. На нагрузочных диаграммах выражают в зависимости от времени мощность  $P=f(t)$  (график 2), ток  $I=f(t)$  (график 3) или момент  $M=f(t)$ .

С постоянной длительной нагрузкой работают электроприводы центробежных насосов и вентиляторов, отдельных типов конвейеров и трансформаторов и некоторых других машин.

В этом случае потребная мощность может быть непосредственно указана на нагрузочной диаграмме или ее определяют по формулам, каждая из которых соответствует данному типу рабочих машин.

В качестве примера далее приведены формулы, по которым

определяют потребляемую мощность  $P_p$  для насоса

$$P_{p.н} = \frac{v\gamma Hg}{\eta_n \eta_p} \quad (11.2)$$

и для вентилятора

$$P_{p.в} = \frac{vP}{\eta_v \eta_n} \quad (11.3)$$

В этих формулах:  $v$  — производительность насоса или вентилятора,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\gamma$  — плотность перекачиваемой жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $H$  — расчетная высота подъема жидкости,  $\text{м}$ ;  $g = 9,8 \text{ м}/\text{с}^2$  — ускорение свободного падения;  $P$  — давление на выходе вентилятора,  $\text{Па}$ ;  $\eta_n$ ;  $\eta_v$  — к.п.д. насоса или вентилятора;  $\eta_n$  — к.п.д. механической передачи.

В режиме продолжительной переменной нагрузки работают электродвигатели привода продольно-строгальных станков, эскалаторов и т. д.

Согласно нагрузочной диаграмме нагрузка двигателя непрерывно изменяется, поэтому изменяется и температура двигателя. Однако процессы нагревания и охлаждения двигателя имеют большую инерцию, поэтому допустимо фактический график заменить усредненным.

Расчеты, необходимые для выбора двигателя по мощности, чаще всего выполняют методом эквивалентных величин (тока, момента, мощности). Применяют еще более точный, но и более трудоемкий, метод средних потерь [7].

Эквивалентный ток  $I_{\text{эк}}$  — постоянная величина тока, при которой мощность потерь в двигателе численно такая же, как при фактически изменяющемся токе нагрузки.

Значение эквивалентного тока  $I_{\text{эк}}$  определяют в следующем порядке: нагрузочную диаграмму делят на  $n$  участков (чем больше  $n$ , тем точнее расчет); в пределах продолжительности  $t_n$  каждого участка значение тока принимают постоянным, равным некоторому среднему значению  $I_n$ .

Эквивалентный ток определяют по формуле

$$I_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (11.4)$$

Двигатель по каталогу выбирают по условию  $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{эк}}$ , которое непосредственно следует из условия (11.1). Эквивалентная мощность  $P_{\text{эк}}$  или эквивалентный момент определяют в таком же порядке и по аналогичным формулам, в которые вместо тока  $I_n$  вводят усредненные на каждом участке величины мощности  $P_n$  или момента  $M_n$ .

2. *Кратковременный режим.* В данном случае периоды работы с постоянной нагрузкой (рис. 11.4) чередуются с периодами отключения электродвигателя, причем в периоды работы температура его не достигает установившегося значения, а периоды остановки настолько продолжительны, что двигатель охлаждается до температуры окружающей среды. В таком режиме работают, например, электроприводы разводных мостов, шлюзов и др.

Для кратковременного режима заводы выпускают электродвигатели специального исполнения с нормированной продолжительностью работы 10, 30, 60, 90 мин. При неизменной кратковременной нагрузке электродвигатель выбирают также по условию (11.1) с учетом фактической продолжительности работы.

Если действительное время работы отличается от нормированного или вместо двигателя специального хотят использовать двигатель, рассчитанный для продолжительного режима работы, то находят расчетную нагрузку, при которой электродвигатель будет полностью использован по нагреву [7]. Если момент и мощность двигателя пропорциональны току, а нагрузочная диаграмма задана в форме зависимости  $M = f(t)$  или  $P = f(t)$ , то определяют эквивалентный момент или эквивалентную мощность.

3. *Повторно-кратковременный режим.* В этом режиме периоды работы при постоянной нагрузке  $P_n$  (рис. 11.5) чередуются с периодами отключения (паузами), но продолжительность их невелика, поэтому двигатель не успевает нагреваться до установившейся температуры за время рабочего периода ( $t_p$ ) и охлаждаться до температуры окружающей среды за время паузы ( $t_n$ ). Время цикла  $t_u = t_p + t_n$  не превышает 10 мин. Повторно-кратковременный режим характеризуют потребной мощностью  $P_n$  и относительной продолжительностью включения  $PВ = t_p/t_u$  или  $PВ \% = 100t_p/t_u$ .

В таком режиме работают электроприводы кранов, лифтов и других подъемных механизмов, токарных, сверлильных и других металлообрабатывающих станков.

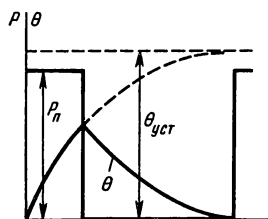


Рис. 11.4

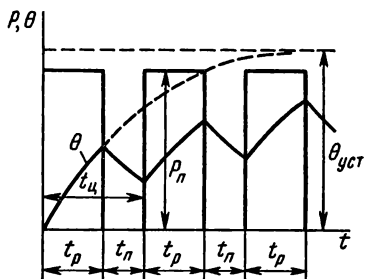


Рис. 11.5

Для повторно-кратковременного режима изготавливают особые электродвигатели, рассчитанные на определенную номинальную мощность и стандартную относительную продолжительность включения  $PВ = 15, 25, 40$  и  $60 \%$ .

При неизменной нагрузке во время рабочего периода электродвигатель выбирают также по условию (11.1), но при этом учитывают отклонение фактической величины относительной продолжительности включения ( $PВ_{ф}$ ) от стандартной ( $PВ_{ст}$ ).

В этом случае определяют расчетную потребную мощность  $P_{пр} = P_n \sqrt{PВ_{ф}/PВ_{ст}}$ , где  $P_n$  и  $PВ_{ф}$  — величины, найденные по нагрузочной диаграмме, а  $PВ_{ст}$  — одна из номинальных величин, численно ближайшая к  $PВ_{ф}$ .

### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Электродвигатель, построенный с применением хлопчатобумажной изоляции, имеет некоторую мощность  $P_{ном}$  и определенные размеры и вес. Как изменились бы размеры и масса электродвигателя при той же мощности, а также мощность при тех же размерах и массе, если хлопчатобумажную изоляцию заменить пряжей из стеклянных нитей?

2. Стоимость электропривода увеличивается, если выбрать двигатель завышенной мощности. Какие дополнительные расходы в этом случае появляются при установке электропривода и в процессе его эксплуатации?

3. В кратковременном режиме фактическая длительность рабочего периода имеет величину между 10 и 30 мин. Как изменится расчетная величина потребной мощности, по которой надо выбрать электродвигатель, имеющий нормальную продолжительность рабочего периода 10, 30 мин?

4. Почему при систематической перегрузке электродвигатель преждевременно выходит из строя?

5. Почему для повторно-кратковременного и кратковременного режимов работы изготавливают особые электродвигатели?

**Задача 11.3.** Определить мощность двигателя, необходимую для подъема лифта с грузом  $G = 1,5$  т со скоростью  $v = 0,25$  м/с, если собственная масса кабины  $G_0 = 1,5$  т, масса противовеса  $G_2 = 2$  т, к.п.д. подъемного механизма  $\eta = 0,5$ . Какая мощность потребуется, если лифт не будет иметь противовеса?

**Задача 11.4.** Выбрать электродвигатель по нагрузочной диаграмме, изображенной на рис. 11.3 в виде зависимости тока от времени (график 3), а также зависимости мощности от времени (график 2).

**Решение.** Нагрузочная диаграмма имеет три участка: 1)  $I_1 = 40$  А,  $t_1 = 2$  м; 2)  $I_2 = 30$  А,  $t_2 = 3$  м; 3)  $I_3 = 20$  А,  $t_3 = 6$  м; далее участки повторяются в том же порядке. Согласно формуле (11.4), эквивалентный ток

$$I_{эк} = \sqrt{\frac{40^2 \cdot 2 + 30^2 \cdot 3 + 20^2 \cdot 6}{2 + 3 + 6}} = 28 \text{ А.}$$

Двигатель по каталогу выбирают по условию  $I_{ном} \geq I_{эк}$ . Оно

непосредственно следует из условия (11.1). Выбран трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Характеристики двигателя:  $P_{\text{ном}}=15,2$  кВт;  $U_{\text{ном}}=380$  В;  $n_{\text{ном}}=975$  об/мин;  $\eta_{\text{ном}}=0,869$ ;  $\cos \varphi_{\text{ном}}=0,83$ ;  $k_{\text{мах}}=M_{\text{мах}}/M_{\text{ном}}=1,9$ ;  $I_{\text{ном}}=31,9$  А. Выбранный двигатель следует проверить по перегрузочной способности:

$$M_{\text{ном}}=60P_{\text{ном}}/(2\pi n_{\text{ном}})=60 \cdot 15\,200/(2\pi 975)=150 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{мах дв}}=M_{\text{ном}}k_{\text{ном}}=150 \cdot 1,9=285 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Наибольший ток нагрузки  $I_{\text{мах}}=40$  А

$$P_{\text{мах}}=\sqrt{3} U_{\text{ном}} I_{\text{мах}} \eta \cos \varphi;$$

$$P_{\text{мах}}=\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 40 \cdot 0,869 \cdot 0,83=18\,800 \text{ Вт}=18,8 \text{ кВт}.$$

Полагая, что  $\eta$ ,  $\cos \varphi$ , а также  $n$  при изменении нагрузки изменяются мало,

$$M_{\text{мах нг}}=60P_{\text{мах}}/(2\pi n_{\text{ном}})=60 \cdot 18\,800/(2\pi 975)=187,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Сравнение показывает, что  $M_{\text{мах дв}} > M_{\text{мах нг}}$ . Вторую часть задания по графику 2 решите самостоятельно.

### § 11.3. АППАРАТУРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

К функциям управления электроприводами относятся пуск в ход, регулирование скорости движения, изменение направления вращения (реверсирование), поддержание определенного режима работы или изменение режимов по заданной программе (например, согласно требованиям технологического процесса), торможение, остановка и отключение.

В схемах управления электроприводами при необходимости предусматривают также возможность выполнения функций защиты, блокировки, сигнализации. Могут быть введены: защиты от коротких замыканий и недопустимых перегрузок электродвигателя и сети электроснабжения, чрезмерных отклонений напряжения от номинальной величины, самопроизвольных включений и отключений электродвигателя; блокировки, предотвращающие неправильные по содержанию и не соответствующие заданной последовательности действия оператора, обеспечивающие запрограммированный порядок действия схемы управления.

В зависимости от характера и степени участия человека-оператора в процессе управления электроприводом различают системы неавтоматического (ручного), автоматизированного, автоматического управления. Этим определяются и типы аппаратов в схемах управления.

**Аппараты ручного управления.** Ручное управление применяют в простейших случаях неавтоматизированного производства

и только для приводов, установленных в помещениях с нормальными для оператора условиями работы, при управлении которыми не возникает опасности поражения электрическим током, не требуется больших физических усилий, быстрогодействия, большого количества операций.

Аппараты ручного управления приводятся в действие непосредственно усилием оператора. К ним относятся рубильники, пакетные выключатели, реостаты, контроллеры.

Рубильники — аппараты для ручного включения и отключения элементов электрических цепей. Их применяют при напряжениях до 500 В и токах до 1000 А. Для отключения цепей без нагрузки служат простые рубильники без дугогасительного приспособления, а для отключения цепей под нагрузкой применяют рубильники с дугогасительными приспособлениями. Простейшим из них является особый дугогасительный контакт, который крепится на основном контакте. Дугогасительный эффект достигается тем, что размыкание цепи происходит быстро под действием пружины, которая растягивается при размыкании основного контакта. В цепях переменного тока с напряжением 380 и 500 В и постоянного тока при напряжении 200 В и более применяют рубильники с дугогасительными камерами.

Пакетные выключатели — малогабаритные аппараты для ручного включения и выключения электрических цепей постоянного и переменного токов (рис. 11.6, а — в). Их применяют при напряжении 220 и 380 В и токах от 10 до 400 А.

В контактную систему пакетного выключателя входит набор контактных групп. Каждая группа состоит из двух неподвижных контактов 3, укрепленных на неподвижных изоляционных шайбах 2, и подвижного контакта 4, который насажен на четырехгранный валик с ручкой 5.

Неподвижные контакты имеют зажимы, к ним присоединяют провода электрической цепи. В определенном положении ручки подвижной контакт соединяет между собой два неподвижных контакта, расположенных на одном диаметре, т. е. соединяют два

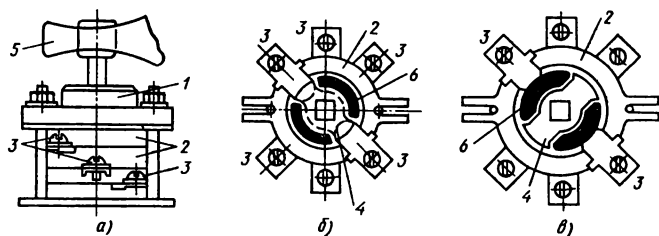


Рис. 11.6

провода электрической цепи в соответствии с заданной схемой. При повороте ручки на  $90^\circ$  поворачивается также подвижной контакт и эта цепь разрывается. Для ускорения разрыва под крышкой 1 имеется пружинный механизм. При повороте ручки пружина заводится, а затем поворачивает подвижной контакт.

Электрическая искра, возникающая между контактами при разрыве цепи, гасится не только путем ускорения разрыва; этому способствуют также газы, выделяемые фиброй, из которой сделаны прокладки 6, специально уложенные в одной плоскости с подвижным контактом.

**Контроллеры** — многопозиционные аппараты для включения и переключения в силовых цепях и цепях управления.

Их применяют обычно для переключений резисторов при пуске, регулировании частоты вращения и реверсировании электродвигателей.

Устройство контроллера позволяет, в отличие от рубильника, включать электрические цепи не одновременно, а в определенной, заранее установленной последовательности. На рис. 11.7, а показана схема действия одного звена контроллера кулачкового типа.

Рабочие контакты 5 и 4 укреплены на изоляционных основаниях — подвижном 3 и неподвижном 6. На подвижном основании, которое может поворачиваться вокруг оси 2, укреплен ролик 8. На валу 1 укреплена кулачковая шайба 9. Если она соприкасается с роликом поверхностью меньшего радиуса, контакты замыкнуты действием пружины 7. Поворачивая вал 1 и кулачковую шайбу, контакты можно разомкнуть. Таких кулачковых элемен-

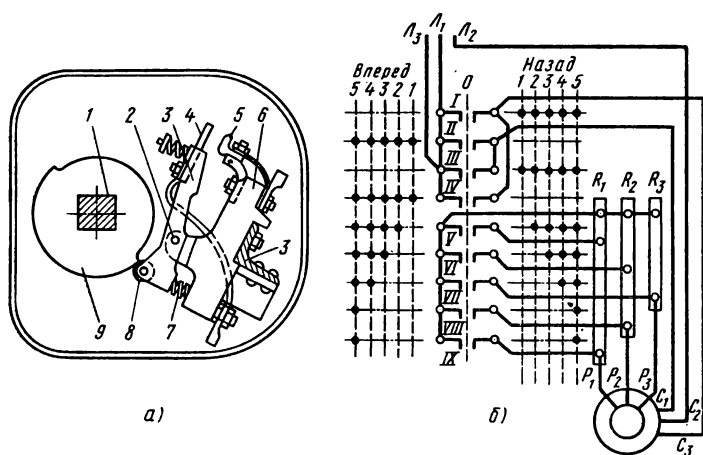


Рис. 11.7



тов вдоль вала / устанавливается столько, сколько требует схема управляемой электрической цепи.

**Аппараты для схем автоматического управления электроприводом.** В схемах автоматического и автоматизированного управления применяют аппараты, различные по назначению, принципам действия, устройству. Некоторые из них (реле, контакторы, магнитные усилители) кратко рассмотрены в гл. 10 наряду с другими элементами автоматики. Дополнительно отметим путевые выключатели, командные аппараты, резисторы, тиристорные преобразователи.

**Путевые выключатели** — аппараты, предназначенные для переключений в цепях управления в зависимости от пути, пройденного подвижным элементом рабочей машины. Контакты путевых выключателей переключают сами рабочие механизмы при их движении. Например, в схему управления лифтом входят этажные переключатели. Кабина лифта, прибывая на заданный этаж, воздействует на переключатель, установленный на этом этаже, а он, в свою очередь, размыкает свой контакт в цепи управления, что приводит к выключению электродвигателя и остановке кабины.

Разновидностью путевых выключателей является конечный выключатель, который срабатывает в конце пути подвижного элемента рабочей машины.

**Командные аппараты** — предназначены для ввода оператором команд в схемы управления. К ним относятся командоконтроллеры, универсальные переключатели, кнопки управления (кнопочные станции).

**Резисторы** — аппараты, предназначенные для регулирования тока и напряжения в электрических цепях путем изменения их электрического сопротивления.

Элементы резисторов, обладающие электрическим сопротивлением, изготовляют из металлических сплавов с малой удельной проводимостью. Резисторы с изменяемым сопротивлением (реостаты) применяют в качестве пусковых, регулировочных и тормозных аппаратов в схемах электроприводов с ручным и автоматическим управлением.

**Тиристоры.** В системах автоматизированного и автоматического электропривода в настоящее время широко применяют преобразователи на основе управляемых вентилей. Наибольшее признание получили тиристоры — полупроводниковые управляемые вентили.

