

П. А. БУТЫРИН, О. В. ТОЛЧЕЕВ, Ф. Н. ШАКИРЗЯНОВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УЧЕБНИК

Под редакцией П. А. БУТЫРИНА

Рекомендовано

*Федеральным государственным автономным учреждением
«Федеральный институт развития образования» (ФГАУ «ФИРО»)
в качестве учебника для использования в учебном процессе
образовательных учреждений, реализующих программы
начального профессионального образования*

*Регистрационный номер рецензии 778
от 26 декабря 2012 г. ФГАУ «ФИРО»*

11-е издание, стереотипное



Москва
Издательский центр «Академия»
2015

УДК 621.3(075.32)
ББК 31.2я722
Б93

Рецензент —

зав. лабораторией регионального компонента содержания
профобразования НИИРО, канд. пед. наук *А. А. Володарская*

Бутырин П. А.

Б93 Электротехника : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / П. А. Бутырин, О. В. Толчеев, Ф. Н. Шакирзянов ; под ред. П. А. Бутырина. — 11-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2015. — 272 с.

ISBN 978-5-4468-8798-9

Рассмотрены базовые вопросы электрических и магнитных цепей, способы производства и потребления электрической энергии. Описаны конструкция и принцип действия широко применяемых электронных приборов, электрических аппаратов и машин.

Данный учебник рекомендуется для подготовки квалифицированных кадров по профессиям электротехнического профиля.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 621.3(075.32)
ББК 31.2я722

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Бутырин П. А., Толчеев О. В., Шакирзянов Ф. Н., 2010
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2010
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2010

ISBN 978-5-4468-8798-9

ВВЕДЕНИЕ

Электротехника — отрасль науки и техники, связанная с изучением и использованием электрических и магнитных явлений в технических устройствах. Электротехника изучает: электромагнитные явления в технических устройствах; электротехнические устройства — такие технические устройства, принцип действия которых основан на использовании электромагнитных явлений; использование электротехнических устройств в системах производства (генерации), передачи, распределения и преобразования электромагнитной энергии.

Электротехнические устройства используются в быту (осветительные приборы, холодильники, электронагревательные устройства) и на производстве (электрифицированные станки, конвейеры, электросварочные аппараты), в медицине (диагностические аппараты — рентген, томограф и др., медицинские приборы — лазеры, бормашины стоматологов) и военном деле (электроснабжение узлов связи, командных пунктов, аэродромов, стартовых сооружений ракет; электрооборудование самолетов, кораблей и подводных лодок), на транспорте (трамвай, троллейбус, метро, электроподвижной состав железных дорог, электрооборудование автомобилей) и в связи (телефон, телеграф, радиосвязь).

В предмете «Электротехника» изучаются электромагнитные явления в технических устройствах, конструкция электротехнических устройств и их использование для производства, передачи и потребления электромагнитной энергии.

Задачами изучения этого предмета являются: овладение теоретическими основами знаний в области электромагнитных явлений в технических устройствах; знакомство с электротехническими устройствами различного назначения, принципами их работы, характеристиками, энергетическими показателями; получение знаний в области производства, передачи и потребления электромагнитной энергии.

Целью изучения предмета «Электротехника» является общая подготовка будущего специалиста-электротехника к изучению специальных дисциплин и овладению практическими производственными навыками.

Данный предмет основывается на положениях базовых курсов математики и физики. Основными его понятиями являются поня-

тия об электрической энергии (ее генератора и потребителя), электрическом токе и напряжении, мощности, электрической и магнитной цепях, электротехническом устройстве.

Первый электротехнический прибор (компас) был создан в Китае четыре тысячи лет назад. Впоследствии человечество проявляло постоянный интерес к электромагнитным явлениям и их возможному практическому применению. Однако прогресс в этой области был достигнут только в начале XVII в., когда вышел первый научный труд английского ученого У. Гильберта «О магните, магнитных телах и большом магните — Земле», в котором были объяснены магнитные явления вообще и поведение магнитной стрелки компаса в частности, а также исследованы явления, названные автором электрическими.

В середине XVIII в. в г. Лейдене голландским ученым П. Мюнхенбруком был создан источник электрической энергии, получивший название «лейденская банка». В это же время наш великий соотечественник М. В. Ломоносов и его ученик Г. В. Рихман проводили исследование атмосферных электромагнитных явлений с помощью разработанной ими громовой машины — первого электроизмерительного прибора. В 1785 г. французский физик Ш. О. Кулон установил зависимость силы взаимодействия двух заряженных тел от величины зарядов и расстояния между телами — первый в электромагнетизме закон количественного описания явления (закон Кулона).

В XIX в. исследования электромагнетизма достигли своего расцвета: непрерывно открывались новые электромагнитные явления; устанавливались законы, которым эти явления подчиняются; изобретались различные электротехнические устройства.

В области изучения электромагнитных явлений наиболее важными вехами в тот период стали:

1820 г. — открытие датским физиком Х. К. Эрстедом действия электрического тока на магнитную стрелку, позволившее связать электрические и магнитные явления;

1821 г. — открытие немецким ученым Т. И. Зебеком явления термоэлектричества;

1831 г. — открытие английским ученым М. Фарадеем явления электромагнитной индукции;

1888 г. — начало опытов немецкого физика Г. Р. Герца, позволивших установить тождественность свойств электромагнитных и световых волн;

1888 г. — открытие русским ученым А. Г. Столетовым фотоэффекта.

В области развития теории электромагнетизма ключевыми в XIX в. стали следующие этапы:

1820 г. — установление французским физиком А. Ампером силы взаимодействия двух проводников с токами (закон Ампера);

1827 г. — установление немецким физиком Г. С. Омом связи между напряжением, током проводника и его сопротивлением (закон Ома);

1847 г. — установление немецким ученым Г. Р. Кирхгофом двух основополагающих законов теории электрических цепей (первый и второй законы Кирхгофа);

1873 г. — введение английским ученым Д. К. Максвеллом фундаментальной системы уравнений электромагнитного поля (система уравнений Максвелла).

В области создания электротехнических устройств к наиболее важным событиям рассматриваемого периода можно отнести:

1828—1832 гг. — создание русским ученым П. Л. Шиллингом телеграфа;

1832 г. — создание французскими инженерами братьями Пикси электрогенератора;

1834 г. — создание Б. С. Якоби, ученым из Кенигсберга, впоследствии работавшим в России, электродвигателя;

1848 г. — создание немецким механиком Г. Румкорфом трансформатора;

1872 г. — создание русским электротехником В. Н. Чиколевым электрифицированного станка — швейной машины с приводом;

1876 г. — изобретение американским ученым Г. Беллом телефона;

1876 г. — создание русским ученым П. Н. Яблочковым электрической свечи, которой в 1879 г. американский изобретатель Т. А. Эдисон придал вид современной электролампы;

1879 г. — создание немецким инженером Э. В. Сименсом большой электрической железной дороги;

1889 г. — создание русским изобретателем М. О. Доливо-Добровольским трехфазного электродвигателя, позднее — трехфазных трансформатора, электрогенератора и линии электропередачи;

1895—1897 гг. — создание русским ученым А. С. Поповым и итальянским инженером Г. Маркони (независимо друг от друга) радио.

Во второй половине XIX в. зародилась электротехническая промышленность.

Веком электротехники стало XX столетие. Электрификация оказывает все большее влияние на жизнь общества. Показательна в этом отношении история России. В начале XX в. Россия была слабо электрифицированной страной, с неразвитой электротехнической промышленностью, на 70 % контролируемой иностранным капиталом. И если во второй половине XX в. Россия стала экономически мощной державой с передовой промышленностью и достаточно высоким уровнем жизни населения, то в этом огромную роль сыграл план Государственной комиссии по электрификации России (ГОЭЛРО). План ГОЭЛРО — первый в истории человечества план коренного повышения благосостояния народа и уровня

экономики страны — предусматривал строительство электростанций и электрических сетей, скоординированное с развертыванием промышленности и освоением энергоресурсов. Для разработки и реализации плана в 1920 г. под председательством выдающегося ученого и государственного деятеля Г. М. Кржижановского была создана специальная комиссия, в которую вошли самые видные специалисты-электротехники того времени: А. В. Винтер, А. А. Горев, Г. О. Графтио, К. А. Круг, В. Ф. Миткевич, А. А. Смуров, М. А. Шателен. За 15 лет план был перевыполнен и Россия по выработке электроэнергии заняла в 1936 г. второе место в Европе и третье в мире. Уже в 1921 г. появились первые электроэнергетические системы — Московская и Петроградская. В 1930-х гг. начался процесс объединения энергосистем Центра с энергосистемами Средней Волги, Урала и Предуралья, чем было положено начало формирования Единой электроэнергетической системы (ЕЭС) Европейской части страны.

В 1960-х гг. формируется ЕЭС всей страны, связанная с энергосистемами других стран. Объединились и службы диспетчерского управления этими энергосистемами с образованием Центрального диспетчерского управления (ЦДУ). Созданная электроэнергетическая система с ЦДУ имеет очень высокую надежность. В XX в. в ней практически не было крупных системных аварий.

Электрификация способствовала интенсивному развитию тяжелой промышленности, специального машиностроения, авиационной и судостроительной промышленности, что позволило стране в сжатые сроки подготовиться к тяжелому испытанию — Великой Отечественной войне — и с честью выдержать его.

Электрификация существенно изменила характер производства, освободив человека от тяжелого физического и низкоквалифицированного труда, сделав его труд более творческим.

В наши дни такие разделы электротехники, как электротехнология, транспортная и космическая электротехника, светотехника, техника высоких напряжений, промышленная электротехника, медицинская электротехника, электроэнергетика и связанные с ними приборо- и аппаратостроение, компьютерное дело, робототехника, электромашиностроение и т. д. во многом определяют направления научно-технического прогресса.

Учебник состоит из трех разделов. В первом разделе «Электрические и магнитные цепи» рассматриваются понятия, классификация, элементы цепей и методы их расчета, в разделе «Электротехнические устройства» — назначение, классификация, принципы действия электротехнических устройств различного назначения, в разделе «Производство, распределение и потребление электрической энергии» рассматриваются элементы и системы генерации, передачи и преобразования электроэнергии, а также перспективы развития электротехники.

ГЛАВА 1

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Понятие об электрической цепи, электрическом токе, напряжении, электродвижущей силе

Электрическая цепь — совокупность устройств, в которых электромагнитные процессы могут быть описаны с помощью понятий об электродвижущей силе, токе и напряжении.

Отдельное устройство, входящее в электрическую цепь называют *элементом электрической цепи*. Основными элементами электрической цепи являются:

источники электромагнитной энергии (далее — источники) — аккумуляторы, термоэлектрические элементы, электрические генераторы, фотоэлектрические элементы и т.д., — в которых происходит преобразование энергии какого-либо вида (энергии химических реакций, тепловой энергии, механической энергии, световой энергии и т.д.) в электрическую энергию;

элементы передачи электромагнитной энергии — соединительные провода, воздушные линии электропередачи, электрические кабели;

приемники энергии (далее — приемники) — электролампы, электродвигатели и т.д., — в которых электромагнитная энергия преобразуется в энергию какого-либо другого вида (тепловую, механическую и т.д.).

Простейшая электрическая цепь для питания электрической лампы изображена на рис. 1.1, где источником является аккумулятор, приемником — электрическая лампа, а элементом передачи — провода. Рисунки, на которых изображены элементы электрических цепей и соединяющие их провода, называются монтажными схемами.

Прежде чем перейти к классификации и изучению цепей, познакомимся с понятиями электрического тока, напряжения и электродвижущей силы, используемыми в определении электрической цепи.

Электрический ток — явление направленного движения электрических зарядов. За положительное направление тока принимается направление движения положительных зарядов. Силу тока I

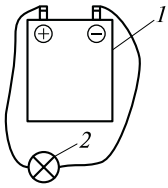


Рис. 1.1. Простейшая электрическая цепь для питания электрической лампы:

1 — аккумулятор; 2 — электрическая лампа

определяют как отношение суммарного заряда q , протекающего через некоторое сечение проводника (в общем случае вещества) за время t , к этому времени: $I = q/t$.

Если за одну секунду (1 с) через это сечение прошел один кулон* (1 Кл) заряда, то единицу тока называют ампером (1 А = 1 Кл/с).

На практике наряду с основной единицей силы тока — ампером используют дольные и кратные единицы: миллиампер (1 мА = $1 \cdot 10^{-3}$ А) и килоампер (1 кА = $1 \cdot 10^3$ А).

Напряжение U участка цепи — отношение работы A электрического поля по перемещению положительного заряда q вдоль этого участка к величине заряда: $U = A/q$.

Если для перемещения заряда в один кулон (1 Кл) требуется совершить работу в один джоуль (1 Дж), то полученную единицу напряжения называют вольт (1 В = 1 Дж/Кл). На практике наряду с основной единицей напряжения — вольт — используют дольные и кратные единицы: милливольт (1 мВ = $1 \cdot 10^{-3}$ В) и киловольт (1 кВ = $1 \cdot 10^3$ В).

Электродвижущая сила (ЭДС) характеризует способность поля сторонних сил (механических, сил химических реакций и т.д.) или индуцированного поля (см. гл. 3) вызывать электрический ток.

Электродвижущая сила E формально определяется так же, как и напряжение: $E = A/q$. Но работа A по перемещению заряда осуществляется силами стороннего поля, и направление ЭДС на участке цепи, на котором она действует, противоположно направлению напряжения этого участка (см. подразд. 1.2 и 1.3). Понятие ЭДС вводится исключительно для тех участков цепи, на которых действуют сторонние силы (в цепи, изображенной на рис. 1.1, это участок с аккумулятором). Единицей ЭДС, как и напряжения, является вольт (В).

В электротехнике ток, напряжение и ЭДС принято обозначать прописными буквами I , U , E , в случае если они неизменны во времени t .

Если же они не постоянны, т. е. являются функциями времени t , то их обозначают соответствующими строчными буквами: $i = i(t)$, $u = u(t)$, $e = e(t)$.

* Заряд элементарной заряженной частицы — электрона — равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

1.2. Элементы, схемы электрических цепей и их классификация

Сложность описания электрических цепей с большим многообразием реальных элементов (линий электропередачи, генераторов, трансформаторов и т.д.) привела к необходимости выделения некоторых идеализированных элементов, с помощью комбинаций которых можно описывать все реальные элементы. К идеализированным элементам электрической цепи (рис. 1.2) относятся: источник ЭДС, источник тока, резистор, конденсатор и индуктивная катушка.

Для источника ЭДС (см. рис. 1.2, *a*) характерным является равенство напряжений между его выводами величине электродвижущей силы: $u_{ba} = u = e$; для источника тока (см. рис. 1.2, *б*) — численное равенство значения тока i элемента значению тока J источника: $i = J$; для резистора (см. рис. 1.2, *в*) — линейная связь напряжения и тока: $u = Ri$ ($i = Gu$, $G = 1/R$); для конденсатора (см. рис. 1.2, *з*) — линейная связь тока элемента с производной напряжения: $i = C \frac{\Delta u}{\Delta t}$; для катушки (см. рис. 1.2, *д*) — линейная связь напряжения с производной тока: $u = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$.

Приведенные выше уравнения электрической цепи называют компонентными уравнениями рассматриваемых элементов, а параметры R , C и L этих элементов — соответственно сопротивлением резистора, емкостью конденсатора и индуктивностью катушки.

Выражение $u = Ri$ называется законом Ома, а произведение мгновенных значений напряжения u и тока i называется мгновенной мощностью $p = ui$. Для резистора $p = ui = Ri^2$ (закон Джоуля — Ленца). Мощность в данном случае определяет количество теплоты, выделяемой резистором в единицу времени. Таким образом, резистор (резистивный элемент) — это элемент, предназначенный для использования его электрического сопротивления. Единицей сопротивления является ом ($1 \text{ Ом} = 1 \text{ В}/1 \text{ А}$), единицей мгновенной мощности — ватт ($1 \text{ Вт} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А}$).

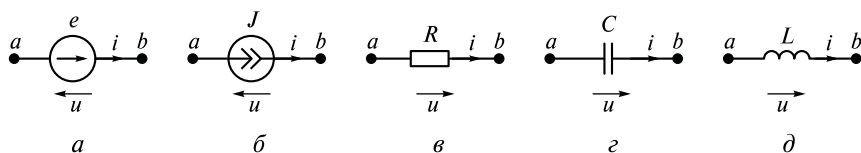


Рис. 1.2. Основные элементы электрических цепей:

a — источник ЭДС; *б* — источник тока; *в* — резистор; *з* — конденсатор; *д* — индуктивная катушка

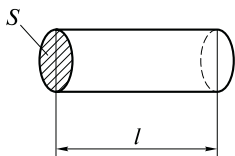


Рис. 1.3. Проводник

Наряду с сопротивлением R резистор иногда характеризуют обратной величиной $G = 1/R$, называемой проводимостью. Единицей проводимости является сименс ($1 \text{ См} = 1 \text{ А/В}$). На схемах указывается одна из этих величин — сопротивление R или проводимость G . Введение проводимости иногда упрощает преобразования уравнений цепи, содержащей несколько резисторов.

Сопротивлением R можно охарактеризовать любой проводник длиной l и площадью сечения S (рис. 1.3). Если ток распределен по сечению проводника равномерно, то $R = \rho \frac{l}{S}$, где ρ — удельное электрическое сопротивление, характеризующее свойства материала проводника.

Единицей удельного электрического сопротивления является ом, умноженный на метр ($\text{Ом} \cdot \text{м}$). В схеме замещения электрической цепи резистивные элементы отражают не только резисторы, но и сопротивления проводов линий электропередачи, сопротивления проводников, из которых выполнены обмотки трансформаторов и электрических машин, и т.п. Удельное электрическое сопротивление некоторых проводников при температуре 20°C , $\text{мКОм} \cdot \text{м}$, составляет:

Серебро	0,016
Медь	0,0175
Алюминий	0,029
Вольфрам	0,056
Сталь	0,13...25
Константан, манганин	0,4...0,5
Нихром	1,1

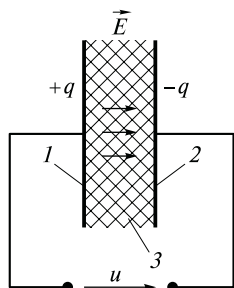


Рис. 1.4. Конденсатор:

1, 2 — металлические пластины; 3 — диэлектрик

Конденсатор (емкостной элемент) запасает энергию электрического поля $W_э = \frac{Cu^2}{2}$;

его мгновенная мощность $p = ui$ характеризует скорость изменения этой энергии во времени. Конденсатор выполняется в виде двух металлических пластин 1, 2, разделенных слоем диэлектрика 3 (рис. 1.4). Емкость, для использования которой и предназначен конденсатор, представляет собой отношение двух равных по величине, но противоположных по знаку зарядов пластин, разнесенных в пространстве, к напряжению этого элемента $C = q/u$. Единицей емкости является фарад ($1 \text{ Ф} =$

= 1 Кл/1В). Емкостью обладает не только конденсатор, но и пары проводов электропередачи, емкостью характеризуется связь каждого из этих проводов с землей. При составлении схемы замещения реальной цепи подобные связи заменяют емкостными элементами, входящими в схему наравне с конденсаторами.