Схема устройства тиристора (рис. 11.8, а) показывает, что этот полупроводниковый прибор имеет четырехслойную структуру типа *p-n-p-n*, в которой чередуются слои с электронной и дырочной проводимостью. Между слоями образуются *p-n*-пе-

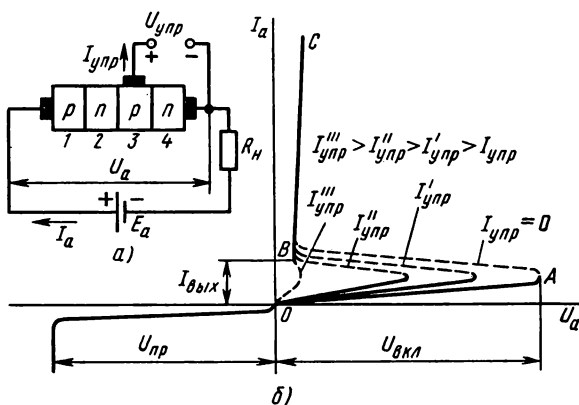


Рис. 11.8

реходы, имеющие в прямом направлении сопротивление величины доли ома, а в обратном — сотни тысяч ом.

Слой 1 — анод, к нему присоединяют положительный полюс источника питания; слой 4 — катод, он соединен с отрицательным полюсом через нагрузочный элемент  $R_n$ . Кроме анода и катода имеется управляющий электрод, который присоединен к среднему слою типа  $p^3$ , а между ним и катодом действует управляющее напряжение. На рис. 11.8, б показана вольт-амперная характеристика тиристора — зависимость анодного тока  $I_a$  от напряжения  $U_a$  между анодом и катодом.

На участке  $OA$  ток тиристора мал, т. е. тиристор закрыт, если значение положительного анодного напряжения меньше напряжения включения  $U_{вкл.}$ . На участке  $BC$  тиристор открыт (ток  $I_a$  резко увеличивается, а напряжение  $U_a$  уменьшается).

При отсутствии сигнала в управляющей цепи ( $I_{упр}=0$ ) тиристор остается в запертом состоянии, если  $U_a \leq U_{вкл.}$ , и открывается, когда  $U_a \geq U_{вкл.}$

Тиристор можно включить при меньшем анодном напряжении, если управляющий электрод получит положительный потенциал относительно катода, причем момент включения зависит от величины управляющего тока  $I_{упр.}$  После отпирания тиристора управляющий электрод теряет свои управляющие свойства, а обратный переход из открытого состояния в закрытое происходит только при изменении знака анодного напряжения (минус на аноде), а также при уменьшении анодного тока до некоторой величины  $I_{выкл.}$

Отмеченные свойства тириستоров позволяют создавать на их

основе преобразователи переменного тока в постоянный (выпрямители), усилители мощности, переключатели релейного, в том числе триггерного действия, усилители и регуляторы мощности постоянного и переменного токов и другие устройства, применяемые в схемах автоматики и особенно для управления электроприводами, учитывая также их высокие коммутационные свойства полупроводниковых переключателей.

**Тиристоры в схемах управления.** Полупроводниковые приборы получили сначала широкое применение в технике связи, а позднее, с развитием силовой полупроводниковой техники, появилась возможность применения ее для управления электроприводами.

В схемах управления используют статические полупроводниковые преобразователи — выпрямители и инверторы на тиристорах. Выпрямители служат для преобразования переменного напряжения в постоянное, а инверторы преобразуют постоянное напряжение в переменное, причем возможность управления моментами открывания и запираания тиристоров позволяет регулировать выходные величины напряжения и тока.

Принцип регулирования напряжения на выходе тиристорного выпрямителя рассмотрим на схеме двухполупериодного выпрямления (рис. 11.9, а). Источником переменного напряжения в данном случае является однофазный трансформатор  $Tr$  с тремя выводами от вторичной обмотки (начало, конец, средняя точка).

В схему выпрямителя входят два тиристорных вентиля так, что анод одного из них  $V_1$  соединен с началом, а анод другого  $V_2$  — с концом обмотки. Катоды вентилях соединены между собой, а между точкой их соединения и средней точкой обмотки включен нагрузочный резистор. Катоды и управляющие электроды тиристоров соединены с источником управляющих импульсов (И).

Рассмотрим работу схемы выпрямления при неуправляемых вентилях (например, полупроводниковых диодах), которые открываются при любом значении положительного напряжения (+ на аноде, — на катоде), без подачи в схему управляющих импульсов (источник импульсов отключен). Для этого случая на рис. 11.9, б изображены графики напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора ( $U_{2a}$  и  $U_{2b}$ ), которые одинаковы по величине и совпадают по фазе, поэтому выражены одной кривой.

В первый полупериод от начала отсчета открыт вентиль  $V_1$  (+ на аноде), а вентиль  $V_2$  закрыт (— на аноде); ток имеется в контуре: часть вторичной обмотки (а) — вентиль  $V_1$  — нагрузочный резистор  $R_n$ .

В течение второго полупериода напряжения вентиль  $V_1$  за-

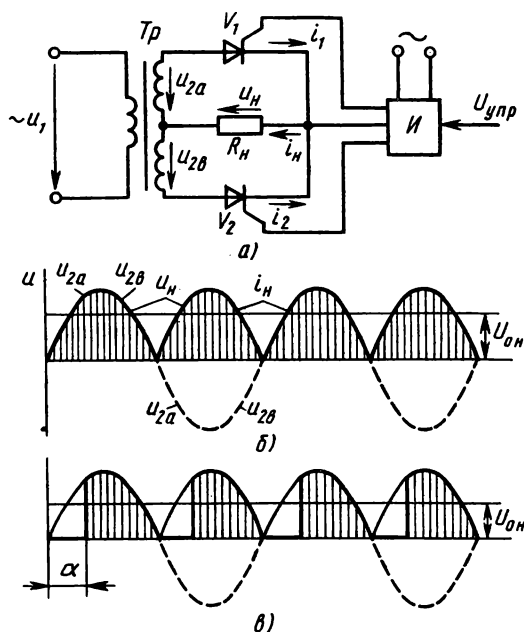


Рис. 11.9

крыт, а вентиль  $V_2$  открыт, поэтому ток имеется в контуре: часть вторичной обмотки  $b$  — вентиль  $V_2$  — нагрузочный резистор  $R_n$ . Направление тока в нагрузке одинаково в течение обоих полупериодов. Ток  $i_n$  в резисторе  $R_n$  в течение полупериода совпадает по фазе с напряжением вторичной обмотки трансформатора, а напряжение  $u_n$  по форме изменяется так же, как ток (две положительные полуволны в течение одного периода входного напряжения). Это показано на рис. 11.9, б, где графики напряжения и тока совмещены, что возможно при соответствующем выборе масштабов. Напряжение на нагрузке имеет постоянную составляющую  $U_{он} = 0,9U_2$ , где  $U_2$  — действующее напряжение одной из двух частей вторичной обмотки трансформатора.

Ранее было отмечено, что момент открывания тиристора зависит от величины управляющего тока  $I_{упр}$  в цепи управляющего электрода и связан с моментом подачи управляющего импульса, т. е. зависит от фазового угла  $\alpha$  (рис. 11.9, в). Изменением угла  $\alpha$  можно менять величину выпрямленного напряжения  $U_n$  на нагрузочном элементе схемы. Постоянная составляющая выпрямленного напряжения в данном случае меньше, чем при  $\alpha = 0$ .

Для уменьшения пульсаций напряжения на нагрузке применяют различные фильтры (например, индуктивные) или используют многофазные схемы выпрямления (см. рис. 11.16).

Как известно, режимы работы электродвигателей зависят от значения напряжения на их входе. Например, с помощью тиристорного выпрямителя можно в сеть переменного тока включить двигатель постоянного тока и регулировать напряжение на его зажимах. Путем изменения напряжения можно регулировать частоту вращения или изменять вращающий момент двигателя.

#### *Контрольные вопросы*

1. Почему при выключении электрических цепей под нагрузкой между контактами выключателя образуется искра?
2. Как влияют на интенсивность искрообразования величина индуктивности, величина тока нагрузки выключаемой электрической цепи?
3. Почему для устройства резисторов применяют материалы с высоким удельным сопротивлением?
4. Среди путевых выключателей различают проходные и концевые выключатели. В чем состоит их сходство и различие?
5. Какое свойство тиристоров позволяет использовать их в схемах бесконтактных переключателей (реле)?

### **§ 11.4. РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ**

Для выполнения функций управления электроприводами, различных по содержанию и целям, требуются соответствующие системы управления, отличающиеся по составу элементов и степени сложности.

Пуск в ход, перевод привода с одной скорости на другую, реверсирование, торможение и другие относительно простые функции успешно выполняются системами управления, построенными на основе релейно-контактной аппаратуры, если число срабатываний отдельных аппаратов в час невелико.

Релейно-контактные системы относятся к типу разомкнутых систем, определяющей особенностью которых является полная независимость регулирующего воздействия от регулируемой величины. Иначе говоря, в разомкнутой системе управляющая информация идет в одном направлении — от источника к приемнику, а обратные связи отсутствуют.

**Общие сведения о схемах управления.** Ранее (см. § 2.3) было отмечено, что при изучении принципа работы взаимодействия частей электроустановок пользуются преимущественно принципиальными схемами, на которые наносят полный состав элементов электроустановки и связи между ними.

В понятие «элементы схемы» входят аппараты, машины, приборы в целом или их части, выполняющие в схеме определенные

функции (катушки, контакты, предохранители и т. п.). Отдельные элементы изображают условными графическими обозначениями, причем располагают их, руководствуясь только соображениями удобства начертания и чтения схем, не обращая внимания на действительное расположение элементов в установке. Связи между элементами наносят наиболее короткими линиями, по возможности избегая пересечений.

Этим условиям лучше других отвечают разнесенные схемы, на которых элементы, конструктивно принадлежащие одному и тому же аппарату, прибору, но выполняющие самостоятельные функции, располагают раздельно. Например, силовые контакты контактора, которые включают электродвигатель в сеть, входят в силовую цепь, а катушка того же контактора находится в цепи управления (см. рис. 11.12).

В электрических аппаратах различают контакты замыкающие (з) и размыкающие (р). Если аппарат находится в отключенном положении (в катушке электромагнитного аппарата нет тока, кнопка с пружинным возвратом не нажата), то его замыкающие контакты разомкнуты, а размыкающие замкнуты. Такое положение контактов называют *нормальным* или *начальным*; в этом положении их изображают на принципиальных схемах. Кроме условных графических обозначений на схемах применяют обозначения буквенные и цифровые. Каждый аппарат имеет свое буквенное обозначение, которое относится ко всем элементам схемы, конструктивно принадлежащих этому аппарату. Если таких аппаратов несколько, то после буквенного обозначения ставят порядковый номер аппарата. Например, обозначение РП2 по ЕСКД расшифровывается так: реле промежуточное № 2.

Для того чтобы облегчить чтение схем, в них выделяют силовые цепи двигателей и генераторов (эти цепи иногда называют главными) и цепи управления (вспомогательные). Силовые цепи изображают утолщенными линиями, а цепи управления — тонкими.

**Типовые узлы схем управления пуском электродвигателей постоянного тока.** В процессе пуска электродвигателя изменяются скорость, ток, вращающий момент и другие характеристики режима.

В § 9.4 кратко рассмотрены пусковые свойства двигателя постоянного тока параллельного возбуждения и порядок ручного управления пуском с помощью пускового реостата.

Автоматизация пуска не только облегчает ведение пускового процесса, но позволяет устранить возможные ошибки оператора, повышает производительность механизмов.

На рис. 11.10 показана пусковая диаграмма с тремя ступеня-

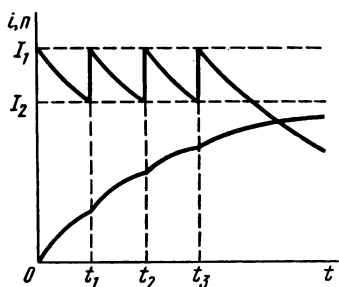


Рис. 11.10

ми сопротивления пускового резистора, рассчитанными так, чтобы ток изменялся в пределах допустимых величин  $I_1$ ,  $I_2$ , причем от  $I_1$  до  $I_2$  ток уменьшается плавно в связи с ростом скорости, а от  $I_2$  до  $I_1$  — скачком в результате выключения ступени пускового реостата. Пределы изменения тока выбирают из двух условий: допустимых толчков нагрузки и возможно большего сокращения общего времени пускового процесса.

Выключать ступени пускового резистора, как видно из диаграммы, надо при определенной частоте вращения ротора ( $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ), определенном токе ( $I_2$ ) и в определенные моменты времени ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ). Следовательно, управлять пуском можно в функции скорости или пропорциональной ей э.д.с. обмотки якоря, в функции тока, в функции времени. Для управления пуском необходимо контролировать одну из этих величин и в зависимости от результатов контроля воздействовать на соответствующий аппарат в схеме управления.

Для примера рассмотрим узлы некоторых схем управления.

Управление в функции э.д.с. (схема на рис. 11.11, а). Обмотки контакторов управления  $KY_1$ ,  $KY_2$ ,  $KY_3$  включены параллельно обмотке якоря двигателя, поэтому на их зажимах напряжение зависит от э.д.с. обмотки якоря и выражается равенством  $U_K = IR_{\pi} + E$ .

Процесс пуска начинается с нажатием кнопки  $K_{нП}$ , в результате чего устанавливается ток в обмотке линейного контактора

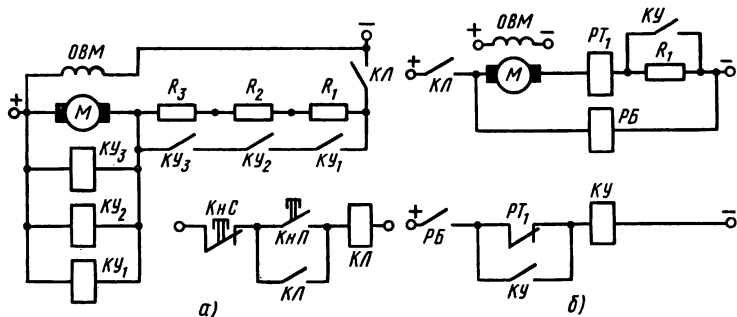


Рис. 11.11

*КЛ*, который срабатывает и силовыми контактами *КЛ* включает двигатель *М* в сеть при наибольшем сопротивлении в цепи якоря (все три ступени  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  пускового резистора последовательно включены в цепь якоря), поэтому ток  $I=I_1$ , а напряжение на зажимах двигателя и на обмотках контакторов управления  $KУ_1$ ,  $KУ_2$ ,  $KУ_3$  в начальный момент времени имеет величину  $U_{к0}=I_1R_{я}$ , так как э.д.с.  $E_0=0$ . Контактторы управления настроены так, что этого напряжения для их срабатывания недостаточно.

С ростом скорости увеличивается э.д.с. и уменьшается ток в якоре, которые к моменту времени  $t_1$  достигают величин  $E_1$ ,  $I_2$ . В этот момент срабатывает контактор  $KУ_1$  (он настроен на напряжение срабатывания  $U_{к1}=I_2R_{я}+E_1$ ). Замыкаются контакты  $KУ_1$  и первая ступень резистора ( $R_1$ ) выводится из цепи якоря. В результате этого ток снова увеличивается до  $I_1$ , а скорость и э.д.с. продолжают увеличиваться и в момент времени  $t_2$  достигают величин  $E_2$  и  $I_2$ ; при напряжении на зажимах якоря  $U_{к2}=I_2R_{я}+E_2$  срабатывает контактор  $KУ_2$ , выключается вторая ступень резистора в цепи якоря. Далее схема функционирует аналогично и после срабатывания  $KУ_3$  выключается третья (последняя) ступень пускового резистора, а двигатель выходит на естественную характеристику.

Управление в функции тока. В этом случае в цепь якоря двигателя включают пусковой резистор и, кроме того, по числу его ступеней — столько же токовых реле.

О принципе управления пуском двигателя дает полное представление узел схемы на рис. 11.11, б, где показаны одна ступень пускового резистора  $R_1$  и одно токовое реле  $РТ_1$ . В результате замыкания в силовой цепи контакта *КЛ* линейного контактора рабочее напряжение сети подается в цепь якоря и на обмотку блокировочного реле *РБ*.

Ток в цепи якоря ограничен пределом  $I_1$  (см. рис. 11.10), так как в нее введен пусковой резистор  $R_1$  (контакт *КУ* разомкнут). Значение тока  $I_1$  достаточно для срабатывания токового реле  $РТ_1$ , которое размыкает нормально замкнутый контакт в цепи управления раньше, чем замкнется в этой же цепи контакт реле *РБ*, так как собственное время срабатывания реле  $РТ_1$  выбирается меньше, чем у реле *РБ*. Такое действие этих реле не позволяет включиться контактору ускорения *КУ* до тех пор, пока ток в якоре уменьшается до значения  $I_2$ , равного току отпущения реле  $РТ_1$ .

Когда ток якоря достигает этого значения, контакт реле  $РТ_1$  в цепи управления замыкается и возникает ток в катушке контактора *КУ*. Этот контактор срабатывает и, замыкая силовой контакт *КУ* в цепи якоря, замыкает накоротко ступень пускового резистора. Ток якоря увеличивается скачком, но цепь катушки



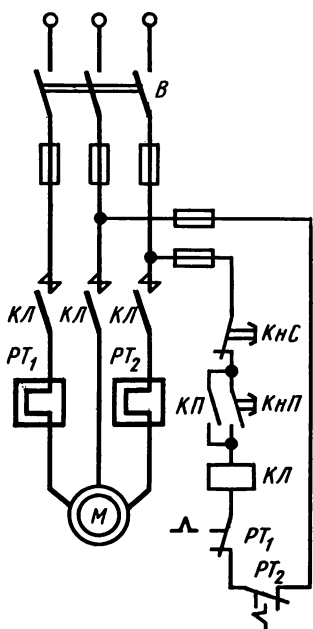


Рис. 11.12

контактора остается замкнутой блок-контактом этого же контактора, включенным параллельно контактору  $PT_1$ .

Принцип управления в функции времени рассмотрен далее при разборе работы схемы автоматического управления пуском асинхронного двигателя с фазным ротором (см. рис. 11.14).