Индуктивная катушка (индуктивный элемент) запасает энергию магнитного поля $W_m = \frac{Li^2}{2}$; ее мгновенная мощность $p = ui$

характеризует скорость изменения этой энергии во времени. Конструктивно такая катушка выполняется из проводника в виде винтовой линии (рис. 1.5). Ток i создает магнитное поле, направление индукции которого (см. гл. 3) показано стрелками. Полагая плотность индукции B одинаковой по сечению S катушки, магнитное поле можно охарактеризовать магнитным потоком $\Phi = BS$. Произведение этого потока на число витков w катушки называют потокоцеплением $\Psi = \Phi w$. Индуктивность характеризует связь между потокоцеплением и вызывающим его током: $\Psi = Li$. Единицей магнитного потока является тесла (1 Тл = 1 Вб · 1м², единицей индуктивности — генри (1 Гн = 1 Тл/1 А).

Таким образом, индуктивная катушка — элемент цепи, предназначенный для использования его индуктивности. Индуктивностью помимо катушек обладают и другие элементы реальных электрических цепей, в частности провода линий электропередачи, что необходимо отражать в схемах замещения соответствующих цепей.

Таким образом, любая часть реальной электрической цепи обладает всеми перечисленными параметрами (R , L , C), а резистор, конденсатор, катушка — элементы, в которых соответственно сопротивление, емкость и индуктивность являются основными параметрами, другими же их параметрами обычно пренебрегают.

Электрическую цепь удобно изображать в виде чертежа, называемого схемой электрической цепи, которая составляется из условных обозначений элементов цепи (рис. 1.6) и показывает их соединение. Так, по монтажной схеме (см. рис. 1.1) можно составить электрическую схему (рис. 1.6, а), в которой источник ЭДС E соответствует аккумулятору, а сопротивление нагрузки (потребителя) R_n — электрической лампе. Если же сопротивление проводов имеет достаточно большое значение (сопоставимое с R_n), то по монтажной схеме можно составить электрическую схему (рис. 1.6, б), в которой резистивный элемент

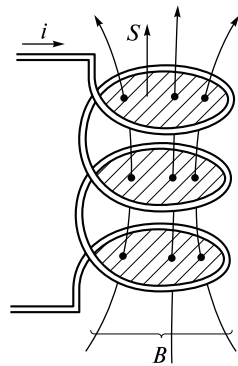


Рис. 1.5. Индуктивная катушка

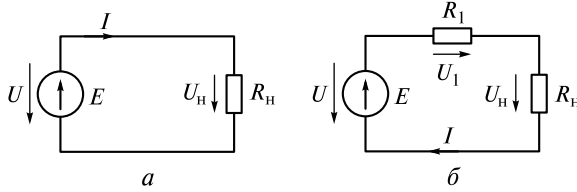


Рис. 1.6. Схемы электрических цепей с малым (а) и большим (б) сопротивлением проводов

R_1 учитывает это сопротивление. Источник энергии может иметь более сложную схему замещения.

Схема электрической цепи, состоящая из источника ЭДС e , резистора R , индуктивной катушки L и конденсатора C изображена на рис. 1.7, а.

В схемах электрических цепей принято выделять ветви — последовательность элементов, имеющих один ток, и узлы — места соединения нескольких ветвей. Так, в схеме, представленной на рис. 1.7, а, можно выделить три ветви с токами i_1, i_2, i_3 соответственно и два узла I и II.

Электрические цепи классифицируют по типу электромагнитных процессов и типу элементов.

По типу электромагнитных процессов электрические цепи подразделяют на цепи постоянного тока (если токи и напряжения всех элементов не изменяются во времени) и цепи переменного тока (если токи и напряжения изменяются во времени). Важным частным случаем цепей переменного тока являются цепи синусоидального тока (токи и напряжения таких цепей изменяются во времени по синусоидальному закону), которые будут рассмотрены в гл. 4.

Наиболее простой класс цепей — цепи постоянного тока, поскольку в схемы их замещения не входят индуктивные катушки и конденсаторы. Из допущения о постоянстве тока из компонентного уравнения катушки $u = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$ (см. рис. 1.2, д) следует, что ее

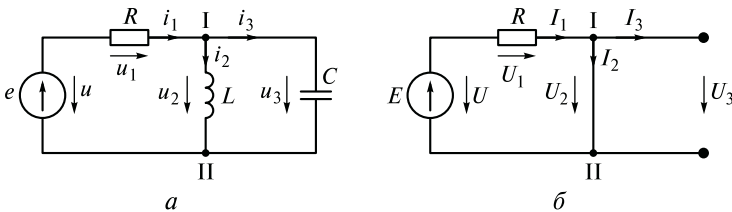


Рис. 1.7. Схемы электрических цепей переменного (а) и постоянного (б) тока

напряжение будет равно нулю, т. е. сама катушка в схеме замещения цепи на постоянном токе будет представлять собой идеальный проводник с нулевым сопротивлением — так называемую закоротку. Из допущения о постоянстве напряжения для конденсатора (см. рис. 1.2, *з*) из компонентного уравнения емкости

$$i = C \frac{\Delta u}{\Delta t}$$

следует, что ток этого элемента равен нулю, а сам элемент будет представлять в схеме замещения на постоянном токе разрыв ветви. Таким образом, схеме электрической цепи переменного тока (рис. 1.7, *а*) при постоянном токе будет соответствовать схема замещения (рис. 1.7, *б*).

По типу элементов электрические цепи подразделяют на линейные и нелинейные. Цепь считается линейной, если все элементы линейны, т. е. их параметры (сопротивления, индуктивности, емкости, ЭДС, токи источников тока) не зависят от интенсивности процессов. Цепь считается нелинейной, если она содержит хотя бы один нелинейный элемент.

1.3. Элементы электрических цепей постоянного тока. Законы Ома и Кирхгофа. Задача расчета цепей

Схемы линейных электрических цепей постоянного тока содержат только три типа элементов — резистивные элементы, источники тока и источники ЭДС. С помощью этих трех идеализированных элементов в схеме электрической цепи постоянного тока можно отразить свойства реальных элементов, в частности источников энергии.

Для того чтобы понять, как это делается, рассмотрим зависимость напряжения от тока $U(I)$ реального источника электрической энергии, например аккумулятора, показанного на рис. 1.1. Подобная зависимость, называемая внешней характеристикой, часто имеет вид наклонной линии (рис. 1.8, *а*). В этом случае ее можно описать уравнением $U = E - R_{\text{вн}} I$.

Входящее в это уравнение внутреннее сопротивление источника

$$R_{\text{вн}} = \frac{m_E}{m_I} \operatorname{tg} \alpha,$$

где m_E и m_I — масштабные коэффициенты; α — угол наклона внешней характеристики к оси абсцисс (оси токов).

Напряжение U на выводах реального источника оказывается меньше его ЭДС из-за частичного падения напряжения на внутреннем сопротивлении $R_{\text{вн}}$. Если $R_{\text{вн}}$ очень мало и внешняя характеристика близка к идеальной (пунктирная линия на рис. 1.8, *а*),

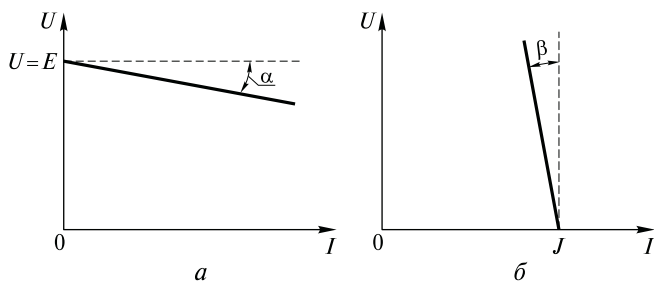


Рис. 1.8. Внешние характеристики реального источника ЭДС (а) и реального источника тока (б)

то им пренебрегают, считая источник идеальным. Именно так было принято при составлении электрических схем (см. рис. 1.6, а, б) по монтажной схеме (см. рис. 1.1). Если же величиной $R_{вн}$ нельзя пренебречь, то внешней характеристике соответствует схема реального источника ЭДС, содержащего источник ЭДС E и сопротивление $R_{вн}$ (рис. 1.9, а). Преобразовав выражение внешней характеристики к виду $I = \frac{E - U}{R_{вн}}$, получим зависимость тока от напряжения, известную как закон Ома для участка цепи.

Для некоторых типов источников внешняя характеристика имеет вид почти вертикальной линии (рис. 1.8, б). В этом случае ее можно описать уравнением $I = J - G_{вн}U$, где внутренняя проводимость источника

$$G_{вн} = \frac{m_I}{m_E} \operatorname{tg} \beta.$$

Такому источнику соответствует схема замещения, показанная на рис. 1.9, б. Если $G_{вн} \approx 0$, т.е. внешняя характеристика близка к пунктирной линии (см. рис. 1.8, б), то такой источник энергии можно считать идеальным источником тока, у которого ток не зависит от напряжения на граничных узлах. В противном случае

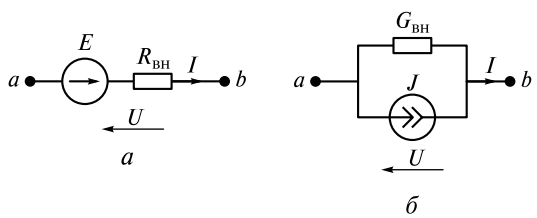


Рис. 1.9. Схемы замещения реального источника ЭДС (а) и реального источника тока (б)

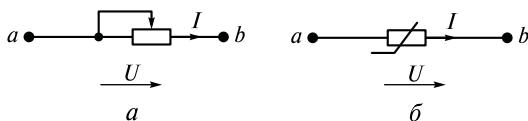


Рис. 1.10. Условные обозначения регулируемого (а) и нелинейного резисторов (б)

ток реального источника I оказывается меньше тока идеального источника J на величину $G_{\text{вн}} U$, представляющую собой ток внутренней проводимости источника.

Заметим, что внешние характеристики, показанные на рис. 1.8, а, типичны для аккумуляторов, батарей фонариков и других гальванических элементов, машин постоянного тока, а внешние характеристики, показанные на рис. 1.8, б, — для источников энергии на основе транзисторов.