**Схемы магнитных пускателей.** Пуск, остановку, реверсирование асинхронных двигателей небольшой мощности с короткозамкнутым ротором осуществляют обычно с помощью магнитных пускателей.

Магнитный пускатель — аппарат, состоящий из контактора переменного тока и двух тепловых реле, смонтированных в общем кожухе. Реверсивный магнитный пускатель имеет два контактора, один из которых включает двигатель «вперед», другой — «назад».

В схеме рис. 11.12 силовая цепь и цепь управления подключены к одному источнику напряжения — электросети переменного тока. Несмотря на предельную простоту, схема выполняет несколько важных функций управления. Она позволяет осуществлять дистанционный пуск и остановку двигателя, защищать двигатель от перегрузок и коротких замыканий, автоматически выключает двигатель в случае значительного снижения или исчезновения напряжения в сети.

Для того чтобы включить двигатель, нажимают пусковую кнопку КНП, вследствие чего устанавливается ток в катушке контактора КЛ. Контактор срабатывает и, замыкая свои контакты в силовой цепи, включает двигатель в сеть. После срабатывания контактора кнопку КНП можно отпустить. Для остановки двигателя его отключают от сети нажатием кнопки КНС («Стоп»). В катушке контактора ток прерывается, контактор и его контакты возвращаются в начальное положение.

Двигатель отключается от сети не только кнопкой КНС, но и в случае срабатывания хотя бы одного из тепловых реле  $PT_1$ ,  $PT_2$ , которые служат для защиты двигателя от перегрузок. Нагревательные элементы тепловых реле находятся в силовой цепи

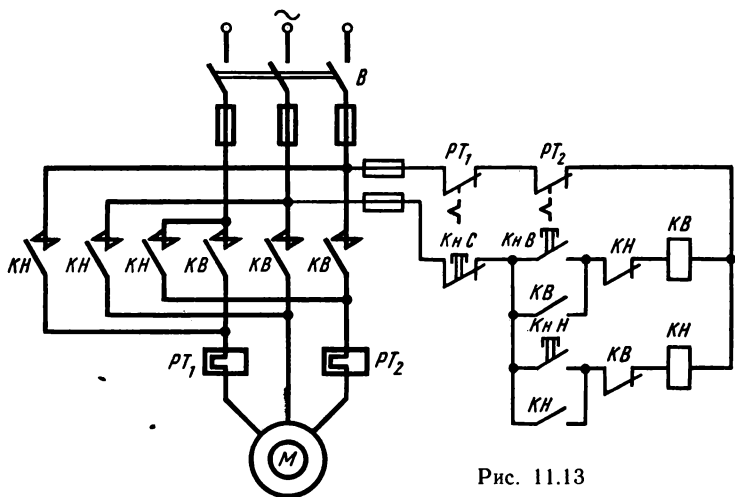


Рис. 11.13

и в случае продолжительной перегрузки двигателя реле срабатывает и размыкает свой контакт в цепи управления.

С целью быстрого отключения электродвигателя от сети при коротком замыкании в силовой цепи и в цепи управления установлены плавкие предохранители. Двигатель отключается от сети контактором и в случае значительного снижения или исчезновения напряжения в сети, как только ток в катушке контактора уменьшится до величины тока отпущения.

На рис. 11.13 показана схема управления с помощью реверсивного магнитного пускателя, в которой контакторы обозначены *КВ* (вперед) и *КН* (назад).

**Схемы управления асинхронным двигателем с фазным ротором.** Одна из схем ручного управления пуском асинхронного двигателя с фазным ротором с помощью кулачкового контроллера показана на рис. 11.7, б. Кулачковый контроллер в данном случае имеет девять выключателей (*I—IX*). Поворачивая рукояткой вал *I*, его можно установить в пяти позициях «вперед» и «назад». Замкнутому положению контактов выключателя соответствует точка на схеме позиций. В позиции 0 все контакты разомкнуты, двигатель отключен, хотя один провод из сети подведен к зажиму *C<sub>2</sub>* статора; пусковые резисторы *R<sub>1</sub>*, *R<sub>2</sub>*, *R<sub>3</sub>* введены полностью и соединены в звезду.

**Включение «вперед».** В позиции 1 — замкнуты выключатели *II* и *IV*, статор соединен с сетью, ротор вращается при полном пусковом сопротивлении. В позиции 2 остаются замкнутыми выключатели *II*, *IV* и дополнительно замыкается *V* и часть ре-

зистора  $R_1$  замыкается накоротко; затем по мере увеличения частоты вращения (разгона двигателя) рукоятка последовательно поворачивается в позициях 3, 4, 5 и в результате каждого поворота выводится часть одного из резисторов в цепи ротора. В позиции 5 пусковые резисторы полностью выключены и двигатель работает с короткозамкнутым ротором.

В схеме автоматического управления, изображенной на рис. 11.14, сопротивление в цепи ротора изменяется в необходимом порядке посредством контакторов  $KП$ ,  $KУ_1$ ,  $KУ_2$ .

Кроме пуска в ход схема позволяет изменять направление вращения, быстро затормозить ротор после выключения двигателя, защитить двигатель от перегрузки и короткого замыкания.

Одна из особенностей схемы состоит в том, что аппараты управления получают питание от источника постоянного тока. Перед пуском двигателя командоконтроллер  $КК$  необходимо поставить в нулевое положение, затем подать напряжение в цепь управления рис. 11.14, б и силовую цепь рис. 11.14, а (замкнуть выключатели  $ВА$  и  $В$ ).

Команду для пуска двигателя подают поворотом рукоятки командоконтроллера в одно из пусковых положений «вперед» или «назад». После этого схема работает автоматически.

В результате замыкания контактов  $ВА$  в цепи управления получают питание реле ускорения  $РУ_1$  и  $РУ_2$  и через командоконтроллер — реле напряжения  $РН$ . Реле ускорения размыкают свои контакты в цепи катушек контакторов ускорения  $KУ_1$  и  $KУ_2$ .

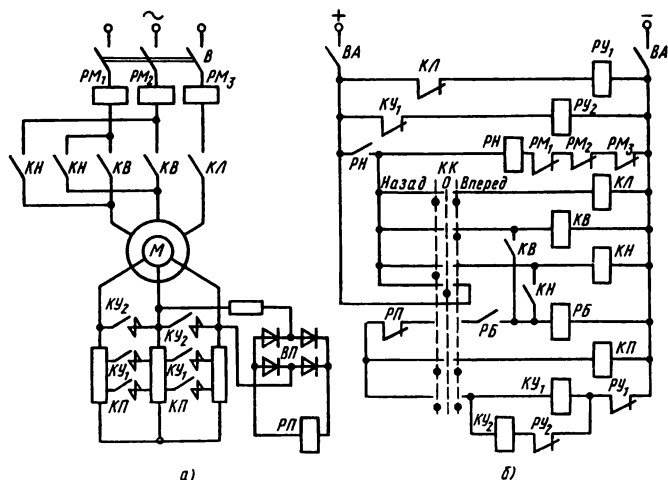


Рис. 11.14

В положении «вперед» включаются контакторы *КЛ*, *КВ* и реле *РБ*. Замыкаются контакты *КВ* и *РБ* в цепи контактора *КП*. В цепи ротора имеется реле *РП*, которое получает питание через выпрямитель *ВП*, на вход которого подается линейное напряжение цепи ротора. В неподвижном состоянии ротора это напряжение недостаточно для срабатывания реле *РП*, поэтому контакт *РП* в цепи контактора *КП* остается замкнутым. Контактор *КП* срабатывает и замыкает контакты в цепи ротора и этим шунтирует одну ступень резисторов. Эта ступень в процессе пуска не участвует и пусковыми являются следующие две ступени.

В результате срабатывания контакторов *КЛ* и *КВ* к обмоткам статора подается напряжение сети (контакты *КЛ* и *КВ* в цепи двигателя замкнулись) и одновременно разомкнулся контакт *КЛ* в цепи реле *РУ<sub>1</sub>*, которое имеет выдержку времени при отпуске.

Таким образом, ротор разгоняется при полном пусковом сопротивлении до тех пор, пока разомкнут контакт *РУ<sub>1</sub>* в цепи контактора *КУ<sub>1</sub>*.

По истечении времени выдержки контакт *РУ<sub>1</sub>* замыкается, срабатывает контактор *КУ<sub>1</sub>* и, замкнув контакты *КУ<sub>1</sub>* в цепи ротора, выключает одну пусковую ступень резистора.

Одновременно размыкается контакт *КУ<sub>1</sub>* в цепи реле *РУ<sub>2</sub>*, которое также имеет выдержку времени при отпуске. По истечении этого времени замыкается контакт *РУ<sub>2</sub>* в цепи контактора *КУ<sub>2</sub>*, который срабатывает и выключает вторую пусковую ступень резистора. С этого момента двигатель работает на естественной механической характеристике.

Если требуется изменить направление вращения ротора, то командоконтроллер надо перевести в положение «назад». При этом нельзя миновать нулевого положения, в котором вся схема управления возвратится в исходное состояние. В положении «назад» включаются контакторы *КЛ* и *КН* и изменяется чередование фаз на входных зажимах двигателя. Но ротор двигателя по инерции продолжает вращаться вперед, следовательно, возникает режим противовключения, вследствие чего происходит быстрое торможение.

В начале торможения напряжение в цепи ротора достаточно велико, реле *РП* срабатывает и размыкает свой контакт в цепи контактора *КП*, для того чтобы он не сработал преждевременно. Поэтому в процессе торможения ротора в его цепь включены не только пусковые ступени резистора, но и ступень противовключения.

Реле *РП* замкнет свой контакт только тогда, когда торможение закончится и ротор практически остановится, после чего схема управления осуществит пуск двигателя «назад».

Надо заметить, что реле блокировки *РБ* имеет некоторую выдержку времени при срабатывании для того, чтобы реле *РП* успело разомкнуть свой контакт в цепи контактора *КП*.

Для защиты двигателя от коротких замыканий и перегрузки в схеме имеется максимальная защита (реле *РМ<sub>1</sub>*, *РМ<sub>2</sub>*, *РМ<sub>3</sub>*) и защита от недопустимого снижения напряжения (реле *РН*).

#### *Контрольные вопросы и задачи*

1. При описании или чтении схем управления применяют следующие названия контактов реле: замыкающий, нормально замкнутый, нормально разомкнутый, размыкающий. Какому контакту соответствует каждое из этих названий?

2. В схеме рис. 11.12 пусковая кнопка *КпП* шунтирована замыкающими контактами контактора *КЛ*. Какую задачу в данном случае выполняет эта блокировка?

3. В схемах магнитных пускателей предусмотрены два вида защиты двигателя от перегрузок: тепловыми реле, плавкими предохранителями. Почему необходимы эти два вида защиты электродвигателя?

4. В схемах управления применяют защиту электропривода на случай значительного понижения напряжения в сети (минимальная защита). Почему необходима такая защита и как она осуществляется в схемах магнитных пускателей (см. рис. 11.12 и 11.13)?

5. Почему при торможении двигателя противовключением (схема на рис. 11.14) в цепь ротора включается сопротивление большее, чем в первый период пуска?

**Задача 11.5.** Составить полное описание работы схемы управления асинхронным короткозамкнутым двигателем с помощью реверсивного магнитного пускателя (см. рис. 11.13).

**Задача 11.6.** Составить описание работы схемы управления (см. рис. 11.14) после того, как двигатель вращающийся «вперед» переключили на ход «назад».

### **§ 11.5. УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСКОНТАКТНЫХ АППАРАТОВ**

По дискретному действию бесконтактные и релейно-контактные аппараты аналогичны: по сигналу на входе выходная величина изменяется скачком. С этой точки зрения применение аппаратов того и другого типа в схемах управления электроприводами обеспечивает выполнение функций управления.

Однако в бесконтактных аппаратах, в отличие от контактных, нет и подвижных частей, и механических контактов, благодаря чему они имеют существенные преимущества: высокую надежность, долговечность, быстроедействие, легкость обслуживания.

Бесконтактные аппараты в схемах управления выполняют в основном логические функции, позволяют более точно связать режимы управления с требованиями технологического процесса, с режимами работы производственных механизмов и машин.

Это достигается в большинстве случаев применением обратных связей, обеспечивающих коррекцию управляющего воздействия в зависимости от изменения регулируемой величины.

Обратные связи могут быть положительными или отрицательными. При изменении регулируемой величины положительная связь действует на нее в том же направлении (согласно), отрицательная связь действует против изменения регулируемой величины (встречно). В гл. 10 было отмечено, что системы управления, в которых используются обратные связи, называют замкнутыми.

В качестве исполнительных устройств для переключений в силовых цепях схемы электропривода (когда требуется соединить или разорвать цепь) обычно применяют контактные аппараты.

**Схема управления электроприводом постоянного тока с магнитными усилителями.** Магнитные усилители широко применяют в схемах управления, учитывая кроме ранее отмеченных преимуществ бесконтактных аппаратов их относительно невысокую стоимость.

На рис. 11.15 представлена одна из схем электропривода малой мощности, которая позволяет в широких пределах (1:10) регулировать скорость двигателя; поддерживать заданную скорость с точностью от 5 до 15 % при изменении тока нагрузки в пределах  $(0,25 \div 1) I_{\text{ном}}$ .

В целом схема получает питание от сети переменного тока при напряжении 220 В. Электродвигатель  $M$  — постоянного тока — включен по схеме независимого возбуждения. Обмотка якоря

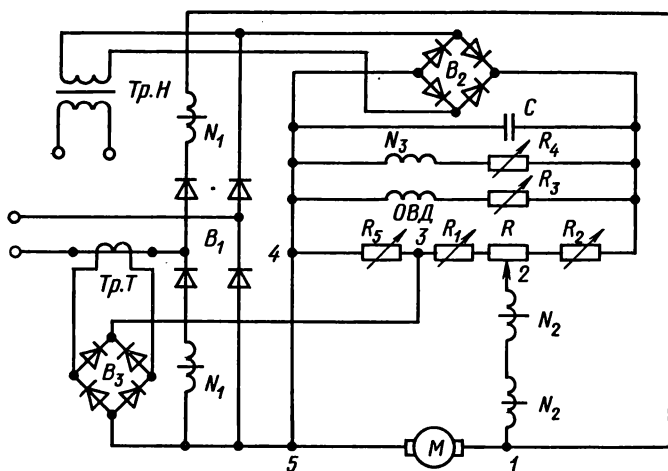


Рис. 11.15

получает питание через выпрямитель  $B_1$ , собранный по мостовой схеме двухполупериодного выпрямления.

Обмотка возбуждения  $ОВД$  подключена на выходе выпрямителя  $B_2$ , на вход которого подается напряжение от трансформатора  $Tr.H$ .

Силовые (рабочие) обмотки,  $N_1$  магнитных усилителей включены в плечи выпрямителя  $B_1$ , поэтому ток в них пульсирует, не меняя направления. Такой ток имеет постоянную составляющую, которая подмагничивает сердечники  $МУ$  помимо обмоток управления  $N_2$ . Таким образом, осуществляется положительная обратная связь — с увеличением нагрузки двигателя увеличивается ток в нагрузочных обмотках  $N_1$ , увеличивается подмагничивание сердечников, уменьшается индуктивное сопротивление обмоток и увеличивается напряжение на зажимах двигателя.

Функции задающего органа для настройки на требуемую скорость двигателя выполняет регулируемый резистор  $R$  вместе с подстроечными резисторами  $R_1$  и  $R_2$ . Они получают питание от выпрямителя  $B_2$ . Для того чтобы выяснить действие задатчика и регулятора скорости, рассмотрим контур  $1-2-3-4-5-1$ , в который входят обмотки управления  $N_2$ , резисторы  $R$ ,  $R_1$ ,  $R_5$  и якорь двигателя.

Обратная связь по току осуществляется путем подачи напряжения, пропорционального току нагрузки, на резистор  $R_5$  от выпрямителя  $B_3$ , на входе которого подключена вторичная обмотка трансформатора тока  $Tr.T$ .

Если требуется уменьшить скорость двигателя, то движок резистора  $R$  надо сдвинуть влево. В этом случае значение задающего напряжения уменьшится и уменьшатся напряжение и ток в обмотках управления. Уменьшение подмагничивания повлечет за собой увеличение сопротивления нагрузочных обмоток и снижение напряжения на зажимах двигателя и, как следствие, уменьшение скорости. Наименьшая частота вращения устанавливается, когда движок резистора  $R$  находится в крайнем левом положении. При этом резистор  $R_1$  служит для точного установления скорости, которая может отклоняться от заданной из-за разброса характеристик  $МУ$ . Такую же роль играет резистор  $R_2$ , но при установлении наибольшей скорости.

Благодаря действию обратных связей схема поддерживает заданную скорость при изменении нагрузки, т. е. обеспечивает получение жесткой механической характеристики. Предположим, что нагрузка на двигатель уменьшилась, тогда в первый момент из-за уменьшения тока нагрузки в обмотках  $N_1$  напряжение на двигателе увеличивается, а напряжение сигнала обратной связи по току  $U_{\text{от}}$  уменьшится. Оба фактора действуют в одну сторону — уменьшают напряжение на обмотках управления, что вле-

чет за собой уменьшение напряжения на двигателе. Этим скорость двигателя поддерживается на прежнем уровне.

**Схема управления электроприводом с применением тиристоров.** Режимы работы электродвигателей зависят от величины напряжения на их входе. Путем изменения напряжения можно регулировать частоту вращения или изменять вращающий момент двигателя.

На рис. 11.16 показана принципиальная схема одной из систем управления электроприводом с применением тиристоров. Штрихпунктирными линиями в схеме выделены три узла: *ТУВ* — тиристорный управляемый выпрямитель с блоком управления тиристорами (*БУТ*); *РТ* — регулятор тока; *РС* — регулятор скорости.

Выпрямитель собран на шести тиристорах  $V_1—V_6$  по трехфазной мостовой схеме. Обмотка якоря управляемого электродвигателя *М* является нагрузкой выпрямителя. Скорость электродвигателя задает оператор посредством бесконтактного командоконтроллера *БКК*, от которого на вход регулятора скорости *РС* поступает задающий сигнал  $U_{з.с}$  через задатчик интенсивности *ЗИ*.