На рис. 1.10, а показано условное обозначение регулируемого резистора, сопротивление которого можно изменять в некоторых пределах $R_{\text{min}} \leq R \leq R_{\text{max}}$, что обычно достигается путем механического движения специального скользящего контакта. На рис. 1.10, б показано условное обозначение нелинейного резистора, сопротивление которого зависит от тока I или напряжения U . Конструктивно резисторы различных мощностей и назначения могут сильно отличаться. Общим является использование в их конструкциях материалов с большим сопротивлением — константана, манганина и др. Наряду с рассмотренными силовыми элементами в состав цепи могут входить также измерительные приборы, такие как амперметры (обозначаются буквой A в кружочке) для измерения токов и вольтметры (обозначаются буквой V в кружочке) для измерения напряжения. На рис. 1.11, а показана схема, содержащая один амперметр (для измерения тока I_1) и один вольтметр (для измерения напряжения $U_2 = U_3$). При правильном включении этих приборов не происходит изменения режима (т.е. не изменяются или почти не изменяются токи и напряжения элементов цепи). Это достигается за счет того,

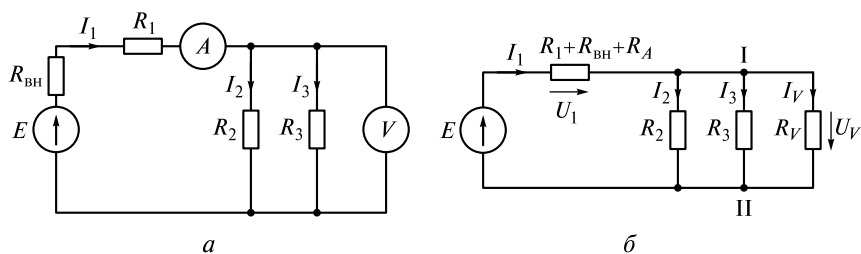


Рис. 1.11. Электрическая схема, содержащая амперметр и вольтметр (а), и ее схема замещения (б)

что внутреннее сопротивление амперметра R_A очень мало, а внутреннее сопротивление вольтметра R_V очень велико. Эти сопротивления можно учесть используя схему, показанную на рис. 1.11, б. Если же $R_A \ll R_{вн}$, а $R_V \gg R_2$ и $R_V \gg R_3$, то можно принять $R_A = 0$, $R_V = \infty$.

Наряду с компонентными уравнениями цепи для полного описания ее электромагнитных процессов применяют два закона Кирхгофа.

Для любого узла справедлив первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма токов ветвей, соединенных с данным узлом, равна нулю. При этом ток, исходящий из узла, берется со знаком «плюс», а подходящий к узлу — со знаком «минус». Для узла I, изображенного на рис. 1.11, б, имеем

$$-I_1 + I_2 + I_3 + I_V = 0.$$

Для любого контура (замкнутого пути, проходящего через несколько элементов) справедлив *второй закон Кирхгофа*: алгебраическая сумма напряжений на всех элементах контура равна нулю. Для практического использования этого закона необходимо задать определенные направления обхода контура, тогда напряжения элементов, совпадающие с направлением обхода, берутся со знаком «плюс», не совпадающие — со знаком «минус». Для одноконтурной схемы, изображенной на рис. 1.6, б, при обходе контура по часовой стрелке имеем $-U + U_1 + U_H = 0$.

В общем случае, если число ветвей цепи равно B , а число узлов — Y , то число независимых уравнений, которые можно составить по первому закону Кирхгофа, равно $Y - 1$, а по второму: $B - (Y - 1) = B - Y + 1$. Таким образом, всего по законам Кирхгофа можно составить B уравнений. Дополнив эти B уравнения B -компонентными уравнениями, получим $2B$ уравнений, необходимых для определения B токов и B напряжений рассматриваемой схемы. Эти $2B$ уравнений называют полной системой уравнений схемы электрической цепи. Они позволяют решить задачу расчета (анализа) цепи — по заданной схеме и значениям параметров рассчитать неизвестные токи и напряжения ветвей.

Пример 1. Для схемы (см. рис. 1.11, б) имеем $B = 4$, $Y = 2$. По первому закону Кирхгофа составляем одно уравнение: $I_2 + I_3 + I_V = I_1$, по второму закону Кирхгофа составляем три уравнения: $U_2 - U_3 = 0$; $U_2 - U_V = 0$; $U_1 + U_2 = E$. Дополнительно составляем четыре компонентных уравнения: $U_1 = (R_1 + R_{вн} + R_A)I_1$; $I_2 R_2 = U_3$; $I_2 R_3 = U_3$; $I_V R_V = U_V$. Решение системы полученных восьми уравнений дает токи и напряжения всех ветвей цепи. Рассмотренный путь анализа будет излишен громоздок.

Для решения подобных сложных задач анализа разработаны специальные методы, которые будут рассмотрены в подразд. 1.4—1.6.

1.4. Преобразования схем в задачах расчета сложных цепей постоянного тока. Метод эквивалентного генератора

При расчете цепей постоянного тока, называемых далее резистивными цепями, можно пользоваться следующими преобразованиями, основанными на использовании компонентных уравнений и уравнений Кирхгофа:

последовательно соединенные резисторы с сопротивлениями R_1 и R_2 (рис. 1.12, а) можно заменить одним эквивалентным резистором с сопротивлением $R_3 = R_1 + R_2$ (рис. 1.12, б), не изменив при этом общего тока I и напряжения U ветви;

параллельно соединенные резисторы с проводимостями $G_1 = 1/R_1$ и $G_2 = 1/R_2$ (рис. 1.13, а) можно заменить одним эквивалентным резистором с проводимостью $G_3 = G_1 + G_2$ (с сопротивлением $R_3 = \frac{1}{G_3} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$) (рис. 1.13, б), не изменив при этом общего тока I и напряжения U рассматриваемого участка цепи;

источник ЭДС E с внутренним сопротивлением $R_{вн}$ (рис. 1.14, а) можно заменить источником тока J с внутренней проводимостью

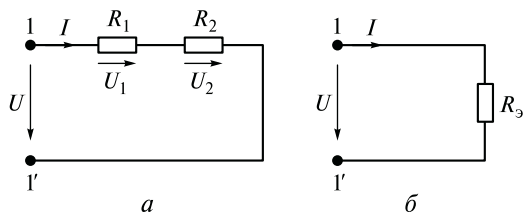


Рис. 1.12. Замена двух последовательно соединенных резисторов (а) одним эквивалентным резистором (б)

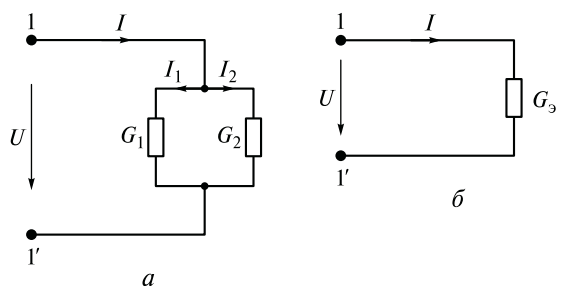


Рис. 1.13. Замена двух параллельно соединенных резисторов (а) одним эквивалентным резистором (б)

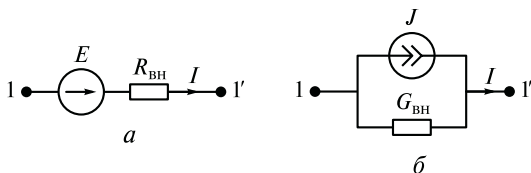


Рис. 1.14. Замена источника ЭДС (а) источником тока (б)

$G_{\text{вн}}$ (см. рис. 1.14, б) при условии: $J = E/R_{\text{вн}}$, $G_{\text{вн}} = 1/R_{\text{вн}}$; аналогично источник тока J с внутренней проводимостью $G_{\text{вн}}$ (см. рис. 1.14, б) можно заменить источником ЭДС $E = J/G_{\text{вн}}$ с внутренним сопротивлением $R_{\text{вн}} = 1/G_{\text{вн}}$ (см. рис. 1.14, а), не изменив при этом общего тока I и напряжения U рассматриваемого участка цепи.

Используя подобные методы преобразования, можно существенно упростить схему цепи и соответственно расчет токов и напряжений. Наряду с подобными методами преобразования при расчете цепей постоянного тока или в более общем случае — любых чисто резистивных цепей — используют и специальные методы упрощения их схем.

Наиболее известным является *метод эквивалентного генератора*, который заключается в эквивалентной замене любого активного (т.е. содержащего источники энергии) двухполюсника (т.е. подцепи, присоединенной к остальной части цепи двумя узлами) А (рис. 1.15, а) источником ЭДС $E_{\text{г}}$, называемой ЭДС эквивалентного генератора с последовательно включенным внутренним сопротивлением $R_{\text{г}}$ (рис. 1.15, б). При этом величина $E_{\text{г}}$ равна напряжению так называемого холостого хода, т.е. напряжению U на разомкнутых зажимах двухполюсника. Это напряжение можно непосредственно измерить, если цепь существует в виде реального устройства, или рассчитать, если она задана в виде схемы с известными параметрами. Внутреннее сопротивление такого генератора определяется, как сопротивление двухполюсника А с замкнутыми источниками ЭДС и разорванными ветвями с источниками тока.