Роль последнего заключается в формировании задающего сигнала и передаче его на вход регулятора скорости.

Параллельно на вход *РС* поступает сигнал от тахогенератора *ТГ*, посредством которого осуществляется отрицательная обратная связь по скорости; тахогенератор установлен на валу электродвигателя, сигнал его пропорционален угловой скорости  $U_{о.с} = k_c \omega$ , где  $k_c$  — коэффициент пропорциональности.

Выходной сигнал регулятора скорости является задающим для регулятора тока (*РТ*), а на выходе *РТ* формируется сигнал  $U_y$ , который подается в блок фазового управления тиристорами

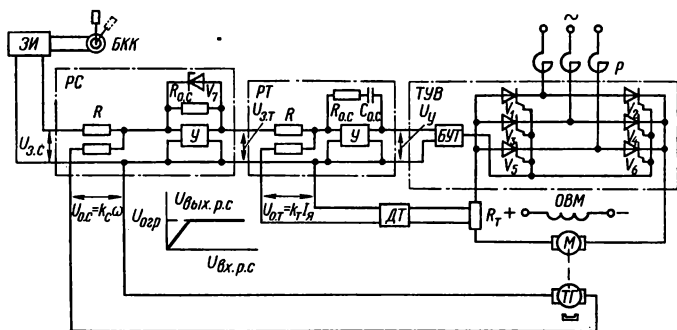


Рис. 11.16



(БУТ). В зависимости от интенсивности задающего сигнала (величины  $U_{з.с}$ ) устанавливается величина постоянного напряжения на выходе тиристорного управляемого выпрямителя (ТУВ), т. е. на зажимах электродвигателя. В соответствии с величиной этого напряжения устанавливается частота вращения ротора двигателя [см. формулу (9.7)].

Последовательно с обмоткой якоря включен резистор  $R_T$ , с которого снимается напряжение, пропорциональное току нагрузки, и подается на датчик тока (ДТ), в котором формируется сигнал отрицательной обратной связи по току  $U_{о.т} = k_T I_a$  ( $k_T$  — коэффициент пропорциональности) и вводится на вход регулятора тока РТ.

Обе обратные связи в данном случае отрицательные и служат для поддержания скорости двигателя на заданном уровне.

Предположим, что при неизменной нагрузке на валу электродвигателя скорость его увеличилась в связи с изменением напряжения в сети переменного тока. Одновременно увеличиваются частота вращения тахогенератора ТГ и значение напряжения  $U_{о.с}$ . Этот сигнал вычитается из задающего сигнала  $U_{з.с}$ , поэтому выходной сигнал РС становится меньше, что и приводит к уменьшению выпрямленного напряжения на зажимах электродвигателя и к уменьшению скорости до заданной величины.

Аналогично действует обратная связь по току, если по какой-то причине изменяется ток в обмотке якоря двигателя. В этом случае сигнал  $U_{о.т}$  от датчика тока ДТ вводится на вход регулятора тока РТ и вычитается из выходного сигнала РС, что повлечет за собой соответствующее изменение напряжения на зажимах электродвигателя.

В рассматриваемой схеме управления предусмотрено ограничение тока якоря при пуске. С этой целью переменное напряжение на вход тиристорного выпрямителя подано через токоограничивающие реакторы Р (аппарат, с помощью которого схема включается в сеть переменного тока, на рис. 11.16 не показан).

Кроме того, в цепи регулятора скорости РС установлен стабилизатор  $V_7$ , который ограничивает величину выходного сигнала ( $U_{вых. р.с} \leq U_{огр}$ ), если сигнал обратной связи по скорости мал, например, в начале пускового периода.

### *Контрольные вопросы*

1. Почему недостатки контактных аппаратов для управления электроприводами (по сравнению с бесконтактными) связаны с наличием у них подвижных частей и механических контактов?

2. В чем состоят функции задатчика и регулятора скорости в схеме управления электроприводом на рис. 11.15?

3. Выпрямленный ток в нагрузке выпрямителя не постоянный, а пульсирующий. Какая из схем выпрямления, изображенных на рис. 11.9, а и 11.16, дает меньшие пульсации и почему?

4. Сигнал обратной связи по скорости в схеме рис. 11.16 пропорционален угловой скорости ротора электродвигателя. Какие основания можно привести для такого утверждения?

5. Обратная связь по току в схеме на рис. 11.16 отрицательная. Можно ли в данном случае схему обратной связи изменить так, чтобы она стала положительной?

## ГЛАВА 12

### ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Работа электроприемников непосредственно зависит от качества электрической энергии, показателями которого являются: отклонение частоты и напряжения от их номинальных величин, коэффициенты несинусоидальности напряжения и несимметрии напряжений (в трехфазной системе).

Эти показатели определяются качеством построения и уровнем эксплуатации всей системы электроснабжения, в которую входит комплекс устройств для производства, передачи и распределения электрической энергии. Однако на качественные показатели (кроме отклонения частоты) влияют и некоторые электроприемники: вентильные преобразователи, мощные электротермические установки (особенно дуговые сталеплавильные печи), электросварочные установки, электродвигатели в период пуска и т. д.

При устройстве и эксплуатации систем электроснабжения решают широкий круг задач, связанных с рациональным выбором: величин напряжений, числа трансформаций, размещения подстанций, числа и мощности трансформаторов, сечений проводов и кабелей, коммутационной, контрольно-измерительной и защитной аппаратуры, средств и методов компенсации реактивной мощности; рассматривают вопросы надежности электроснабжения, безопасности обслуживания электрооборудования, экономии электрической энергии и др.

В данной главе кратко рассмотрены лишь некоторые из перечисленных вопросов и задач, которые возникают при эксплуатации элементов электроснабжения.

#### § 12.1. СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Общая схема электроснабжения показана на рис. В.1 и кратко рассмотрена во введении. Отметим, что крупные электростан-

ции, расположенные в одном, относительно большом районе, обычно соединены высоковольтными линиями электропередачи и вместе с подстанциями, распределительными линиями и приемниками электроэнергии составляют энергетическую систему. Электрическую часть энергосистемы называют электрической системой.

Объединение электростанций в энергосистемы дает существенные технико-экономические преимущества: значительно повышается надежность электроснабжения потребителей; более рационально распределяется нагрузка, снижаются необходимые резервы мощности на электростанциях; открывается возможность увеличения единичной мощности генераторов и электростанций, что позволяет снизить себестоимость электроэнергии и сократить расходы топлива за счет более полного использования гидроэлектростанций и более экономичной работы тепловых электростанций.

**Схемы электроснабжения предприятий.** Совокупность воздушных и кабельных линий электропередачи, подстанций, размещенных на определенной территории, называют электрической сетью.

Электрические сети связывают потребителей с электростанциями. Их можно классифицировать по ряду признаков: по конструктивному выполнению — воздушные и кабельные линии, внутренние проводники; по роду тока — сети переменного и постоянного токов; по характеру потребителей — городские сети, сети промышленных предприятий, сельские сети, сети электрических систем или районные сети.

Электрические сети, к которым непосредственно присоединены электроприемники, называют распределительными. Это наименование применяют также к районным сетям с большим количеством присоединенных к ним приемных подстанций.

Электроснабжение промышленных предприятий и других потребителей в большинстве случаев осуществляется от энергосистем при напряжении в соединительных линиях 110, 35, 10, 6 кВ в зависимости от протяженности линий и установленной мощности электроприемников на предприятии.

В конце распределительной линии высокого напряжения (110—35 кВ) устанавливают понижающую трансформаторную подстанцию с вторичным напряжением 6—10 кВ (см. рис. 12.1). Такая подстанция имеется на каждом крупном предприятии или она обеспечивает несколько относительно маломощных потребителей. От подстанции начинаются внутренние распределительные линии (как правило, кабельные). Они передают электроэнергию на цеховые подстанции, где напряжение понижается до рабочего напряжения электроприемников (220—380 В) или подается непо-

средственно высоковольтным электроприемникам (6—10 кВ).

**Схемы цеховых электрических сетей.** Внутренние распределительные линии передают электроэнергию на цеховые подстанции (см. рис. 12.1, 12.2). Часть электроприемников питается непосредственно от шин первичного напряжения цеховых подстанций (6—10 кВ), если такие приемники имеются (например, высоковольтные электродвигатели большой мощности). Но большинство электроприемников имеют номинальное напряжение 380 или 220 В, поэтому на цеховой подстанции установлены понижающие трансформаторы, которые на вторичной стороне дают такие напряжения для подключения силовой (электродвигатели), осветительной (электролампы) и другой электронагрузки.

Внутренние цеховые сети выполняют по радиальной, магистральной или смешанной схеме. Та или другая из этих схем начинается от шин вторичной стороны цеховой подстанции.

По радиальной схеме (рис. 12.1) электроприемники 3 присоединены или непосредственно к шинам 1 подстанции, или имеются промежуточные распределительные пункты 2. Наиболее ощутимыми преимуществами радиальных схем являются их высокая надежность (выход из строя одной линии не влияет на работу других), удобство автоматизации.

Из недостатков радиальных схем по сравнению с другими схемами надо отметить более высокую стоимость электросети (большее количество защитной и коммутационной аппаратуры, более высокий расход проводов и труб, дополнительные площади для размещения распределительных пунктов); необходимость больших дополнительных монтажных работ в случае перемещения электроприемников, связанного, например, с изменением технологического процесса.

Магистральная схема (см. рис. 12.2) состоит из нескольких магистралей 5, к которым в любой точке можно присоединить электроприемник 3. Обычно магистральные схемы применяют при равномерном распределении электроприемников в цехе. Их выполняют кабелями, проводами, шинпроводами.

Цеховая электросеть по магистральной схеме дешевле радиальной, позволяет перемещать технологическое оборудование без переделки сети, но менее надежна, так как выход из строя ма-

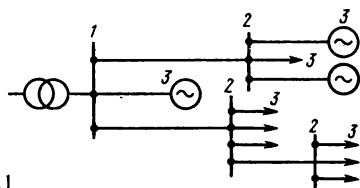


Рис. 12.1

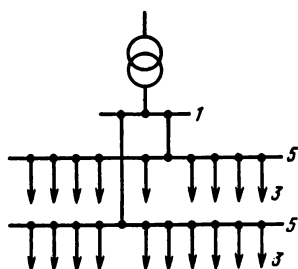


Рис. 12.2

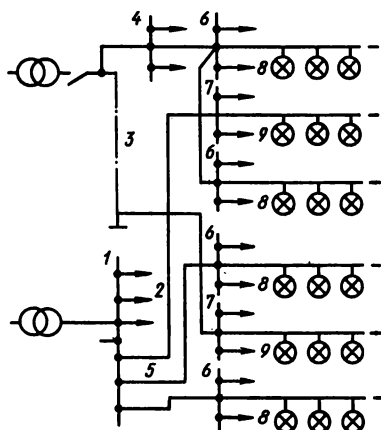


Рис. 12.3

гистральной лишает электропитания все электроприемники, присоединенные к ней.

В смешанной схеме некоторые электроприемники получают питание по радиальным линиям, а другие от магистральных шиннопроводов.

**Схемы осветительных электросетей.** В производственных помещениях создают рабочую и аварийную системы освещения. В рабочую систему входят светильники общего и местного освещения.

Осветительная электрическая сеть (рис. 12.3) присоединена одной частью к распределительному щиту 1 трансформаторной подстанции, где начинаются силовые линии 2 и питающие линии освещения 5, ведущие к групповым щиткам рабочего освещения 6 и аварийного освещения 7. Другая часть получает питание от трансформатора через распределительный щит 4. Участки сети от групповых щитков до светильников называют групповыми. Питающие линии 3 выполняют трех- и четырехпроводными, групповые линии 8 (рабочее освещение) и 9 (аварийное освещение) имеют два, три или четыре провода, что зависит от их протяженности и величины нагрузки.

Нередко на цеховых подстанциях установлен один трансформатор, от которого получают энергию силовая и осветительная нагрузки (рабочая и аварийная).

Если в цехе установлено несколько трансформаторов, то рабочая и аварийная осветительная нагрузки присоединяются к разным трансформаторам. Для осветительных сетей применяют магистральные или магистрально-радиальные схемы и, конструк-

тивно, открытые электропроводки на изоляторах, скрытые проводки в трубах и без труб.

**Графики электрических нагрузок.** Электрическая нагрузка предприятия, его цехов, производственных участков непрерывно изменяется. Это связано прежде всего с тем, что режимы отдельных электроприемников весьма различны. Первые из них работают длительно, вторые — кратковременно, третьи — в повторно-кратковременном режиме. Изменение потребной мощности связано также со сменностью работы предприятия в течение суток, режимом рабочей недели, со сменой времен года.

Зависимость мощности от времени  $P=f(t)$ , выраженную графически, называют графиком электрической нагрузки (рис. 12.4).

Различают графики нагрузки индивидуальные (отдельных электроприемников) и групповые.

Путем сложения ординат индивидуальных графиков строят групповые графики, а на основе групповых получают графики электрических нагрузок цехов, предприятий. По длительности периода действия строят графики суточные и годовые, причем годовой график составляют, используя характерные графики за зимние и летние сутки.

На рис. 12.4, а, б в качестве примера показаны суточные графики нагрузки промышленного предприятия и жилого дома.

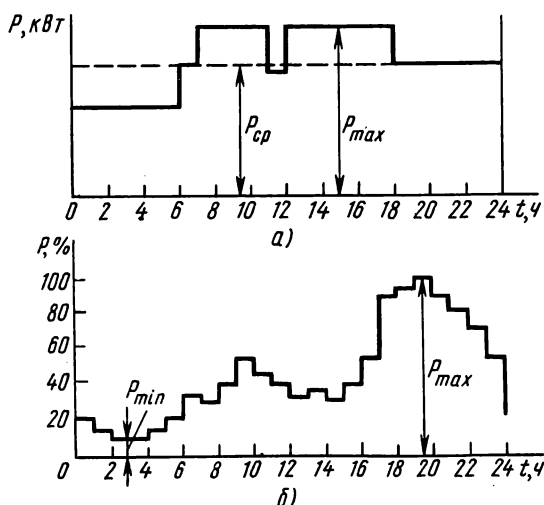


Рис. 12.4

Для расчетов в схемах электроснабжения применяют ряд величин и коэффициентов, определяемых по графикам нагрузки. Из них отметим следующие.

Средняя нагрузка  $P_{\text{ср}}$  — средняя мощность за наиболее загруженную смену.

Максимальная (расчетная) нагрузка  $P_{\text{max}}$  — наибольшая из средних нагрузок длительностью не менее 30 мин в течение смены.

Максимальная кратковременная (пиковая) нагрузка возникает при пусках электродвигателей, при работе электросварочного оборудования, дуговых электропечей. Пиковую нагрузку обычно выражают значением тока.

Установленная мощность — сумма номинальных мощностей группы электроприемников  $P_y = \sum_1^n P_n$ .

Коэффициент использования установленной мощности — отношение средней активной мощности одного электроприемника или группы приемников к установленной активной мощности  $k_{\text{и}} = \sum_1^n P_{\text{ср}} / \sum_1^n P_n$ .

Коэффициент спроса — отношение мощностей максимальной расчетной к установленной  $k_{\text{с}} = P_{\text{max}} / P_y$ .

Коэффициент загрузки электроприемника — отношение мощностей средней фактической к номинальной  $k_z = P_{\text{ср}} / P_{\text{ном}}$ .

#### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Для приведения в движение рабочих машин нужна механическая энергия, для нагревания тел, материалов требуется тепловая энергия, для освещения — световая. Как видно, электрическая энергия непосредственно не используется. В чем состоит основное назначение электрической энергии?

2. Для передачи электроэнергии на большие расстояния напряжение на входе ЛЭП повышают в несколько раз по сравнению с генераторным напряжением. Для этого на электростанциях устанавливают повышающие трансформаторы. В чем состоит смысл такого преобразования напряжения?

3. В местах потребления электроэнергии напряжение понижается с помощью понижающих трансформаторов в конечном счете до рабочего напряжения 220, 380 В. Почему необходимо снижать напряжение до такого уровня?

4. Радиальную схему цеховой силовой сети применяют при неравномерном размещении электроприемников в цехе сосредоточенными группами, а также в помещениях пыльных, пожаро- и взрывоопасных. Что нахо-

дится в основе таких решений — достоинства или недостатки радиальной схемы?

5. На схеме рис. 12.3 показано, что светильники одного помещения распределены группами, из которых одни подключены к одному трансформатору, а другие — к другому. В чем смысл такого включения светильников?

**Задача 12.1.** Определить коэффициент использования установленной мощности группы электроприемников, имеющих следующие показатели: три приемника по 10 кВт,  $k_n=0,15$ ; четыре приемника по 20 кВт,  $k_n=0,2$ ; восемь приемников по 30 кВт,  $k_n=0,1$ ; десять приемников по 40 кВт,  $k_n=0,14$ .

**Задача 12.2.** По графику нагрузки рис. 12.4, б определить среднюю мощность за сутки в процентах от  $P_{\max}$ .

## § 12.2. ЭЛЕМЕНТЫ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Конструктивные особенности различных электрических сетей определяются их назначением, величинами напряжения и электрических нагрузок, местом прокладки линий, их протяженностью и другими факторами. Несмотря на большие отличия в устройстве различных электрических сетей, все они имеют сходные по назначению элементы.

В качестве токоведущих элементов применяют металлические провода и кабели; для изоляции токоведущих элементов друг от друга и от земли служат электроизоляционные материалы и конструкции; во всех сетях установлены коммутирующие аппараты, устройства защиты и контроля.

**Воздушные линии.** Воздушные линии имеют три основных элемента: провода, изоляторы, опоры. Для воздушных линий применяют в основном алюминиевые, стальные, сталеалюминиевые провода, большей частью многопроволочные.

Провода закрепляют на фарфоровых изоляторах, которые, в свою очередь, укреплены на опорах (рис. 12.5, а, б). В зависимости от величины рабочего напряжения в линии применяют изоляторы (рис. 12.6, а, б) разной конструкции: подвесные в виде гирлянды, штыревые с креплением на штырях или крюках. Конструкция опор также зависит от значения рабочего напряжения линии. На рис. 12.5, а показана деревянная опора с креплением проводов на штыревых изоляторах. Для линий высокого напряжения применяют также железобетонные и металлические опоры.

**Кабельные линии.** Для устройства кабельных линий электрических сетей применяют силовые кабели. Кабельные линии дороже воздушных и их применяют там, где воздушные линии проложить невозможно по тем или другим причинам (например, внутри



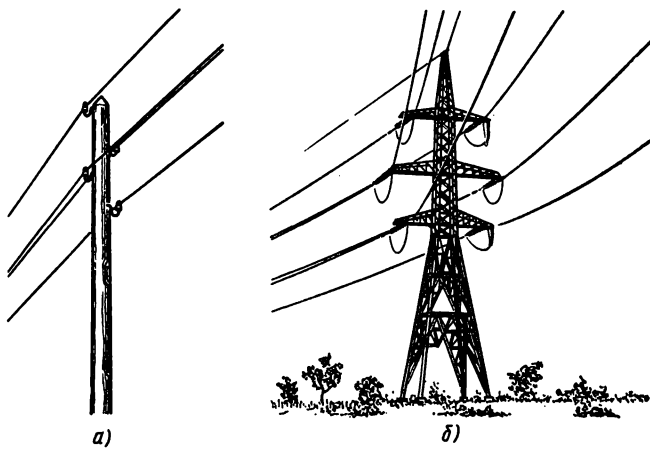


Рис. 12.5

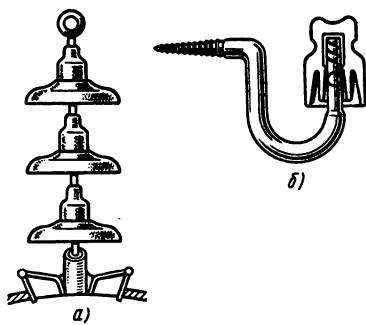


Рис. 12.6

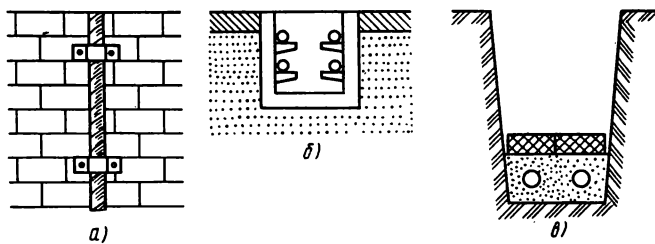


Рис. 12.7

зданий и на территориях промышленных предприятий, на улицах городов и других густонаселенных пунктов).

Внутренние кабельные проводки выполняют открыто по стенам (рис. 12.7, а) и поверхностям строительных конструкций в металлических трубах, в кабельных лотках и коробах, в кабельных каналах (рис. 12.7, б). Кабели прокладывают также в специальных помещениях, являющихся частями зданий (кабельные этажи, двойные полы, кабельные шахты и т. д.), подвешивают на тросах.

Наружную прокладку кабелей выполняют также по стенам и несгораемым поверхностям зданий и сооружений открыто или в трубах; подвешивают кабели на тросах или применяют специальные тросовые кабели.

На территориях предприятий, населенных пунктов кабели прокладывают также в земляных траншеях непосредственно в земле (рис. 12.7, в) или в специальных блоках из труб, кабельных каналах, тоннелях.

**Электропроводки.** Для доведения электроэнергии непосредственно к электроприемникам применяют кабели, а также изолированные провода с одно- или многопроволочными жилами, с резиновой или поливинилхлоридной электроизоляции. Электропровода некоторых марок имеют защитную оболочку хлопчатобумажную или металлическую.

Марку провода и способ прокладки выбирают, учитывая характер производства, тип помещения, условия окружающей среды, удобство прокладки и эксплуатации, а также предназначение провода. Например, провод АППВ используется для открытой прокладки, а провод АППВС — для скрытой проводки в каналах или под штукатуркой.

В качестве распределительных элементов цеховых электросетей, кроме групповых распределительных пунктов (РП) и щитков (РЩ), широко применяют шинопроводы, прокладывая их вдоль цехов или технологических линий. В шинопроводах низкого напряжения применяют плоские алюминиевые, голые или с изоляционным покрытием шины. Для защиты шин от механических повреждений их помещают в кожухи, обычно металлические. Ответвления от магистральных шинопроводов выполняют с помощью специальных вставок.

**Трансформаторные подстанции.** Назначение и роль трансформаторных подстанций в системах передачи и распределения электрической энергии были отмечены ранее. Теперь рассмотрим некоторые вопросы их устройства применительно к подстанциям промышленных предприятий, главным образом цеховых, наиболее близко расположенных к электроприемникам. На трансформаторных подстанциях в любом случае имеются трансформаторы

(один или несколько), распределительные устройства (РУ). При необходимости устанавливают вспомогательные устройства: аккумуляторные батареи или другие источники для питания вторичных цепей (цепей управления, контроля, защиты), конденсаторные батареи для компенсации реактивной мощности и др.

На промышленных предприятиях применяют открытую (наружную) или закрытую (в помещениях) установку оборудования трансформаторных подстанций. Каждый из этих видов установок имеет свои преимущества и недостатки и вопрос о применении того или другого вида решается технико-экономическим сравнением.

Распределительные устройства на подстанции собирают из отдельных элементов, изготовленных заранее (сборные РУ), но во многих случаях, особенно для закрытых цеховых подстанций, предпочитают комплектные РУ, полностью смонтированные на заводе-изготовителе, а на подстанции их устанавливают и делают необходимые подключения линий и трансформаторов.

На цеховых подстанциях часто установлено только одно РУ на одной стороне низкого напряжения (НН), а на другой стороне

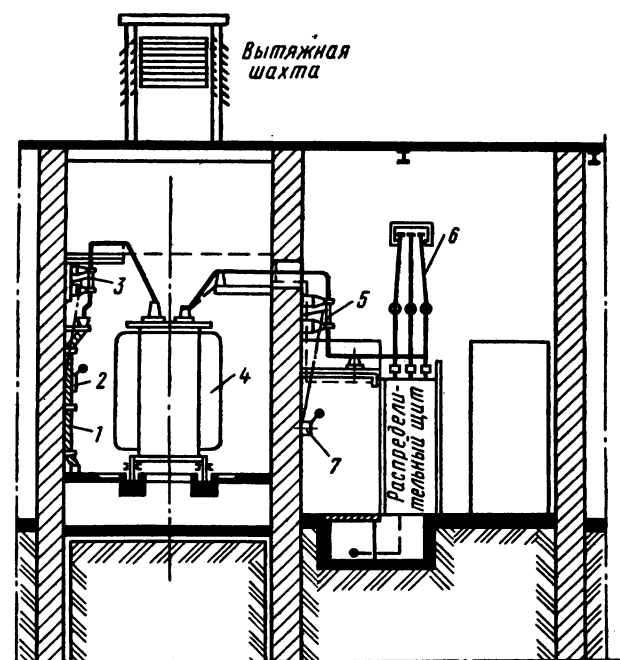


Рис. 12.8

имеется только ввод высокого напряжения (ВН). На рис. 12.8 в качестве примера показана сборная цеховая трансформаторная подстанция, где первичное напряжение 6 кВ понижается до рабочего напряжения цеховой сети 380/220 В.

К трансформатору 4, установленному в отдельной камере, напряжение подано посредством кабеля 1, через разъединитель 3 с рычажным приводом 2. Вторичное напряжение подано на шины распределительного щита, который находится в соседнем помещении, где смонтированы также разъединитель 5 с рычажным приводом 7 и шинопровод 6, который выходит в производственное помещение для питания установленных там электродвигателей. К шинам НН присоединены также кабельные линии к осветительной нагрузке.

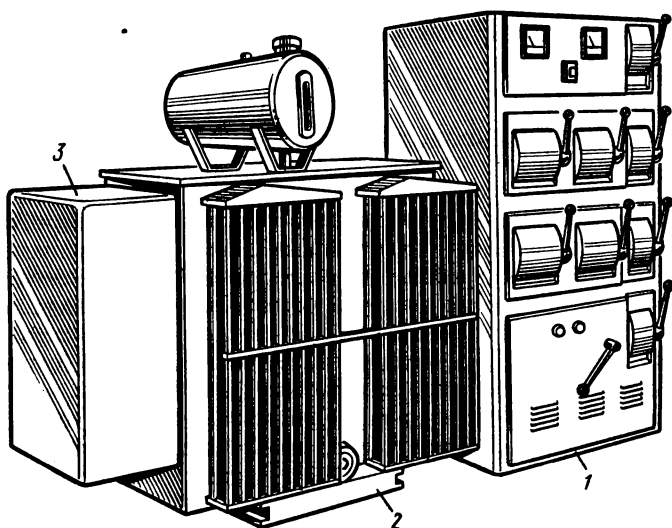


Рис. 12.9

Комплектная трансформаторная подстанция для внутренней установки показана на рис. 12.9, где 1 — распределительное устройство, 2 — силовой трансформатор, 3 — ввод высокого напряжения.

#### *Контрольные вопросы*

1. Сталеалюминиевые провода для воздушных линий изготавливают так, что стальная жила находится внутри, а алюминиевые проволоки расположены снаружи. Какая роль в такой конструкции провода отводится стальной жиле и алюминиевой оболочке? Почему алюминиевая часть провода располагается снаружи?

2. Чем больше рабочее напряжение линии передачи, тем больше размеры: высота опор, расстояние между ними, расстояние между проводами. Как объяснить такое устройство линий?

3. В земляных траншеях кабель прокладывают на глубине 0,7—0,8 м, а под проезжей частью дорог — на глубине 1 м. Кабель укладывают в подушку из песка или просеянного грунта и поверх такой засыпки укладывают кирпичи или бетонную плиту. Чем руководствуются, устраивая так кабельную линию?

4. Прокладку проводов в металлических трубах применяют во многих случаях. Почему такой способ прокладки с дополнительной защитой проводов считают обязательным в пожаро- и взрывоопасных помещениях?

5. Трансформатор на подстанции устанавливают в специальной камере. В нижней части камеры и в перекрытии делают проемы, соединяющие внутреннюю часть камеры с атмосферой. Под трансформатором имеется яма, засыпанная гравием. Для чего предусматривают эти элементы в конструкции трансформаторной камеры?

### **§ 12.3. ВЫБОР ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ**

Электрические сети должны удовлетворять многим технико-экономическим требованиям, из которых отметим основные: безопасность для жизни и здоровья людей, пожарная безопасность, надежность и бесперебойность электроснабжения, высокое качество электроэнергии (прежде всего отклонение напряжения в сети от номинального напряжения электроприемников должно быть в допустимых пределах), высокая экономичность (наименьшие капитальные и эксплуатационные расходы).

Выполнение этих и других требований обеспечивается правильным выбором оборудования, материалов, проводов и кабелей, высоким качеством строительной части и монтажа, выполнением всех правил технической эксплуатации. Рассмотрим вопросы выбора проводов и кабелей применительно к цеховым электросетям.

**Выбор сечений проводов и кабелей по допустимому нагреву.** В проводах и кабелях, нагруженных электрическим током, выделяется теплота, в связи с чем они нагреваются. Процессы нагревания и охлаждения проводов здесь не рассматриваются, так как в предыдущей главе уже рассмотрены аналогичные процессы применительно к электродвигателям. Напомним лишь о том, что установившаяся температура провода тем больше, чем больше потери энергии в нем и чем хуже условия теплоотдачи в окружающую среду.

Длительная надежная служба проводов и кабелей может быть гарантирована, если их температура не превышает допусти-

мой величины, которая зависит от длительности действия тока, материалов токоведущих жил и электроизоляции.

Допустимой температуре соответствует допустимый ток  $I_{\text{дп}}$ . Значения допустимых токов для различных типов (марок) и поперечных сечений проводов и кабелей указаны в справочных таблицах. Они установлены с учетом условий прокладки, температуры окружающей среды ( $25^\circ\text{C}$  — воздуха и  $15^\circ\text{C}$  — почвы).

Для того чтобы выбрать сечение провода или кабеля по нагреву в длительном режиме, надо прежде всего найти расчетное значение тока в линии, принимая по графику нагрузки наибольшую из средних нагрузок длительностью 30 мин в течение смены (получасовой максимум).

Затем в таблице допустимых токов для заданных (выбранных) типа провода (кабеля) и условий прокладки надо найти значение допустимого тока, удовлетворяющего условию

$$I_{\text{дп}} \geq I_{\text{р}}. \quad (12.1)$$

Выбранной величине  $I_{\text{дп}}$  в таблице указано соответствующее сечение токопроводящей жилы провода или кабеля.

В данном случае сечение провода будет выбрано правильно, если значение допустимого тока равно значению расчетного тока  $I_{\text{р}}$ , а при отсутствии в таблице равной величины взята ближайшая большая.

В тех случаях, когда температура окружающей среды отличается от расчетной или надо проложить рядом несколько кабелей, условия охлаждения изменяются, поэтому допустимые токи для тех же поперечных сечений токоведущих жил уточняют с помощью поправочных коэффициентов  $k_{\text{п}}: I'_{\text{дп}} = k_{\text{п}} I_{\text{дп}}$ .

Однако на этом выбор сечения провода или кабеля не завершается, так как выбранное по длительно допустимому току оно может не удовлетворять требованиям экономичности в отношении потери напряжения в сети.

**Выбор сечений проводов и кабелей с учетом защитных аппаратов.** В электрических сетях напряжением до 1000 В для защиты электроприемников, а также питательных и распределительных линий от коротких замыканий и перегрузок применяют плавкие предохранители и автоматические выключатели.

Конструкции плавких предохранителей различны в зависимости от рабочего напряжения в сети, но все они имеют патрон, в котором крепится сменная плавкая вставка из легкоплавкого металла. Защитное действие заключается в том, что в случае превышения определенного значения тока плавкая вставка плавится (перегорает) и отключает электрическую цепь.

Для предохранителей указывают следующие технические

данные: номинальное напряжение  $U_{п.т.}$ , номинальный ток патрона  $I_{п.т.}$ , номинальный ток плавкой вставки  $I_{п.в.}$ .

Плавкая вставка предохранителя должна отвечать двум требованиям: не перегорать при длительном рабочем токе нагрузки  $I_p$  [формула (12.2)], не перегорать при пусковых (пиковых) токах [формула (12.3)]

$$I_{п.в.} \geq I_p; \quad (12.2)$$

$$I_{п.в.} \geq I_{\max}/\alpha. \quad (12.3)$$

Выбирая предохранитель, рабочий ток  $I_p$  одиночного электроприемника принимают равным его номинальному току  $I_p = I_{\text{ном}}$ , для группы электроприемников  $I_p = k_c I_y$ , где  $I_y$  — сумма номинальных токов установленных электроприемников, присоединяемых к данной линии;  $k_c$  — коэффициент спроса, учитывающий, что электроприемники могут работать не одновременно и с неполной нагрузкой.

При выборе плавкой вставки по пусковому условию определяют

$$I_{\max} = I_n + I'_p. \quad (12.4)$$

Применение выражений (12.3) и (12.4) чаще всего связано с пиковыми нагрузками при пуске электродвигателей. Поэтому  $I_n$  — это пусковой ток одного двигателя, наибольший в данной группе двигателей;  $I'_p$  — рабочий ток группы двигателей, за исключением двигателя с наибольшим пусковым током.

Коэффициент  $\alpha$  принимают в зависимости от типа предохранителя и условий пуска (легкий, тяжелый пуск) от 1,6 до 3.

Автоматические выключатели (автоматы) используют для обычных включений и выключений электрических цепей (если они редки), но главное их назначение для автоматического размыкания цепи при длительных перегрузках (действует тепловая защита), при коротких замыканиях и других пиковых перегрузках (действует электромагнитная максимальная защита); при понижении напряжения действует электромагнитная минимальная защита. О выборе автоматов см. [7].

Выбор сечения проводника с учетом аппарата защиты (или проверку сечения, выбранного по нагреву) осуществляют по условию

$$I_{\text{дл}} > k_3 I_{\text{н.з.}}, \quad (12.5)$$

где  $I_{\text{дл}}$  — допустимый ток для выбранного сечения провода;  $I_{\text{н.з.}}$  — номинальный ток плавкой вставки или уставка автомата;  $k_3$  — кратность допустимого длительного тока по отношению к току защитного аппарата.

Сечение провода (кабеля) принимают наибольшее по условиям (12.1) и (12.5).

Защита в электрических сетях должна действовать избирательно (селективно), т. е. отключать только тот участок, в котором произошло короткое замыкание или который длительно перегружен.

**Выбор сечений проводов по допустимой потере напряжения.** Электроприемники работают нормально, если напряжение в электросети  $U_c$  равно их номинальному напряжению  $U_{ном}$ . Стандартами установлены допустимые отклонения напряжения.

Причины отклонения различны, но главная из них связана с потерей напряжения в проводах, которые имеют активное и индуктивное сопротивления.

Потеря напряжения  $\Delta U$  — это алгебраическая разность между напряжением  $U_1$  у источника питания и напряжением  $U_2$  в месте подключения электроприемника. Ее выражают в вольтах или в процентах к номинальному напряжению:

$$\Delta U = U_1 - U_2; \quad (12.6)$$

$$\Delta U \% = 100 \Delta U / U_{ном}. \quad (12.7)$$

Исходя из допустимых отклонений напряжения, определены допустимые потери напряжения в электросетях (на участке от подстанции до электроприемника).

В силовых сетях напряжением до 1000 В допустимая потеря напряжения составляет 6—7 % от номинального, в осветительных сетях — 2—3 %.