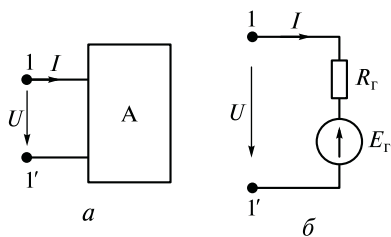


Рис. 1.15. Замена активного двухполюсника (а) эквивалентным генератором (б)

Пример 2. Определим параметры эквивалентного генератора активно-двухполюсника (рис. 1.16, а). Закоротив источник ЭДС E_1 и разорвав ветвь с источником тока J_2 , получим схему (рис. 1.16, б), эквивалентное сопротивление которой $(R_1 + R_2)$ как раз и будет равно внутреннему сопротивлению эквивалентного генератора $R_{\text{г}} = R_1 + 1/G_2$. Для определения ЭДС этого генератора заменим источник тока J_2 с проводимостью G_2 эквивалентной ЭДС $E_2 = J_2/G_2$ с сопротивле-

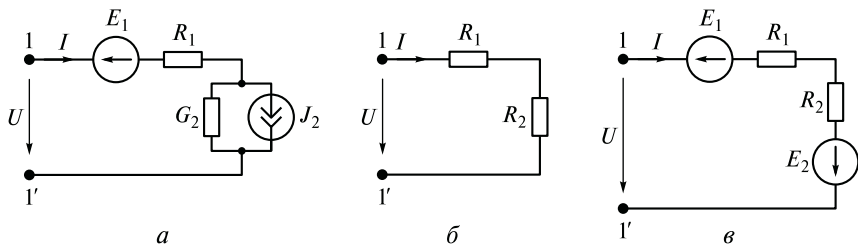


Рис. 1.16. Схемы (а—в) для определения параметров активного двухполюсника

нием $R_2 = 1/G_2$. Напряжение холостого хода ($I=0$) для полученной схемы (рис. 1.16, в) будет $U = E_1 - E_2$. Таким образом, схему, изображенную на рис. 1.16, а, можно заменить эквивалентным генератором, изображенным на рис. 1.15, б с параметрами $E_T = E_1 - J_2/G_2$, $R_T = R_1 + 1/G_2$.

Заменяя отдельные подцепи, соединенные с остальной частью цепи только двумя узлами, подобными эквивалентными генераторами, можно существенно упростить расчет цепи.

Пример 3. Рассчитаем ток источника ЭДС схемы, изображенной на рис. 1.11, б. Заменяя проводимости трех параллельно соединенных резистивных ветвей одной эквивалентной проводимостью $G_T = G_2 + G_3 + G_V$ ($G_2 = 1/R_2$, $G_3 = 1/R_3$, $G_V = 1/R_V$) при $E_T = 0$, а затем рассчитав суммарное сопротивление цепи $R_\Sigma = R_A + R_{вн} + R_1 + R_T$ ($R_T = 1/G_T$) и учтя $E_3 = 0$, получим искомое значение тока $I_1 = E/R_\Sigma$.

Последующий расчет токов и напряжений остальных элементов схемы уже не представляет особой сложности.

В целом методика расчета сложной электрической цепи, основанная на замене ее отдельных подцепей более простыми подцепями (типа эквивалентных генераторов для двухполюсников), называется *диакоптической электрических цепей*.

1.5. Метод узловых напряжений

Рассмотренный в подразд. 1.4 метод расчета сложных резистивных цепей весьма эффективен, но в целом трудно формализуем. Рассмотрим более формальный метод расчета схем электрических цепей. В его основу положена идея записи уравнений первого закона Кирхгофа через напряжения ветвей. Для составления уравнений по методу узловых напряжений необходимо пронумеровать узлы схемы последовательным рядом цифр, начиная с нуля. Узел с номером 0 называют базисным узлом. Система уравнений, составленных по этому методу, имеет следующий вид:

$$G_{11}U_1 - G_{12}U_2 - \dots - G_{1l}U_l = J_{11};$$

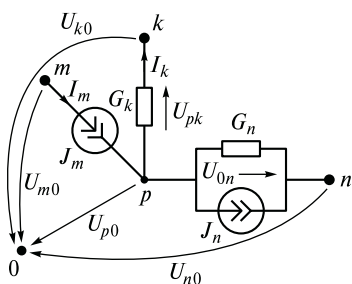


Рис. 1.17. Трехлучевая звезда

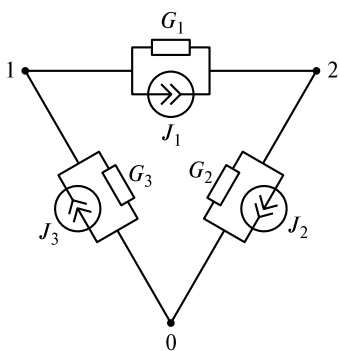


Рис. 1.18. Схема электрической цепи с тремя узлами

$$\begin{aligned}
 -G_{21}U_1 + G_{22}U_2 - \dots - G_{2l}U_l &= J_{22}; \\
 \dots & \\
 -G_{l1}U_1 - G_{l2}U_2 - \dots + G_{ll}U_l &= J_{ll},
 \end{aligned}$$

где $G_{11}, G_{22}, \dots, G_{ll}$ — собственные узловые проводимости узлов 1, 2, ..., l . Каждая j -я из них равна сумме проводимостей ветвей, подходящих к узлу j , где $j = 1, 2, \dots, l$. Проводимость $G_{kl} = G_{lk}$ — общая проводимость узлов k и l , равная сумме проводимостей ветвей между узлами k и l . Напряжения U_1, U_2, \dots, U_l называют узловыми напряжениями. Узловое напряжение U_j — это напряжение узла j относительно базисного узла 0. Если принять потенциал последнего за ноль, то U_j — потенциал j -го узла. Поэтому рассматриваемый метод называют также *методом узловых потенциалов*. Токи $J_{11}, J_{22}, \dots, J_{ll}$ называют узловыми токами. Узловой ток J_{jj} равен алгебраической сумме токов, подсоединенных к узлу j источников тока (знак «плюс» берется в случае, когда источник направлен к узлу j ; знак «минус» — в случае, когда источник направлен от этого узла). Определив из системы уравнений неизвестные напряжения U_j ($j = 1, 2, \dots, l$), можно найти и напряжения всех ветвей. Так, напряжение U_{kp} ветви, соединяющей узлы k и p , будет $U_{kp} = U_k - U_p$. Для составления системы уравнений узлы схемы рассматривают последовательно, начиная с первого узла. Для узла с номером p , изображенного на рис. 1.17, $G_{pp} = G_k + G_n$, $G_{pm} = 0$, $G_{pk} = G_k$, $G_{pn} = G_n$, $J_{pp} = J_m - J_n$, а само уравнение этого узла имеет вид $(G_k + G_n)U_p - G_n U_n - G_m U_m = J_m - J_n$.

Пример 4. Определим напряжение ветвей цепи (рис. 1.18), используя метод узловых напряжений,

$$\begin{aligned}
 G_{11}U_1 - G_{12}U_2 &= J_{11}; \\
 -G_{21}U_1 + G_{22}U_2 &= J_{22},
 \end{aligned}$$

где $G_{11} = G_1 + G_3$; $G_{22} = G_1 + G_2$; $G_{12} = G_{21} = G_1$; $J_{11} = J_3 - J_1$; $J_{22} = J_1 - J_2$; $U_1 = U_{10}$; $U_2 = U_{20}$.

Определив из системы уравнений напряжения U_1 и U_2 , можно найти напряжение первой ветви, для чего следует воспользоваться вторым законом Кирхгофа $U_{12} = U_1 - U_2$.

Пример 5. Рассчитаем с использованием метода узловых напряжений сложную схему, изображенную на рис. 1.11, б. Для этого заменим первую ветвь с суммарным сопротивлением $R = R_{вн} + R_A + R_1$ и ЭДС E ветвью с параллельно соединенными проводимостью $G = 1/R$ и источником тока $J = E/R$. Согласно методу узловых напряжений

$$G_{11}U_1 = J_{11}; \quad J_{11} = J; \quad G_{11} = G_2 + G_3 + G_V + G.$$

Тогда искомое напряжение

$$U_1 = U_{10} = \frac{J_{11}}{G_{11}} = \frac{\frac{E}{R_{вн} + R_1 + R_A}}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R_{вн} + R_1 + R_A}}.$$

Если схема имеет только два узла (как в примере 5), то метод узловых напряжений позволяет весьма просто найти междуузловое напряжение и его называют *методом двух узлов*.

1.6. Метод контурных токов

В основе этого метода лежит идея записи второго закона Кирхгофа через токи ветвей, причем предполагается использовать не все токи, а только те, через которые можно выразить остальные токи.

Пусть схема электрической цепи в качестве источников энергии содержит только источники ЭДС (источники тока при необходимости можно преобразовать в источники ЭДС, см. подразд. 1.4). Если эта схема содержит K независимых контуров ($K = B - Y + 1$, где B — число ветвей; Y — число узлов схемы) с выбранными направлениями обхода этих контуров, то согласно методу контурных токов можно по формальным правилам составить K так называемых контурных уравнений. Покажем это на примере схемы двухконтурной цепи (рис. 1.19, а), направления обхода контуров которой показаны стрелками, а каждому контуру соответствует свой контурный ток $I_{1K} = I_1$, $I_{2K} = I_2$. Согласно методу контурных токов имеем систему уравнений

$$\begin{aligned} R_{11}I_{1K} + R_{12}I_{2K} &= E_{11}; \\ R_{21}I_{1K} + R_{22}I_{2K} &= E_{22}, \end{aligned}$$

где R_{11} и R_{22} — собственные сопротивления контуров 1 и 2, которые равны сумме всех сопротивлений, входящих в соответствующий контур.