В линии постоянного тока длиной  $l$  потеря напряжения  $\Delta U = IR = 2Il / (\gamma S)$ . Отсюда можно определить сечение провода линии, если задано допустимое значение потери напряжения:  $2Il / (\gamma \Delta U)$  или

$$S = \frac{200Pl}{\gamma U_{ном}^2 \Delta U \%}, \quad (12.8)$$

где  $P$  — мощность нагрузки;  $\gamma$  — удельное сопротивление материала провода.

Эта формула пригодна также для однофазной линии переменного тока, если нагрузка выражена активной мощностью, а индуктивное сопротивление линии не учитывается.

Если нагрузка присоединена в нескольких точках линии на расстоянии от ее начала  $l_1$ ;  $l_2$ ;  $l_3$  (рис. 12.10) и задана величинами мощности  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ , то при одинаковом сечении проводов на всех

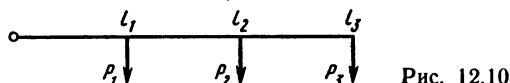


Рис. 12.10



участках линии из формулы (12.8) легко получить формулу

$$S = \frac{200 \sum PI}{\gamma U_{\text{ном}}^2 \Delta U \%}. \quad (12.9)$$

Для трехфазной линии при тех же условиях

$$S = \frac{100PI}{\gamma U_{\text{ном}}^2 \Delta U \%}; \quad S = \frac{100 \sum_{i=1}^n P_n I_n}{\gamma U_{\text{ном}}^2 \Delta U \%}. \quad (12.10)$$

### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Поправочный коэффициент  $k_n$  к формуле (12.1) может быть больше или меньше единицы. В какую сторону от единицы отличается коэффициент  $k_n$ , если: а) температура окружающего воздуха  $35^\circ\text{C}$ ? б) температура почвы  $5^\circ\text{C}$ ? в) рядом параллельно проложены три кабеля?

2. При выборе предохранителя для защиты асинхронного двигателя по условию (12.3)  $I_{\text{max}} = I_n$  — пусковой ток двигателя,  $\alpha = 2,5$ . Что означает величина коэффициента  $\alpha$ ?

3. В цеховой электросети на пути от цеховой подстанции до электроприемника установлены два предохранителя: в начале магистрали (на щите низкого напряжения подстанции) и в начале ответвления к электродвигателю (на групповом щитке). Могут ли быть у этих предохранителей плавкие вставки с одинаковым номинальным током? Если нет, то как они должны отличаться?

4. Отклонения напряжения в электросети от номинальной величины могут быть в сторону повышения и в сторону понижения. Как сказывается отклонение напряжения в ту и другую сторону на работе электродвигателей, ламп электрического освещения?

5. Для выбора сечения проводов линии провели расчет по допустимому нагреву, по пусковым условиям, по допустимой потере напряжения. Сечения оказались различными. Какого сечения провод надо принять для прокладки?

**Задача 12.3.** Асинхронный трехфазный электродвигатель мощностью  $P_{\text{ном}} = 15,2$  кВт;  $U_{\text{ном}} = 380$  В;  $\eta_{\text{ном}} = 0,869$ ;  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,83$ ;  $I_n/I_{\text{ном}} = 5$ . Определить ток плавкой вставки предохранителя и сечения проводов ответвления к двигателю. Ответвления выполнено медными проводами с резиновой изоляцией, проложенными в трубе.

**Задача 12.4.** Трехфазная линия проложена в цехе к распределительному щитку, общая нагрузка которого  $P = 60$  кВт при  $\cos \varphi = 0,8$ . Щиток отстоит от ввода на расстояние 100 м. Линейное напряжение потребителей 380 В. Определить сечение провода линии при следующих условиях: в группе электроприемников имеется один электродвигатель мощностью 28 кВт;  $\eta = 0,9$ , кратность пускового тока  $I_n/I_{\text{ном}} = 5,5$ ,  $\cos \varphi = 0,8$ ; коэффициент спроса группы электроприемников  $k_c = 0,7$ ; допустимая потеря напряжения составляет 5 % от номинального.

## § 12.4. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Надежность и экономичность электроснабжения зависят не только от устройства электрических сетей, но в такой же мере от качества эксплуатации.

Эксплуатация электроустановок объединяет множество различных вопросов. Из них кратко рассмотрим некоторые вопросы экономии электроэнергии, безопасность обслуживания, контроль электроизоляции.

**Компенсация реактивной мощности.** В целях экономии электроэнергии применяют различные меры. В их числе — рациональное ведение технологического процесса, правильная эксплуатация электрооборудования. Большое значение имеет компенсация реактивной мощности в электрических сетях и установках. Подсчитано, что при увеличении коэффициента мощности на 0,01 в масштабе всей страны можно дополнительно получить около 500 млн. кВт·ч электроэнергии.

Энергетический процесс в катушке индуктивности, включенной в цепь переменного тока, характеризуется активной мощностью  $P = UI \cos \varphi$  и реактивной  $Q = UI \sin \varphi$ .

В этом отношении катушке индуктивности подобны многочисленные устройства переменного тока: асинхронные двигатели, индукционные нагревательные установки, трансформаторы, воздушные линии электропередачи и др.

Получая от генераторов электрическую энергию, эти устройства передают или преобразуют ее в другие виды энергии (активная мощность  $P$ ). Одновременно они обмениваются электромагнитной энергией с источниками (реактивная мощность  $Q$ ). Этот обмен нежелателен, но неизбежен, так как без магнитного поля и периодического накопления энергии в нем перечисленные устройства работать не могут. Если реактивная мощность устройства не равна нулю, то его коэффициент мощности  $\cos \varphi < 1$ .

На каждом предприятии одновременно работают электродвигатели, трансформаторы и другие устройства. Чем больше их число и меньше коэффициенты мощности, тем больше общая реактивная мощность электрооборудования производственного участка, цеха, всего предприятия.

Величина общей реактивной мощности установки или электрооборудования предприятия в целом зависит еще и от правильного выбора, степени загрузки электродвигателей, трансформаторов, от соблюдения правил эксплуатации электрооборудования.

Для выяснения влияния величины реактивной мощности на

экономические показатели электрических установок рассмотрим электроприемник (например, асинхронный двигатель), работающий с постоянной активной мощностью при постоянном напряжении в сети.

Ток в электроприемнике, а следовательно, и в проводах, соединяющих его с источником энергии, при этих условиях зависит от величины реактивной мощности  $Q: I = S/U = \sqrt{P^2 + Q^2}/U$ . Чем больше реактивная мощность электроприемника, тем больший ток будет в самом приемнике, в генераторе, соединительных проводах, трансформаторе и в других элементах сети электроснабжения. Мощность тепловых потерь пропорциональна квадрату тока и сопротивлению проводов  $\Delta P = I^2 R$ . Очевидно, чем больше ток приемника, тем больше потери энергии во всех элементах электрической цепи.

Стоимость потерянной энергии входит в эксплуатационные расходы. Уменьшение реактивной мощности электроприемников ведет к уменьшению их токов, сокращению потерь энергии и расходов на эксплуатацию.

Из приведенных рассуждений следует, что реактивную мощность установок, потребляющих реактивную энергию, надо по возможности сокращать.

На практике это достигается правильным выбором мощности асинхронных двигателей, трансформаторов, рациональной эксплуатацией их без недогрузки или работы вхолостую; упорядочением технологического процесса для повышения коэффициента мощности.

Эти и другие меры уменьшения реактивной мощности, связанные с выбором, установкой и эксплуатацией электрооборудования, называют естественными.

В тех случаях, когда естественные меры не могут обеспечить оптимальной величины реактивной мощности установки, принимают искусственные меры ее компенсации. Одной из таких мер является включение параллельно к электроприемникам переменного тока, обладающим индуктивностью, батарей конденсаторов.

Сущность компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторов видна из векторной диаграммы, построенной для схемы параллельного соединения электроприемника (например, асинхронного двигателя или группы двигателей) с батареей конденсаторов (рис. 12.11, а, б).

До включения конденсаторов ток в подводящих проводах  $I_d$  отстает по фазе от напряжения на угол  $\varphi_1$ . После включения их реактивная составляющая  $I_{1p}$  тока двигателя частично компенсируется емкостным током  $I_C$ , в связи с чем ток в подводящих проводах уменьшается до  $I$ , а угол сдвига фаз — до  $\varphi_2$  (в обменном

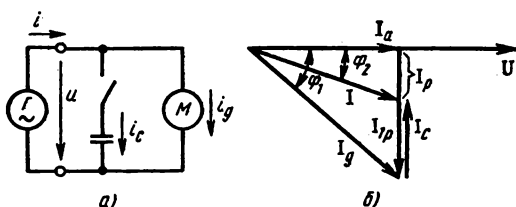


Рис. 12.11

энергетическом процессе между генератором и приемником участвует меньшее количество электромагнитной энергии).

Активная составляющая тока в проводах не изменяется, т. е. по активной мощности режим цепи остается прежним:  $I \cos \varphi_2 = I_g \cos \varphi_1$ .

Ток батареи конденсаторов  $I_C = I_g \sin \varphi_1 - I \sin \varphi_2$ , учитывая, что  $I_g = P/U \cos \varphi_1$ ,  $I = P/U \cos \varphi_2$ , получим формулы для определения тока и мощности конденсаторной батареи:

$$I_C = \frac{P}{U} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2), \quad (12.11)$$

$$Q_C = P (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2), \quad (12.12)$$

$I$ ,  $U$  — ток и напряжение электроприемника;  $P$ ,  $Q$  — активная и реактивная мощности электроприемника;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  — фазовые углы установки до и после компенсации реактивной мощности.

**Защитное заземление в электроустановках.** Металлические части электроустановок преднамеренно соединяют с землей, имея в виду следующие цели: безопасность обслуживания электрооборудования, обеспечение нормальной работы электрооборудования в заданных режимах, защиту электроустановок от атмосферных перенапряжений.

При эксплуатации электрических сетей, промышленного и бытового электрооборудования имеется опасность поражения электрическим током. Поэтому при устройстве и эксплуатации электроустановок предусматривают меры, гарантирующие их безопасное обслуживание. Тем не менее не лишним будет напомнить о необходимости личной предосторожности каждого, кто эксплуатирует электрооборудование, пользуется электрическими устройствами или просто находится на территории электроустановок.

Опасность поражения электрическим током возникает в случае непосредственного прикосновения человека к токоведущим частям, между которыми имеется разность потенциалов или кото-

рые находятся под напряжением относительно земли. Однако поражение возможно и в случае прикосновения к металлическим частям электрооборудования, нормально не находящимся под напряжением. Металлические корпуса электрических машин, трансформаторов, аппаратов, светильников, каркасы распределительных щитов, шкафов, пультов управления, металлические конструкции линий электропередач, подстанций и распределительных устройств, броня и металлические оболочки кабелей, стальные трубы электропроводок, вторичные обмотки измерительных трансформаторов — каждая из этих частей может оказаться под напряжением в случае повреждения электроизоляции.

Для того чтобы избежать опасности поражения электрическим током, все перечисленные части электрооборудования подлежат заземлению. Этой цели могут служить естественные заземлители, находящиеся в земле металлические части зданий и сооружений, трубопроводы (кроме тех, которые предназначены для транспортировки горючих и взрывных жидкостей и газов), металлические оболочки кабелей и т. п.

При отсутствии подходящих естественных заземлителей делают искусственное заземляющее устройство. В землю закладывают (или забивают) электроды длиной 2,5—3 м из угловой, круглой или полосовой стали, верхние концы которых на глубине 0,7—0,8 м соединяют между собой полосовой или круглой сталью. Заземляемые части электроустановки соединяют с заземлителем металлическими проводами (обычно из стали). На рис. 12.12 показано распределение потенциала на поверхности земли в случае

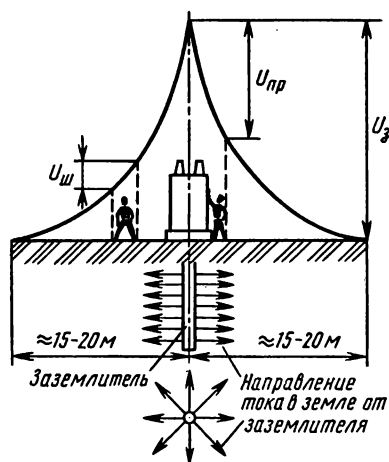


Рис. 12.12

пробоя изоляции электрооборудования и возникновения тока через заземляющий электрод в землю.

По мере удаления от электрода объем грунта, в котором распределяется ток, быстро растет, плотность тока соответственно уменьшается и уже на расстоянии 20 м потенциал практически равен нулю.

При расчете и изготовлении заземляющего устройства учитывают, что в случае пробоя изоляции электрооборудования (т. е. при коротком замыкании на корпус) к телу человека может быть прило-

жена разность потенциалов между корпусом и землей (напряжение прикосновения  $U_{\text{пр}}$ ) или разность потенциалов между участками поверхности земли, на которые опираются ноги идущего или стоящего человека (напряжение шага  $U_{\text{ш}}$ ).

Степень поражения электрическим током зависит от величины, длительности и пути тока в теле человека.

Значение этого тока можно найти из равенства  $I_4 R_4 = I_3 R_3$  и установить, что он тем меньше, чем больше сопротивление тела человека  $R_4$ , чем меньше сопротивление заземляющего устройства  $R_3$  и ток через заземлитель  $I_3$ .

**Защита от статического электричества.** Технологические процессы, в ходе которых происходит трение твердых или жидких диэлектриков о металлические поверхности, изолированные от земли, сопровождаются возникновением зарядов статического электричества. Примером таких процессов является транспортировка сыпучих веществ или жидкостей по металлическим трубопроводам, перемешивание и разбрызгивание жидкостей, изготовление полимерных материалов и изделий и т. п.

Накопление зарядов создает разность потенциалов относительно земли, которая может достигать десятков киловольт.

Если не принимать мер защиты от накопления зарядов, может произойти искровая разрядка между частями технологической установки или на землю, последствием которого могут быть взрыв, пожар, травмы.

Для защиты от статического электричества при проектировании технологических процессов предусматривают меры, устраняющие причины возникновения зарядов. В частности, повышают электропроводность обрабатываемых или транспортируемых материалов, увеличивают электропроводность воздуха путем увлажнения или ионизации, заземляют части технологического оборудования, на которых может возникать статический заряд. При наличии заземляющего устройства для электрооборудования или грозозащиты их можно использовать для защиты от статического электричества, а при отсутствии их изготавливают специальное заземление.

**Контроль электроизоляции.** Вероятность поражения электрическим током практически отсутствует там, где строго выполняют правила устройства и правила технической эксплуатации электроустановок.

Неудовлетворительное состояние электроизоляции создает опасность поражения электрическим током, возникновения пожара, нарушения электроснабжения. Поэтому в электрических установках осуществляют контроль состояния электроизоляции.

Один из способов контроля основан на измерении напряжения между токоведущими жилами и землей. Например, в трех-

фазной сети напряжением до 1000 В три вольтметра включают звездой по схеме рис. 12.13.

Если изоляция в нормальном состоянии, все вольтметры показывают фазное напряжение, одинаковое во всех фазах:

При уменьшении сопротивления изоляции в одной фазе показание вольтметра уменьшится, а в двух других увеличится. Это является сигналом для обслуживающего персонала об отклонении качества изоляции от нормального.

По показаниям вольтметра, включенного по определенной схеме, можно измерить сопротивление изоляции в электроустановке, не находящейся под рабочим напряжением.

Другой способ контроля изоляции — измерение ее сопротивления мегаомметром — применяют, когда рабочее напряжение на электроустановке отсутствует.

Для измерения сопротивления изоляции проводов линии отключают электроприемники и линию от источника напряжения. Зажимы мегаомметра соединяют с проводниками, между которыми измеряют сопротивление изоляции: зажим Л — с токоведущей жилой провода, зажим З — с землей или с жилой другого провода. Затем приводят в действие мегаомметр и на его шкале отсчитывают величину сопротивления. Она должна быть не менее 0,5 МОм. Аналогично измеряют сопротивление изоляции электрических машин и аппаратов.

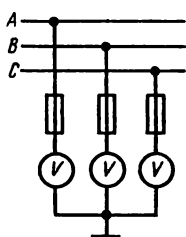


Рис. 12.13

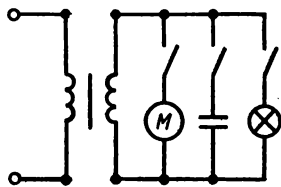


Рис. 12.14

### *Контрольные вопросы и задачи*

1. Для компенсации реактивной мощности конденсаторы можно подключить индивидуально к каждому электроприемнику, на групповом щитке для группы электроприемников или на цеховой подстанции. Какой вариант более выгоден в отношении потерь энергии в проводах цеховой электросети?

2. Генератор переменного тока работает с номинальной мощностью при  $\cos \varphi < 1$ . Полностью или нет загружен первичный двигатель этого генератора?

3. Электрическое сопротивление тела человека зависит от площади прикосновения, состояния кожи в месте прикосновения. В каких случаях сопротивление больше: площадь соприкосновения больше или меньше? кожа чистая или загрязненная? кожа влажная или сухая?

4. Почему в заземляющих устройствах все соединения выполняют сваркой?

5. Какие напряжения покажут вольтметры в схеме рис. 12.13, если в фазе  $A$  из-за порчи изоляции произошло короткое замыкание на землю?

**Задача 12.5.** К трансформатору с номинальной мощностью  $S_{\text{ном}} = 100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$  и номинальным напряжением  $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$  подключена группа электродвигателей, общая активная мощность которых  $P = 60 \text{ кВт}$ ;  $\cos \varphi = 0,6$  при частоте  $f = 50 \text{ Гц}$  (рис. 12.14). Определить емкость и мощность батареи конденсаторов, которую следует включить параллельно двигателям, чтобы коэффициент мощности установки повысить до  $\cos \varphi_2 = 0,9$ .

**Задача 12.6.** Определить мощность осветительной нагрузки, которую можно включить вместе с батареей конденсаторов к трансформатору, указанному в задаче 12.5, чтобы загрузить его до номинальной мощности. Какую величину будет иметь коэффициент мощности в этом случае?