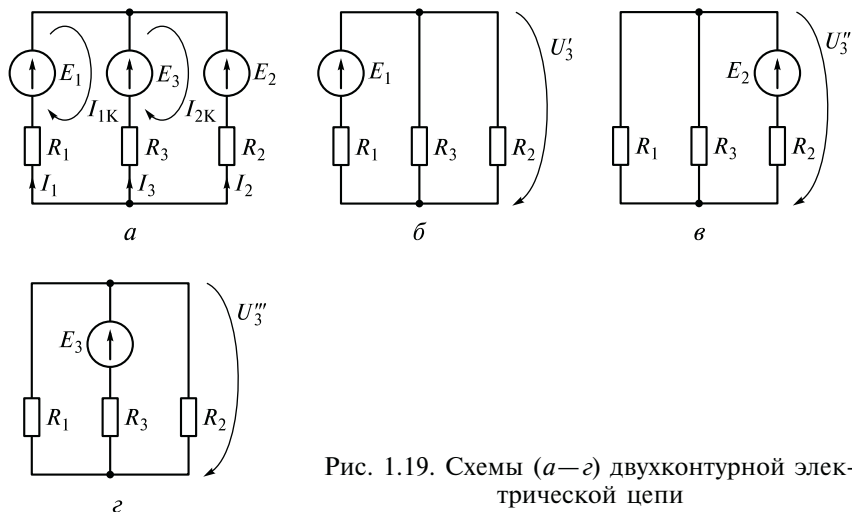


Рис. 1.19. Схемы (а—д) двухконтурной электрической цепи

ющий контур ($R_{11} = R_1 + R_3$; $R_{22} = R_2 + R_3$); $R_{12} = R_{21}$ — общее сопротивление контуров 1 и 2, причем последнее берется со знаком «плюс», если направления обхода контуров совпадают на этом сопротивлении, и со знаком «минус» — если направления обхода контуров не совпадают на этом сопротивлении (в нашем случае $R_{12} = R_{21} = -R_3$); E_{11} и E_{22} — контурные ЭДС, равные алгебраической сумме ЭДС, входящих в контуры 1 и 2 (знак «плюс» берется в случае, когда направление ЭДС совпадает с направлением обхода контура, знак «минус» — в противном случае), в нашем случае $E_{11} = E_1 - E_3$; $E_{22} = E_3 - E_2$.

Итак, система контурных уравнений имеет вид

$$\begin{aligned} (R_1 + R_3)I_{1K} - R_3I_{2K} &= E_{11}; \\ -R_3I_{1K} + (R_2 + R_3)I_{2K} &= E_{22}. \end{aligned}$$

Решив ее относительно токов $I_{1K} = I_1$ и $I_{2K} = I_2$, можно ток I_3 найти по первому закону Кирхгофа $I_3 = I_{1K} - I_{2K}$. Метод контурных токов можно обобщить для схемы цепи, содержащей любое число контуров.

1.7. Принцип наложения

В линейных электрических цепях результат действия каждого источника не зависит от действия других источников, на чем основывается расчет электрических цепей согласно *принципу наложения* (его еще называют *принципом суперпозиции*). Согласно этому принципу вначале рассчитываются токи и напряжения в элементах цепи, обусловленные действием первого источника полагая,

что остальные источники отсутствуют (источники ЭДС считаются закороченными, а источники тока — разомкнутыми). Аналогичным образом рассчитываются токи и напряжения, обусловленные действием второго, третьего и других источников. Алгебраическая сумма этих частных результатов дает искомое распределение (режим) токов и напряжений ветви.

Пример 6. Рассчитаем напряжение третьей ветви (см. рис. 1.19, *а*), пользуясь принципом суперпозиции. Предположим, что источники ЭДС E_2 , E_3 закорочены (см. рис. 1.19, *б*). Тогда сопротивления R_2 и R_3 как параллельно соединенные можно заменить эквивалентным сопротивлением и напряжение третьей ветви, обусловленное действием ЭДС E_1 , согласно методу двух узлов, будет

$$U_3' = \frac{\frac{E_1}{R_1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}.$$

Заметим, что это выражение можно было бы получить, применив метод двух узлов к схеме, представленной на рис. 1.19, *б*.

Затем предположим, что закорочены источники ЭДС E_1 , E_3 , и аналогичным образом рассчитаем напряжение в этой ветви, обусловленное действием только ЭДС E_2 (см. рис. 1.19, *в*):

$$U_3'' = \frac{\frac{E_2}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}.$$

Далее предположим, что закорочены источники ЭДС E_1 и E_2 , и найдем напряжение, обусловленное действием ЭДС E_3 (см. рис. 1.19, *г*):

$$U_3''' = \frac{\frac{E_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}.$$

Окончательно находим $U_3 = U_3' + U_3'' + U_3'''$,
или

$$U_3 = \frac{\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} + \frac{E_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}.$$

Несложно убедиться в том, что последнее выражение представляет собой запись уравнения, составленного по методу двух узлов для схемы, изображенной на рис. 1.19, *а*, что и подтверждает справедливость наших выкладок.

Принцип наложения следует из линейности уравнений, описывающих линейные электрические цепи, и в общем случае не применим для цепей нелинейных.

1.8. Энергетические соотношения в цепях постоянного тока

Важнейшим законом, характеризующим энергетическую сторону процессов в электрических цепях, является закон сохранения энергии. Для резистивной электрической цепи закон сохранения энергии записывается в виде равенства суммы генерируемых всеми источниками мощностей сумме потребляемых (преобразуемых в теплоту) мощностей потребителей — резисторов. Так для цепи, схема которой показана на рис. 1.6, б, имеем $EI = U_1 I + U_n I$.

В справедливости данного равенства несложно убедиться, подставив значения U_1 , U_n , I (см. пример 1, подразд. 1.3) в его левую и правую части. Смысл этого утверждения — вся производимая (генерируемая) источниками энергия расходуется потребителями (преобразуется в теплоту согласно закону Джоуля — Ленца, см. подразд. 1.2). Напомним, что мощность характеризует интенсивность энергетического процесса и определяется как генерируемая (для источников) или потребляемая (для резисторов) энергия в единицу времени.

Наряду с выполнением закона сохранения энергии, энергетическую сторону процессов в цепи, состоящей из генераторов, потребителей (нагрузка) и элементов передачи энергии, удобно характеризовать коэффициентом полезного действия (КПД). Под КПД понимается отношение потребляемой нагрузкой мощности к мощности генерируемой источниками энергии, выраженное в процентах. Так для цепи, изображенной на рис. 1.6, б, имеем

$$\text{КПД} = \frac{p_n}{p_r} 100 = \frac{I^2 R_n}{IE} 100 = \frac{R_n}{R_n + R_1} 100,$$

т. е. КПД подобной передачи энергии тем больше, чем меньше ее сопротивление R_1 .

1.9. Нелинейные цепи постоянного тока

Нелинейные цепи содержат элементы, компонентные уравнения которых нелинейны. Нелинейными могут быть как уравнения источников, и тогда нелинейными окажутся их внешние характе-

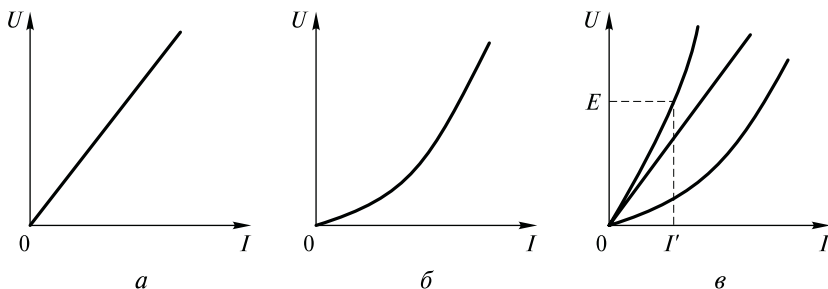


Рис. 1.20. Вольт-амперная характеристика линейного (а) и нелинейного (б) резисторов, а также их последовательного соединения (в)

ристики, так и уравнения резистивных элементов, тогда нелинейными будут их *вольт-амперные характеристики* (ВАХ) — зависимости $U(I)$. Вольт-амперная характеристика линейного резистора (рис. 1.20, а) имеет вид прямой, проходящей через начало координат плоскости U, I , в соответствии с уравнением $U = IR$. Пример ВАХ нелинейного резистора представлен на рис. 1.20, б.

Для нелинейных цепей неприменим принцип наложения. Их расчет, связанный с решением нелинейных компонентных уравнений, отличается большой сложностью. В ряде простейших случаев, когда ВАХ элементов схемы задана графически, а число таких элементов относительно невелико, расчет цепей с нелинейными элементами удобно выполнять графическим методом. Покажем это на примере цепи, схема которой изображена на рис. 1.6, б, предположив, что характеристика резистивного элемента R_1 линейна (см. рис. 1.20, а), а характеристика нагрузки R_n нелинейна (см. рис. 1.20, б). Согласно второму закону Кирхгофа напряжения этих элементов складываются, а поскольку они соединены последовательно (т.е. их токи равны), то ВАХ их соединения можно построить, складывая ординаты ВАХ (см. рис. 1.20, а, б) при одинаковых абсциссах. Результат такого сложения представлен на рис. 1.20, в. Пересечение этой ВАХ прямой, соответствующей внешней характеристике источника ЭДС E , дают искомого решение I' .

Заметим, что линейными элементы и, следовательно, цепи, их содержащие, оказываются лишь в определенном диапазоне интенсивностей процессов. Выход за этот диапазон приводит к нелинейности. Иногда нелинейность нежелательна, но часто эта особенность элемента определяет его практическую значимость. Так, принцип действия вентиля, пропускающих ток лишь в одном направлении, основан на нелинейности их характеристик. Класс нелинейных цепей гораздо более общий, чем цепей линейных, и современная электротехника по большей части электротехника нелинейная.

Контрольные вопросы

1. Что такое электрическая цепь, монтажная схема, схема электрической цепи? Объясните, какую роль играет монтажная схема при составлении схемы электрической цепи.
2. Что такое электрический ток, электрическое напряжение, электродвижущая сила? Если формально электрическое напряжение и электродвижущая сила определяются одинаковыми выражениями, то в чем заключается отличие этих понятий?
3. Напишите выражения закона Ома, закона Ома для участка цепи и закона Ома для полной цепи.
4. Что такое внешняя характеристика источника электрической энергии?
5. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа.
6. В чем заключается метод эквивалентного генератора?
7. Сформулируйте принцип наложения в линейных цепях.
8. Каково соотношение генерируемых и потребляемых мощностей в цепях постоянного тока?
9. Какие электрические цепи называются нелинейными?
10. Соблюдаются ли для нелинейных цепей законы Кирхгофа? Объясните, почему для этих цепей не применим принцип наложения.

Темы рефератов

1. Методы расчета линейных электрических цепей постоянного тока.
2. Расчет нелинейных электрических цепей постоянного тока.

2.1. Магнитное поле: основные понятия и величины

Магнитное поле возникает всегда, когда имеются движущиеся электрические заряды или электрический ток. Часто магнитное поле возбуждается особыми веществами, называемыми постоянными магнитами. Чтобы использовать магнитное поле, надо знать его свойства. Основным свойством магнитного поля является силовое воздействие на движущиеся в нем заряженные тела или на проводники с током. Силовое воздействие зависит также от свойств вещества, вносимого в магнитное поле.

Магнитное поле обладает определенной направленностью, оно характеризуется вектором. Обычно магнитные поля представляются с помощью силовых линий. Силовая линия магнитного поля является воображаемой линией, касательная к которой совпадает с индукцией магнитного поля B . Вектор \vec{B} совпадает с положением магнитной стрелки магнитного компаса (рис. 2.1). Магнитные силовые линии всегда замкнуты. На рис. 2.1 показаны силовые линии постоянного магнита, а на рис. 2.2 — магнитное поле проводника с током.

У постоянных магнитов (или у намагниченных стержней) всегда имеется два полюса: N — норд (северный), откуда выходят силовые линии, и S — зюйд (южный), куда они входят. Если внести в магнитное поле магнитную стрелку, она всегда будет ориентирована по касательной к силовой линии, причем направление силовой линии показывает магнитный полюс N стрелки.

Магнитное поле часто создается с помощью электрического тока I , протекающего по обмотке, например, соленоиду. Соленоидом называют катушку с сердечником из магнитного материала

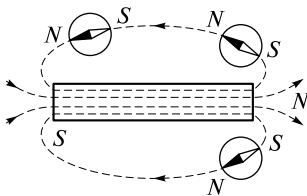


Рис. 2.1. Магнитные силовые линии постоянного магнита

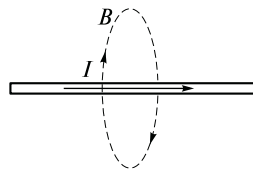


Рис. 2.2. Магнитное поле проводника с током

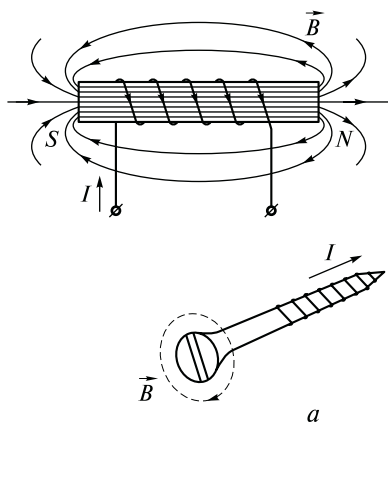


Рис. 2.3. Магнитное поле соленоида

Рис. 2.4. Правила правого винта (а) и правой руки (б)

(рис. 2.3). Образующееся в этом случае магнитное поле так же будет иметь два полюса.

Направление магнитного поля (направление вектора индукции \vec{B}) можно найти с помощью правила правого винта (рис. 2.4, а) или правила правой руки (рис. 2.4, б). Направив ток проводника по ходу правого винта, по вращению головки винта определяем направление магнитного поля B проводника с током. Поле в соленоиде проще находить по правилу правой руки. Для этого нужно расположить пальцы правой руки по направлению тока в витках соленоида, тогда большой палец укажет направление силовой магнитной линии.

Магнитная индукция B определяет силовые свойства магнитного поля. Единицей измерения магнитной индукции является тесла (Тл).

Для расчета магнитных полей применяют и другую физическую величину — напряженность магнитного поля H . Единицей напряженности магнитного поля является ампер на метр (А/м). Связь между индукцией и напряженностью магнитного поля в немагнитных материалах определяется выражением $B = \mu_0 H$, где μ_0 — магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$. Напряженность

\vec{H} также является векторной величиной и совпадает по направлению с вектором индукции \vec{B} .

Если силовые магнитные линии пронизывают некоторую поверхность площадью S , то используют понятие магнитного потока Φ через данную площадь: $\Phi = BS$. Единицей магнитного потока является вебер (Вб).

2.2. Магнитные свойства веществ

Вещества, помещенные в магнитное поле, ведут себя по-разному. Такие вещества, как золото, серебро, медь, цинк и ряд других, незначительно ослабляют магнитное поле внутри вещества. Их называют диамагнетиками.

Платина, магний, алюминий, хром, палладий, щелочные металлы, кислород и др. наоборот незначительно увеличивают магнитное поле. Они называются парамагнетиками.

Вещества, в которых собственное (внутреннее) магнитное поле может в сотни и тысячи раз превосходить вызвавшее его внешнее поле, называются ферромагнетиками. К ним относятся железо (Fe), кобальт (Co), никель (Ni), некоторые редкоземельные элементы, а также сплавы на базе этих элементов.

В электротехнике принято подразделять все вещества на магнитные (ферромагнетики) и немагнитные (диамагнетики и парамагнетики).

Поскольку магнитное поле в немагнитных материалах практически не изменяется при воздействии внешнего поля, особый интерес вызывают ферромагнетики. Ферромагнетизм обусловлен наличием в веществе маленьких намагниченных областей — доменов, в которых магнитные моменты атомов имеют одно и то же направление. В принципе каждый домен является маленьким магнитом. Домены можно увидеть в не очень сильный микроскоп.

Ферромагнетик состоит из большого числа доменов, которые при отсутствии внешнего магнитного поля ориентированы произвольным образом, так что ферромагнетик остается немагнитным.

При помещении ферромагнетика во внешнее магнитное поле домены, направление которых близко к направлению силовых линий внешнего поля, начинают расти, а домены, намагниченные против внешнего поля, уменьшаются и, наконец, исчезают. При дальнейшем увеличении напряженности внешнего поля все домены устанавливаются вдоль силовых линий поля, наступает магнитное насыщение и намагниченность почти не растет.

Если теперь уменьшить напряженность внешнего поля до нуля, то ориентация доменов нарушится лишь частично, поэтому намагниченность ферромагнетика уменьшается, но не до нуля. Чтобы уничтожить остаточную намагниченность образца, нужно приложить внешнее поле противоположного направления. Напряженность такого поля называется коэрцитивной силой H_c . Для каждого ферромагнетика существует температура, выше которой его ферромагнитные свойства исчезают. Она называется точкой Кюри. Для железа точка Кюри равна 768°C , для никеля — 358°C , а для кобальта — 1120°C .

Для расчета индукции магнитного поля B в ферромагнетике используют выражение, которое учитывает способность к намагничиванию материала, $B = \mu_r \mu_0 H = \mu_a H$, где H — напряженность внешнего магнитного поля; μ_r — относительная магнитная проницаемость материала; μ_a — абсолютная магнитная проницаемость материала.

Свойства ферромагнетиков намагничиваться учитываются μ_r , поэтому для ферромагнетиков $\mu_r \gg 1$, в то время как в немагнитных материалах $\mu_r \approx 1$.

2.3. Характеристики магнитных материалов

Основными характеристиками ферромагнетиков являются кривая намагничивания $B(H)$ и петля гистерезиса (рис. 2.5, а). Для получения петли гистерезиса необходимо плавно увеличивать H от нуля до H_{\max} , а затем уменьшать от H_{\max} до $-H_{\max}$.

После ряда циклов намагничивания получится замкнутая кривая, которая называется циклом гистерезиса. При разных значениях H_{\max} получаем семейство петель гистерезиса (рис. 2.5, б). Если величина напряженности магнитного поля превышает значение, при котором наступает магнитное насыщение, т.е. $H_{\max} \geq H_s$, то размеры петли больше не увеличиваются, растут только безгистерезисные участки (1—2 и 5—6 см. на рис. 2.5, а). Такая петля называется предельной петлей гистерезиса.

Намагничивание ферромагнитного материала, впервые помещенного в магнитное поле, происходит по линии 0—1. Точки 8 и 4 предельной петли гистерезиса соответствуют коэрцитивной силе $H_c(-H_c)$, а точки 3 и 7 дают значения остаточной индукции $B_r(-B_r)$.

Соединяя вершины в семействе всех гистерезисных кривых, получим основную кривую намагничивания ферромагнетика. Эта

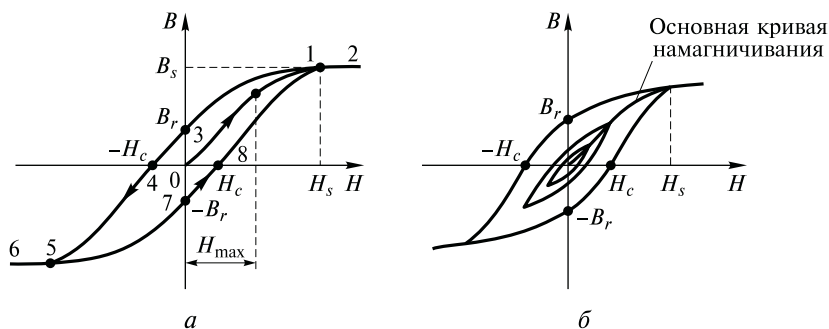


Рис. 2.5. Кривые намагничивания ферромагнетиков:
а — петля гистерезиса; б — частные и предельный циклы

кривая в основном используется в технических расчетах и почти совпадает с первоначальной кривой намагничивания 0—1 (см. рис. 2.5, а). Для удобства ее приводят только для положительных значений.

На рис. 2.6 приведены петли гистерезиса для различных магнитных материалов. В зависимости от значения коэрцитивной силы все магнитные материалы принято делить на магнитомягкие (кривая 1) и магнитотвердые (кривая 2).

Магнитомягкие материалы имеют малую коэрцитивную силу и относительно узкую петлю гистерезиса. К этой группе относят электротехническую сталь, пермаллои, ферриты. Применяют эти материалы в таких электротехнических устройствах, как электрические машины, трансформаторы, электрические аппараты и др.