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Партия и правительство нашей страны с первых дней образования Советского государства уделяло особое внимание развитию энергетики. Успешно выполнив Ленинский план ГОЭЛРО, который был основой экономического становления СССР, страна вошла в группу наиболее развитых в экономическом отношении государств.

В настоящее время нам необходимо по всем экономическим показателям выйти на передовые позиции в мире.

В решениях XXVII съезда КПСС отмечено, что высшей целью экономической стратегии партии был и остается неуклонный подъем материального и культурного уровня жизни народа, и реализация этой цели невозможна без успешного выполнения Энергетической программы автоматизации и интенсификации производства на основе электрификации всех отраслей народного хозяйства. Следовательно, энергетика является базой для решений поставленных задач. Это потребует интенсивного труда грамотных в электротехническом отношении специалистов.

Особое внимание в настоящее время уделяется развитию и внедрению вычислительных средств автоматизации машин, оборудования, приборов с применением микропроцессорных средств и созданию на этой основе автоматизированных технологических комплексов. Овладение изложенными в этой книге понятиями, законами и всей теорией электротехники поможет успешному выполнению этой сложной задачи.

В данной книге изложены начальные сведения по электротехнике, необходимые специалисту-технику любого неэлектрического профиля в его практической работе.

## ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

1.1. В точке 3, отстоящей от заряда  $Q_1$  на расстояние 6 см и от заряда  $Q_2$  на 8 см,  $E_3=100$  В/м. 1.2. Если принять  $V=0$  при  $r=d/2$ , то  $V_1=50$  В,  $V_2=-50$  В. 1.3.  $U=10$  кВ,  $d=0,5$  см (принято для слюды флогопит  $E_{\text{пр}}=80$  кВ/мм, для картона  $E_{\text{пр}}=80$  кВ/мм). 1.4. а)  $K=3,33$ ; б)  $K=3$ ; в)  $K=3,75$ . 1.5. а)  $C=8 \cdot 10^{-10}$  Ф,  $E=45,2$  кВ/см; б)  $C=8 \cdot 10^{-9}$  Ф,  $E=45,2$  кВ/см. 1.6.  $U_1=40$  В,  $Q=16 \cdot 10^{-5}$  Кл;  $U=40$  В,  $Q=40 \cdot 10^{-5}$  Кл. 2.1.  $\Delta U=5,6$  В;  $S=15,4$  мм<sup>2</sup>. 2.2.  $R_2=1,15$  Ом;  $t_3=74$  °С. 2.3.  $P_1=50$  кВт,  $E_1=100$  В;  $P_2=100$  кВт,  $E_2=100$  В. 2.4.  $U_1=126$  В,  $U_{2\text{н}}=120$  В. 2.5.  $I=3$  А,  $U=21$  В,  $P_{\text{н}}=63$  Вт;  $P_{\text{н}}=72$  Вт,  $\eta=0,87$ . 2.7.  $I_1=10$  А,  $U_3=72$  В,  $P_2=480$  Вт,  $U=155$  В. 2.8.  $I_1=5$  А,  $U_5=10$  В,  $E=90$  В,  $P_{\text{н}}=450$  Вт. 2.9. Переключатель  $\Pi$  в положении 3:  $I_1=6$  А,  $I_3=-12$  А. 2.10. Переключатель  $\Pi$  в положении 4:  $I_1=4,5$  А,  $I_2=3$  А,  $I_4=7,5$  А. 3.1.  $B_{\text{в}}=10^{-3}$  Тл. 3.2.  $\Psi=27 \cdot 10^{-4}$  Вб. 3.3.  $L=0,3$  мГн. 3.4. а)  $L=0,098$  Гн. 3.5. а)  $L=0,133$  Гн. 3.6. а)  $L=8,64 \cdot 10^{-4}$  Гн,  $I=25$  А. 3.7.  $I=4,5$  А. 3.8.  $I=14,76$  А. 3.9.  $F_{\text{м}}=19,2$  Н (при  $\alpha=90^\circ$ ). 3.10.  $F_{\text{мА}}=249,1$  Н. 3.11.  $E=\pm 150$  В. 3.12.  $R=2$  Ом. 4.1.  $e_{\text{н}}=0$ ;  $E_{\text{м}}=100$  В;  $e_{\text{к}}=0$ . 4.2.  $E=71$  В (при согласном включении). 4.3.  $I=10$  А;  $R=12$  Ом;  $P_1=1780$  Вт. 4.4.  $Q_L=Q_C=2000$  вар. 4.5.  $R=3$  Ом,  $L=12,75$  мГн,  $P=75$  Вт,  $Q=100$  вар. 4.6. а)  $R=10$  Ом;  $C=100$  мкФ;  $L=0,09$  Гн. 4.7. Для всей цепи:  $P=3872$  Вт;  $Q=2904$  вар;  $S=4840$  В·А. 4.8.  $I=8$  А;  $P=1280$  Вт;  $Q=960$  вар. 4.9.  $I=22,4$  А;  $P=2200$  Вт;  $Q=400$  вар. 4.10.  $I=35$  А;  $S=7000$  В·А;  $P=5600$  Вт. 5.1. а)  $U_{\text{н}}=220$  В; в)  $U_{\text{АВ}}=220$  В;  $U_{\text{ВС}}=U_{\text{СА}}=127$  В. 5.2. а)  $E=0$ ; б)  $E=2E_{\text{ф}}$ . 5.3.  $I_{\text{л}}=23,5$  А;  $P=9000$  Вт;  $I_{\text{д}}=13,6$  А,  $P=9000$  Вт. 5.4. а)  $I=38,5$  А. 5.5. а) Лампы включены в двух фазах В, С:  $I_{\text{А}}=0$ ,  $I_{\text{В}}=I_{\text{С}}=0,9$  А,  $I_{\text{Н}}=0,9$  А; б) лампы включены в одной фазе А:  $I_{\text{А}}=0,9$  А,  $I_{\text{В}}=I_{\text{С}}=0$ ,  $I_{\text{Н}}=0,9$  А. 5.6. а) Лампы включены в двух фазах АВ, ВС:  $I_{\text{В}}=0$ ,  $I_{\text{А}}=0,9$  А,  $I_{\text{С}}=0,9$  А; б) лампы включены в одной фазе АВ:  $I_{\text{С}}=0$ ,  $I_{\text{А}}=I_{\text{В}}=0,9$  А. 6.1.  $\Delta I=0,25$  А,  $\gamma=5\%$ . 6.2.  $\Delta P=24$  Вт,  $\gamma=2\%$ . 6.3.  $R_{\text{ш}}=0,0075$  Ом. 6.4.  $R_{\text{зд}}=2490$  Ом. 6.5.  $P_1=P_2=1905$  Вт,  $P=3810$  Вт. 6.6.  $\cos \varphi=0,79$ ,  $C=5$  р. 76 к. 6.7.  $\gamma=2\%$ . 6.8.  $\gamma=5\%$ . 7.1.  $P_{\text{д}}=7200$  Вт,  $Q_{\text{д}}=5400$  вар. 7.2.  $I_1=6,4$  А,  $I_2=160$  А. 7.3.  $R_1=13,5$  Ом,  $X_2=0,125$  Ом,  $\eta=0,962$ ,  $S=10$  кВ·А. 7.4. При индуктивной нагрузке  $\Delta U=4,89\%$ ,  $\eta=0,93$ . 7.5. При соединении обмоток по схеме  $\Upsilon/\Upsilon$ :  $U_2=127$  В,  $K_{\text{л}}=K_{\text{ф}}=26$ . 8.1.  $B=3$  Вм/2. 8.2. При  $P=2n_1=1500$  об/мин. 8.4. При соединении обмоток двигателя треугольником  $I_{\text{ном}}=49,3$  А,  $S=4,7\%$ ,  $f_2=2,35$  Гц,  $M=110$  Н·м. 8.5. При соединении обмоток звездой  $I_{\text{ном}}=19,8$  А,  $M_{\text{ном}}=66$  Н·м,  $M_{\text{пак}}=132$  Н·м,  $I_{\text{н}}=99$  А,  $s=3\%$ . 8.7.  $\beta=8,7\%$ . 8.8.  $R_{\text{г}}=0,06$  Ом. 8.9.  $P=2$ ,  $I_{\text{ном}}=43,35$  А,  $M=181,4$  Н·м (при  $\cos \varphi=0,8$ ). 8.10. При  $P_{\text{ном}}=600$  кВт:  $I_{\text{ном}}=190$  А,  $M_{\text{ном}}=1591$  Н·м,  $Q=571$  квар. 9.3.  $U=120$  В,  $M=93,8$  Н·м. 9.4. При простой волновой об-

мотке:  $M=744 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $n=690 \text{ об/мин}$ . 9.5.  $U_1=201,3 \text{ В}$ . 9.6  $I_a=60 \text{ А}$ ,  $E=235 \text{ В}$ . 9.7.  $n=1050 \text{ об/мин}$ ,  $M=45,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . 9.8. При  $U=110 \text{ В}$ :  $E=90 \text{ В}$ ,  $P_{\text{эм}}=900 \text{ Вт}$ ,  $\eta=0,663$ . 11.1. Две точки естественной характеристики имеют координаты:  $M_x=0$ ,  $n_x=1085 \text{ об/мин}$ ,  $M_{\text{ном}}=244 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $n_{\text{ном}}=1000 \text{ об/мин}$ . 11.2. Координаты четырех точек характеристики.

Режим	Момент, Н·м	Частота вращения, об/мин
Холостой ход	0	750
Номинальный	4 600	730
Критический	11 100	658
Пусковой	2 660	0

11.3.  $P_1=4,9 \text{ кВт}$ ;  $P_2=14,7 \text{ кВт}$ . 12.1.  $k_n=0,14$ . 12.2.  $P_{\text{ср}}=45,6 \%$ . 12.3.  $I_{\text{на}}=80 \text{ А}$ ,  $S=6 \text{ мм}^2$ . 12.4.  $S=25 \text{ мм}^2$ ,  $\Delta U \%=2,9 \%$ . 12.5.  $C=3330 \text{ мкФ}$ ;  $Q_C=50,6 \text{ квар}$ . 12.6.  $P_0=35 \text{ кВт}$ ,  $\cos \varphi_2=0,95$ .

### Некоторые памятные даты из истории электротехники

- 1600 г. Вышел в свет труд В. Гильберта, в котором обобщены научные данные того времени о магнетизме и электричестве и впервые доказано существование магнитного поля Земли.
- 1650 г. Построена первая электростатическая машина.
- 1745 г. Изобретен первый конденсатор (лейденская банка). Академик Г. В. Рихман организовал в Петербурге первую в России лабораторию для изучения электрических явлений.
- 1752 г. Б. Франклин проводил опыты по улавливанию атмосферного электричества с помощью воздушного змея.
- 1753 г. М. В. Ломоносов и Г. В. Рихман проводили количественные исследования явлений атмосферного электричества с помощью «громовой машины» и «указателя» Г. В. Рихмана. Электрическим разрядом убит Г. В. Рихман при проведении опытов с «громовой машиной».  
М. В. Ломоносов представил Петербургской Академии наук диссертацию на тему «Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих».
- 1759 г. Академик Ф. Эпинус впервые отметил наличие связи между электрическими и магнитными явлениями.
- 1785 г. Ш. Кулон установил закон взаимодействия двух наэлектризованных тел.
- 1800 г. А. Вольта изобрел источник электрического тока — «вольтов столб».
- 1802—1803 гг. Академик В. В. Петров открыл явление электрической дуги и указал на возможность ее использования для электроосвещения, электросварки и плавления металлов.
- 1820 г. Х. Эрстедт описал действие электрического тока на магнитную стрелку и действие магнита на ток.  
Ампер установил закон взаимодействия токов.  
Араго открыл явление электромагнитного вращения и установил, что проводник с током имеет магнитные свойства.
- 1821 г. М. Фарадей открыл явление вращения проводника с током вокруг полюса постоянного магнита.  
Открыто явление термоэлектричества.
- 1825 г. Изобретен электромагнит с железным сердечником.
- 1827 г. Г. Ом сформулировал одно из основных положений для электрической цепи — закон Ома.
- 1831 г. М. Фарадей открыл явление электромагнитной индукции.

- 1832 г. П. Л. Шиллинг построил первый в мире электромагнитный телеграф.
- 1833 г. Э. Х. Ленц сформулировал одно из основных положений, относящихся к явлению электромагнитной индукции, — правило Ленца; теоретически установил (в 1838 г. показал экспериментально) обратимость генераторного и двигательного режимов электрической машины.
- 1834 г. Академик Б. С. Якоби построил электродвигатель с непосредственным вращением якоря.
- 1838 г. Начало испытаний на Неве первого в мире судна, приводимого в движение электродвигателем (электрический бот Якоби).  
Б. С. Якоби изобрел гальванопластику.
- 1844 г. Э. Х. Ленц и независимо от него Джоуль установили количественное соотношение при нагревании проводника электрическим током — закон Ленца — Джоуля.
- 1847 г. Г. Кирхгоф сформулировал два закона для разветвленных электрических цепей (законы Кирхгофа).
- 1859 г. Построен первый свинцовый аккумулятор.
- 1867 г. Построена первая электрическая машина с самовозбуждением.
- 1872 г. А. Г. Столетов провел исследования магнитных свойств железа.
- 1873 г. А. Н. Лодыгин демонстрировал опыты уличного освещения с помощью изобретенной им лампы накаливания.
- 1876 г. П. Н. Яблочков изобрел электрическую свечу, новую систему распределения электрического тока и трансформатор (с разомкнутым сердечником).  
Ф. А. Пироцкий проводил опыты по передаче электроэнергии по железнодорожным рельсам.
- 1880 г. Д. А. Лачинов опубликовал первое в мире исследование о передаче электрической энергии на дальние расстояния.
- 1881 г. На международном конгрессе в Париже установлены электрические единицы измерения.
- 1882 г. Н. Н. Бенардос изобрел электросварку с применением угольных электродов.
- 1883 г. Д. Максвелл опубликовал «Трактат об электричестве и магнетизме».
- 1888 г. А. Г. Столетов исследовал фотоэлектрические явления и построил первый фотоэлемент.  
М. О. Доливо-Добровольский изобрел трехфазную систему электрических цепей.  
Г. Феррарис открыл явление вращающегося магнитного поля.  
Г. Герц экспериментально доказал существование электромагнитных волн.
- 1889 г. М. О. Доливо-Добровольский изобрел асинхронный двигатель и трехфазный трансформатор.
- 1891 г. Построена первая трехфазная линия электропередачи (Лауфен — Франкфурт-на-Майне, 175 км, 200 кВт, 15 000 В).
- 1893 г. Н. Г. Славянов на Всемирной выставке получил золотую медаль за способ электросварки под слоем толченого стекла.  
Построена первая в России электростанция по трехфазной системе (1200 кВт, 500 В).

- 1895 г. А. С. Попов изобрел беспроводный телеграф и построил первый радиоприемник (грозоотметчик).
- 1897 г. А. С. Попов установил возможность радиолокации с помощью беспроводного телеграфа.
- 1900 г. А. С. Попов организовал радиосвязь острова Гогланд с материком для руководства работами по снятию с камней броненосца.
- 1911 г. Б. Л. Розинг демонстрировал первую в мире передачу изображения на расстояние.
- 1919 г. Принято решение о строительстве Каширской ГРЭС на подмосковном угле.  
Начала работать в Нижнем Новгороде первая в мире передающая радиотелефонная станция на генераторных лампах.
- 1920 г. Принято постановление ВЦИК о создании комиссии ГОЭЛРО. VIII Всероссийский съезд Советов утвердил план ГОЭЛРО.
- 1922 г. Вступила в эксплуатацию первая в России линия электропередачи при напряжении 110 кВ (Кашира — Москва, 120 км).
- 1931 г. Выполнен план ГОЭЛРО по всем основным показателям.
- 1932 г. Начала работать Днепровская ГЭС.
- 1933 г. Введена в эксплуатацию первая в СССР линия электропередачи при напряжении 220 кВ (Ленинград — Свирь).
- 1937 г. В СССР построен генератор мощностью 100 000 кВт.
- 1954 г. Построена первая в мире атомная электростанция в г. Обнинске (СССР).
- 1956 г. Введена в эксплуатацию линия электропередачи при напряжении 400 кВ (Волжская ГЭС им. В. И. Ленина — Москва, 891 км).
- 1959 г. Введена первая в мире линия электропередачи при напряжении 500 кВ (Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС — Москва).
- 1962 г. Сооружена электропередача постоянного тока при напряжении 800 кВ между полюсами (Волгоград — Донбасс).
- 1967 г. Начата эксплуатация электропередачи переменного тока при напряжении 750 кВ (Конаково — Москва).
- 1973 г. Построена атомная электростанция на быстрых нейтронах (г. Шевченко).
- 1976 г. Построена первая очередь крупнейшей в мире Ленинградской атомной электростанции им. В. И. Ленина (два блока по 1000 МВт).

Т а б л и ц а П.1. Свойства электроизоляционных материалов

Материал	Диэлектрическая прочность	Электрическая прочность, кВ/мм	Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом·см
Асбестовая бумага и ткань	—	1,5—3	$2 \cdot 10^5$
Бакелит (гетинакс):			
цилиндрический	3,8—5	10—15	$10^{11}—10^{15}$
листовой	4,5—6	10—20	$10^{11}—10^{14}$
Бумага кабельная:			
сухая	2,3—3,5	6—9	$10^{13}—10^{14}$
пропитанная маслом	3,4—3,7	10—25	$10^{15}$
Лакированная ткань	3,5—5	32—45	$10^{12}—10^{13}$
Масло трансформаторное	2—2,5	5—18	$10^{12}—10^{13}$
Миканит	4,6—6	15—20	$10^{15}$
Мрамор	8—10	3,5—5,5	$10^9—10^{10}$
Парафин	2—2,2	15—30	$10^{15}—10^{16}$
Электрокартон:			
сухой	2,5—4	8—10	$10^9—10^{13}$
пропитанный маслом	4—5	12—17	$10^{12}—10^{13}$
Слюда мусковит	6—7,5	120—200	$10^{14}—10^{15}$
Слюда флогопит	4—6	80—150	$10^{12}—10^{14}$
Стекло	5,5—10	10—40	$10^{11}—10^{15}$
Фибра	3—5	4—11	$10^{10}$
Фарфор	5—7,5	6—10	$10^{14}—10^{15}$
Шифер	4—16	1,5—3	$10^7—10^{10}$

Т а б л и ц а П.2. Свойства проводниковых материалов

Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup> , кг/дм <sup>3</sup>	Удельная проводимость при 20 °С, м/(Ом·мм <sup>2</sup> )	Удельное сопротивление при 20 °С, Ом·мм <sup>2</sup> /м	Температурный коэффициент сопротивления на 1 °С
Алюминий	2,7	34	0,029	0,004
Константан	8,8	2	0,40—0,51	0,00005
Медь	8,9	57	0,0175	0,004
Манганин	8,14	2,4	0,42	0,000015
Никелин	11,2	2,5	0,40—0,44	0,0003
Нихром	8,2	0,9	1,1	0,0003
Сталь	7,85	10—5	0,1—0,2	0,005
Фехраль	7,6	0,83	1,2	0,0002

Т а б л и ц а 11.3. Характеристики намагничивания стали

В, Тл	Марка стали			
	ЭН, Э12, Э21	Э41, Э42	литая сталь	пермендюр
	Н, А/см	Н, А/см	Н, А/см	Н, А/м
0,1	—	0,40	0,80	0,57
0,2	—	0,50	1,60	0,70
0,3	—	0,60	2,40	0,73
0,4	1,40	0,70	3,20	0,76
0,45	1,52	0,75	3,60	0,79
0,5	1,71	0,85	4,00	0,82
0,55	1,91	0,94	4,43	—
0,60	2,11	1,10	4,88	0,85
0,65	2,36	1,27	5,35	—
0,70	2,61	1,45	5,84	0,88
0,75	2,87	1,65	6,32	—
0,80	3,18	1,85	6,82	0,91
0,85	3,52	2,10	7,45	—
0,90	3,97	2,35	7,98	0,94
0,95	4,47	2,70	8,50	—
1,00	5,02	3,00	9,20	0,97
1,05	5,70	3,40	10,04	1,00
1,10	6,47	3,95	10,90	1,05
1,15	7,39	4,60	11,87	1,10
1,20	8,40	5,40	12,90	1,15
1,25	9,76	6,40	14,30	1,20
1,30	11,40	7,70	15,90	1,25
1,35	13,40	9,70	18,10	1,32
1,40	15,80	13,00	20,90	1,40
1,45	19,50	18,30	24,40	1,50
1,50	25,00	27,5	28,9	1,62
1,55	32,80	38,50	34,30	1,80
1,60	43,70	51,50	41,00	2,00
1,65	58,80	69,50	48,70	2,25
1,70	77,80	89,00	57,50	2,6
2,00	—	—	—	6,2



**Единицы измерения и обозначения  
некоторых физико-технических величин**

Величина	Обозначение величины *	Единица измерения в Международной системе единиц (СИ)		
		название	сокращенное обозначение	размер единицы **
I. Общетехнические величины				
Время	$t(\tau)$	секунда	с	(1 с)
Давление	$p$	ньютон на квадратный метр	Н/м <sup>2</sup>	(1 Н):(1 м <sup>2</sup> )
Длина	$l$	метр	м	(1 м)
Количество теплоты	$Q$	джоуль	Дж	(1 Н) · (1 м)
Масса	$m$	килограмм	кг	(1 кг)
Момент силы; момент пары сил	$M$	ньютон-метр	Н·м	(1 Н) · (1 м)
Мощность	$P$	ватт	Вт	(1 Дж) · (1 с)
Объем	$V$	кубический метр	м <sup>3</sup>	(1 м) · (1 м) × × (1 м)
Плотность	$\rho(\delta)$	килограмм на кубический метр	кг/м <sup>3</sup>	(1 кг):(1 м <sup>3</sup> )
Площадь	$S$	квадратный метр	м <sup>2</sup>	(1 м) · (1 м)
Работа	$A, W, L$	джоуль	Дж	(1 Н) · (1 м)
Сила	$F, f, P$	ньютон	Н	(1 кг) · (1м/с <sup>2</sup> )
Сила света	$J$	кандела	кд	(1 кд)
Сила тяжести	$G$	ньютон	Н	(1 кг) · (1 м/с <sup>2</sup> )
Скорость: линейная	$v$	метр в секунду	м/с	(1 м):(1 с)
угловая	$\omega$	радиан в секунду	рад/с	(1 рад):(1 с)
Термодинамическая температура	$T$	градус Кельвина	К	(1 К)

\* В скобках указаны запасные обозначения.

\*\* В Международной системе единиц (СИ) единицы длины (1 м), массы (1 кг), времени (1 с), силы электрического тока (1 А), термодинамической температуры (1 К), силы света (1 кд) являются основными; единицы угла плоского (1 рад) и угла телесного (1 ср) — дополнительные; единицы прочих величин — производные.

Величина	Обозначение величины	Единица измерения в Международной системе единиц (СИ)		
		название	сокращенное обозначение	размер единицы
Угол плоский	—	радиан	рад	(1 рад)
Угол телесный	$\Omega$	стерадиан	ср	(1 ср)
Удельный вес	$\gamma$	ньютон на кубический метр	Н/м <sup>3</sup>	(1 Н):(1 м <sup>3</sup> )
Ускорение: линейное	$a$	метр на секунду в квадрате	м/с <sup>2</sup>	(1 м/с):(1 с)
угловое	$\epsilon$	радиан на секунду в квадрате	рад/с <sup>2</sup>	(1 рад/с):(1 с)

## II. Электротехнические величины

Емкость электрическая	$C$	фарад	$\Phi$	(1 Кл):(1 В)
Заряд электрический	$Q$	кулон	Кл	(1 А) · (1 с)
Индуктивность собственная	$L$	генри	Гн	(1 Вб):(1 А)
Индуктивность взаимная	$M$	генри	Гн	(1 Вб):(1 А)
Индукция магнитная	$B$	тесла	Тл	(1 Вб):(1 м <sup>2</sup> )
Коэффициент: мощности	$\cos \varphi$	—	—	—
связи	$k$	—	—	—
трансформации	$n$	—	—	—
Мощность; мощность активная	$P$	ватт	Вт	(1 Дж):(1 с)
Мощность полная	$S(P_S)$	вольт-ампер	В · А	(1 А) · (1 В)
Мощность реактивная	$Q(P_Q)$	вольт-ампер реактивный	вар	(1 А) · (1 В)
Напряжение электрическое	$U$	вольт	В	(1 Вт):(1 А)
Напряженность поля: электрического	$E$	вольт на метр	В/м	(1 В):(1 м)
магнитного	$H$	ампер на метр	А/м	(1 А):(1 м)

Величина	Обозначение величины	Единица измерения в Международной системе единиц (СИ)		
		название	сокращенное обозначение	размер единицы
Период колебаний электрической или магнитной величины	$T$	секунда	с	(1 с)
Плотность электрического заряда:				
линейная	$\tau$	кулон на метр	Кл/м	(1 Кл):(1 м)
поверхностная	$\sigma$	кулон на квадратный метр	Кл/м <sup>2</sup>	(1 Кл):(1 м <sup>2</sup> )
объемная	$\rho$	кулон на кубический метр	Кл/м <sup>3</sup>	(1 Кл):(1 м <sup>3</sup> )
Плотность электрического тока	$I$	ампер на квадратный метр	А/м <sup>2</sup>	(1 А):(1 м <sup>2</sup> )
Потенциал электрический	$V$	вольт	В	(1 В):(1 А)
Поток магнитный	$\Phi$	вебер	Вб	(1 В) · (1 с)
Потокоцепление	$\Psi$	вебер	Вб	(1 В) · (1 с)
Проводимость магнитная	$\Lambda$	вебер на ампер	Вб/А	(1 Вб):(1 А)
Проводимость электрическая активная	$G$	сименс	См	(1 А):(1 В)
Проводимость электрическая полная	$Y$	сименс	См	(1 А):(1 В)
Проводимость реактивная	$B$	сименс	См	(1 А):(1 В)
Проводимость электрическая удельная	$\gamma$	сименс на метр	См/м	(1 См) · (1 м): :(1 м <sup>2</sup> )
Проницаемость абсолютная:				
диэлектрическая	$\epsilon_a$	фарад на метр	Ф/м	(1 Кл/м <sup>2</sup> ): :(1 В/м)
магнитная	$\mu_a$	генри на метр	Гн/м	(1 Тл):(1 А/м)
Проницаемость относительная:				

Величина	Обозначение величины	Единица измерения в Международной системе единиц (СИ)		
		название	сокращенное обозначение	размер единицы
диэлектрическая	$\epsilon_r$	безразмерная	величина	(1 Ф/м):
магнитная	$\mu_r$	безразмерная	величина	(1 Ф/м): (1 Гн/м): (1 Гн/м)
Сдвиг фаз между напряжением и током	$\varphi$	—	—	—
Сила коэрцитивная	$H_c$	ампер на метр	А/м	(1 А):(1 м)
Сила магнито-движущая вдоль замкнутого контура	$F$	ампер	А	(1 А)
Сила электро-движущая	$E$	вольт	В	(1 Вт):(1 А)
Скольжение	$s$	безразмерная	величина	
Смещение электрическое	$D$	кулон на квадратный метр	Кл/м <sup>2</sup>	(1 Кл):(1 м <sup>2</sup> )
Сопротивление магнитное	$R_m(r_m)$	ампер на вебер	А/Вб (1/Гн)	(1 А):(1 Вб)
Сопротивление электрическое, сопротивление электрическое постоянному току	$R(r)$	ом	Ом	(1 В):(1 А)
Сопротивление электрическое активное	$R(r)$	ом	Ом	(1 В):(1 А)
Сопротивление электрическое реактивное	$X(x)$	ом	Ом	(1 В):(1 А)
Сопротивление электрическое полное	$Z$	ом	Ом	(1 В):(1 А)
Сопротивление электрическое удельное	$\rho$	ом · метр	Ом · м	(1 Ом) · (1 м <sup>2</sup> ): (1 м)
Ток	$I$	ампер	А	(1 А)

Величина	Обозначение величины	Единица измерения в Международной системе единиц (СИ)		
		название	сокращенное обозначение	размер единицы
Частота колебаний электрической или магнитной величины	$f(\nu)$	герц	Гц	$(1):(1 \text{ с})$
Частота колебаний угловая электрической или магнитной величины	$\omega(\Omega)$	радиан в секунду	рад/с	$(1 \text{ рад}):(1 \text{ с})$
Число: витков пар полюсов фаз многофазной системы	$N(\omega)$ $\rho$ $t$	безразмерные величины		
Энергия электромагнитная	$W$	джоуль	Дж	$(1 \text{ Н}) \cdot (1 \text{ м})$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Евдокимов Ф. Е. Теоретические основы электротехники. М., 1981.
2. Касаткин А. С. Основы электротехники. М., 1982.
3. Попов В. С., Николаев С. А. Общая электротехника с основами электроники. М., 1976.
4. Демидова-Панферова Р. М., Малиновский В. Н., Попов В. С. и др. Электрические измерения. М., 1982.
5. Кацман М. М. Электрические машины. М., 1983.
6. Хализев Г. П. Электрический привод. М., 1977.
7. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода. М., 1981.
8. Постников Н. П., Рубашов Г. М. Электроснабжение промышленных предприятий. Л., 1980.
9. Гаврилюк В. А., Гершунский Б. С., Ковальчук А. В. и др. Общая электротехника с основами электроники. Киев, 1980.
10. Милонзоров В. П. Электромагнитная техника. М., 1974.
11. Квартин М. И. Электромеханические и магнитные устройства автоматики. М., 1979.
12. Васин В. М. Электрический привод. М., 1984.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	4
<b>Глава 1. Электрическое поле . . . . .</b>	<b>11</b>
§ 1.1. Основные свойства и характеристики электрического поля . . . . .	11
§ 1.2. Проводники и диэлектрики в электрическом поле . . . . .	16
§ 1.3. Электрическая емкость. Конденсаторы . . . . .	26
<b>Глава 2. Электрические цепи постоянного тока . . . . .</b>	<b>32</b>
§ 2.1. Электрический ток . . . . .	33
§ 2.2. Основные элементы электрических цепей . . . . .	37
§ 2.3. Основы расчета электрических цепей постоянного тока . . . . .	44
§ 2.4. Электрические цепи с одним источником э.д.с. . . . .	49
§ 2.5. Электрические цепи с несколькими источниками э.д.с. . . . .	52
§ 2.6. Нелинейные электрические цепи постоянного тока . . . . .	56
<b>Глава 3. Магнитное поле . . . . .</b>	<b>59</b>
§ 3.1. Основные свойства и характеристики магнитного поля . . . . .	59
§ 3.2. Индуктивность . . . . .	65
§ 3.3. Магнитные свойства веществ . . . . .	68
§ 3.4. Магнитные цепи . . . . .	74
§ 3.5. Электромагнитные силы. Энергия магнитного поля . . . . .	78
§ 3.6. Электромагнитная индукция . . . . .	83
<b>Глава 4. Однофазные электрические цепи переменного тока . . . . .</b>	<b>90</b>
§ 4.1. Синусоидальные э.д.с. и ток . . . . .	90
§ 4.2. Электрические цепи с активным или реактивным сопротивлением . . . . .	97
§ 4.3. Цепи с активным и реактивным элементами . . . . .	104
§ 4.4. Разветвленная цепь переменного тока . . . . .	110
§ 4.5. Разветвленная цепь переменного тока . . . . .	114
<b>Глава 5. Трехфазные электрические цепи . . . . .</b>	<b>118</b>
§ 5.1. Соединения обмоток трехфазных источников электрической энергии . . . . .	118
§ 5.2. Симметричные трехфазные цепи . . . . .	123
§ 5.3. Трехфазные несимметричные цепи . . . . .	126

<b>Глава 6. Электрические измерения . . . . .</b>	<b>130</b>
§ 6.1. Общие сведения об электрических измерениях и электроизмерительных приборах . . . . .	130
§ 6.2. Измерение тока и напряжения . . . . .	138
§ 6.3. Измерение мощности и энергии . . . . .	143
§ 6.4. Измерение сопротивлений . . . . .	147
<b>Глава 7. Трансформаторы . . . . .</b>	<b>153</b>
§ 7.1. Принцип действия и устройство трансформатора . .	153
§ 7.2. Режим трансформатора . . . . .	161
§ 7.3. Типы трансформаторов и их применение . . . . .	167
<b>Глава 8. Электрические машины переменного тока . . . . .</b>	<b>175</b>
§ 8.1. Магнитное поле электрических машин переменного тока . . . . .	175
§ 8.2. Устройство и рабочий процесс асинхронных электро- двигателей . . . . .	183
§ 8.3. Электромагнитный момент асинхронного электродви- гателя . . . . .	189
§ 8.4. Пуск в ход и регулирование частоты вращения асин- хронных двигателей . . . . .	194
§ 8.5. Синхронные машины . . . . .	203
<b>Глава 9. Электрические машины постоянного тока . . . . .</b>	<b>212</b>
§ 9.1. Устройство и принцип действия электрической маши- ны постоянного тока . . . . .	212
§ 9.2. Рабочий процесс машины постоянного тока . . . .	220
§ 9.3. Генераторы постоянного тока . . . . .	227
§ 9.4. Электродвигатели постоянного тока . . . . .	233
<b>Глава 10. Электрические и магнитные элементы автоматики . .</b>	<b>240</b>
§ 10.1. Общие сведения об элементах и системах автоматики	241
§ 10.2. Измерительные параметрические преобразователи .	244
§ 10.3. Генераторные преобразователи . . . . .	250
§ 10.4. Исполнительные устройства . . . . .	255
§ 10.5. Электромеханические промежуточные элементы автоматики . . . . .	262
§ 10.6. Ферромагнитные элементы автоматики . . . . .	268
§ 10.7. Импульсные ферромагнитные элементы . . . . .	276
<b>Глава 11. Основы электропривода . . . . .</b>	<b>283</b>
§ 11.1. Выбор электродвигателя по механическим характе- ристикам . . . . .	284
§ 11.2. Выбор электродвигателей по мощности . . . . .	288
§ 11.3. Аппаратура для управления электроприводами . .	293
§ 11.4. Релейно-контактное управление электроприводами .	300
§ 11.5. Управление электроприводами с применением бес- контактных аппаратов . . . . .	306



<b>Глава 12. Электроснабжение . . . . .</b>	<b>313</b>
§ 12.1. Схемы электроснабжения . . . . .	313
§ 12.2. Элементы устройства электрических сетей . . . . .	319
§ 12.3. Выбор проводов и кабелей . . . . .	324
§ 12.4. Некоторые вопросы эксплуатации электрических установок . . . . .	329
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>336</b>
<b>Ответы к задачам . . . . .</b>	<b>337</b>
<b>Приложения . . . . .</b>	<b>339</b>
<b>Литература . . . . .</b>	<b>349</b>

*Учебное издание*

**Федор Евдокимович Евдокимов**

## **ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

Зав. редакцией Л. А. Романова. Редактор Е. А. Орехова. Мл. редакторы И. А. Исаева, И. А. Титова. Художественный редактор Т. М. Скворцова. Обложка художника Ю. Д. Федичкина. Технический редактор Е. И. Герасимова. Корректор В. В. Кожуткина

ИБ № 6109

Изд. № Эр-442. Сдано в набор 24.07.86. Подп. в печать 27.01.87. Формат 84 × 108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бум. кн.-журн. Гарнитура литературная. Печать высокая. Объем 18,48 усл. печ. л. 18,48 усл. кр.-отт. 21,0 уч.-изд. л. Тираж 120 000 экз. Зак. № 511. Цена 1 р. 10 к.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136, Ленинград, П-136, Чкаловский пр., 15.

1р. 10к.