Магнитотвердые материалы имеют большую коэрцитивную силу и широкую петлю гистерезиса. Будучи намагниченными, они сохраняют намагниченность и после снятия намагничивающего поля. Из таких материалов изготавливают постоянные магниты, которые широко применяются в различных устройствах.

2.4. Классификация, элементы и характеристики магнитных цепей

Для электрических машин и многих электротехнических устройств основным функциональным элементом является магнитная система. Обычно магнитную систему представляют в виде магнитной цепи.

Магнитная цепь содержит источники магнитного поля, систему магнитопроводов из ферромагнитного материала, другие вещества или воздушный зазор, по которым замыкается магнитный поток (рис. 2.7).

В качестве источника магнитного поля обычно применяется катушка с числом витков w , по которой протекает ток I . Обмотка с током возбуждает магнитное поле и характеризуется магнитодвижущей силой (МДС) $F = Iw$. Единицей МДС является ампер (А), еще эту единицу называют ампер-виток. В магнитной цепи МДС играет такую же роль, как ЭДС в электрической.

Проводя аналогию с электрической цепью, отметим, что в магнитной цепи магнитопровод играет роль проводов, а роль нагрузки играет, как правило, воздушный зазор, в котором для функционирования устройства необходимо создать определенное маг-

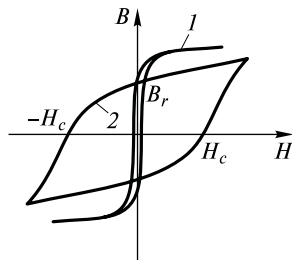


Рис. 2.6. Петли гистерезиса магнитомягких (1) и магнитотвердых (2) ферромагнитных материалов

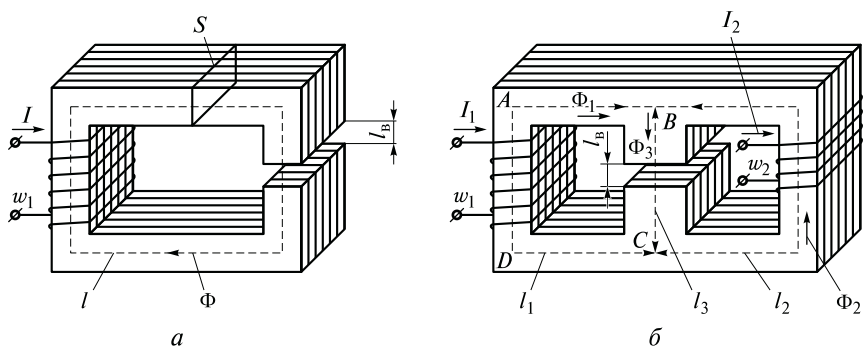


Рис. 2.7. Неразветвленная (а) и разветвленная (б) магнитные цепи

нитное поле. Магнитная цепь может быть неразветвленной (см. рис. 2.7, а) и разветвленной (см. рис. 2.7, б). Реальная магнитная цепь характеризуется не только магнитным потоком Φ , протекающим по магнитопроводу, но и потоками рассеяния Φ_s , а также выпучиванием магнитных силовых линий в области воздушного зазора. Обычно при анализе магнитных цепей пользуются следующими допущениями: индукция B принимается постоянной по сечению; пренебрегают потоками рассеяния и выпучиванием; вводят среднюю длину различных участков магнитопровода.

2.5. Основные законы магнитной цепи. Расчет простейших магнитных цепей

Расчет магнитных цепей проводится на основе законов Кирхгофа для магнитных цепей. Этих законов два.

Первый закон Кирхгофа (или принцип непрерывности магнитного поля) применяют к магнитным узлам разветвленной магнитной цепи. Согласно этому закону алгебраическая сумма потоков равна нулю. Для цепи (см. рис. 2.7, б) имеем $\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0$.

Второй закон Кирхгофа (или закон полного тока) применяют к магнитным контурам. В соответствие с этим законом алгебраическая сумма магнитных напряжений равна алгебраической сумме намагничивающих сил в контуре.

Для контура $ABCD$ (см. рис. 2.7, б) получаем

$$I_1 w_1 = H_1 l_{DA} + H_1 l_{AB} + H_3 l_{BC} + H_B l_B + H_1 l_{CD},$$

или

$$I_1 w_1 = U_{MDA} + U_{MAB} + U_{MBC} + U_{MCD},$$

где U_{MDA} , U_{MAB} , U_{MBC} , U_{MCD} — магнитные напряжения на различных участках магнитной цепи.

Единицей магнитного напряжения $U_M = HI$ является ампер (А).

Часто при расчете магнитных цепей применяют закон Ома для участка магнитной цепи. По аналогии с электрической цепью магнитное сопротивление выражается отношением $R_M = U_M/\Phi$.

Магнитное сопротивление магнитопровода цепи, изображенной на рис. 2.7, а,

$$R_{M.M} = \frac{U_{M.M}}{\Phi} = \frac{HI}{BS} = \frac{HI}{\mu_r \mu_0 HS} = \frac{l}{\mu_r \mu_0 S}.$$

Магнитное сопротивление воздушного зазора $R_{M.B}$ той же цепи

$$R_{M.B} = \frac{U_{M.B}}{\Phi} = \frac{H_B l_B}{BS} = \frac{H_B l_B}{\mu_0 H_B S} = \frac{l_B}{\mu_0 S}.$$

Здесь: $U_{M.M}$, $U_{M.B}$ — магнитные напряжения магнитопровода и воздушного зазора соответственно; S — площадь магнитного сердечника.

При расчете неразветвленной магнитной цепи различают две задачи: прямую и обратную. В прямой известны геометрические размеры, магнитные свойства магнитопровода и значение магнитной индукции B или магнитного потока Φ .

Рассмотрим прямую задачу для магнитной цепи (см. рис. 2.7, а).

По закону полного тока $Iw = HI + H_B l_B = HI + 8 \cdot 10^5 B l_B$, где $H_B = \frac{B}{\mu_0} = \frac{B}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 8 \cdot 10^5 B$.

Поток связан с индукцией соотношением $\Phi = BS$, поэтому при заданном потоке находим индукцию B .

Затем по кривой намагничивания $B(H)$ находим H , и, наконец, Iw .

Пример 1. Определить количество витков обмотки электромагнита (рис. 2.8), если ток электромагнита $I = 20$ А, а поток, при котором якорь начинает притягиваться, $\Phi = 30 \cdot 10^{-4}$ Вб. Магнитопровод изготовлен из электротехнической стали Э330. Размеры электромагнита: $l_1 = 30$ см; $l_2 = 2,5$ см; $l_3 = l_4 = 12$ см; $l_b = 0,5$ см; $S_1 = 30$ см²; $S_3 = 25$ см².

Решение.

Магнитная индукция на участках магнитопровода

$$B_1 = B_b = B_4 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{30 \cdot 10^{-4}}{30 \cdot 10^{-4}} = 1 \text{ Тл};$$

$$B_3 = \frac{\Phi}{S_3} = \frac{30 \cdot 10^{-4}}{25 \cdot 10^{-4}} = 1,2 \text{ Тл}.$$

По кривой намагничивания $B(H)$ для стали Э330 (рис. 2.9) находим $H_1 = 312,5$ А/м, $H_3 = 500$ А/м.

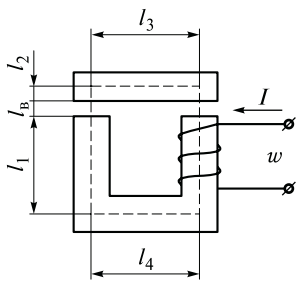


Рис. 2.8. Магнитная цепь электромагнита

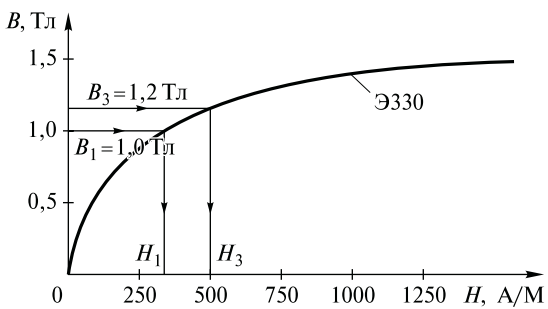


Рис. 2.9. Кривая намагничивания

Напряженность в воздушном зазоре $H_B = 8 \cdot 10^5 B_1 = 8 \cdot 10^5$ А/м.
 Магнитодвижущая сила $Iw = H_1(2l_1 + l_4) + H_B \cdot 2l_B + H_3(2l_2 + l_3) = 312,5 \cdot (2 \cdot 30 + 12) \cdot 10^{-2} + 8 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-2} + 500(2 \cdot 2,25 + 12) \cdot 10^{-2} = 8310$ А.

Число витков $w = \frac{Iw}{I} = \frac{8310}{20} = 416$.

Расчет разветвленной магнитной цепи рассмотрим на примере.

Пример 2. Рассчитать токи I_1 и I_2 с числом витков w_1 и w_2 для магнитной цепи (см. рис. 2.7, б).

Дано: $l_1 = 80$ см; $l_2 = 60$ см; $l_3 = 20$ см; $l_B = 1$ мм; $S_1 = S_2 = S_3 = 10$ см²; $\Phi_1 = 1,25 \cdot 10^{-3}$ Вб; $\Phi_2 = 0,25 \cdot 10^{-3}$ Вб; $w_1 = 500$ витков; $w_2 = 200$ витков; сталь Э330. Зависимость $B(H)$ приведена на рис. 2.9.

Решение.

Находим поток Φ_3 по первому закону Кирхгофа

$$\Phi_3 = \Phi_1 + \Phi_2 = 1,25 \cdot 10^{-3} + 0,25 \cdot 10^{-3} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

Вычисляем индукцию в стержнях и воздушном зазоре

$$B_1 = \frac{\Phi_1}{S_1} = \frac{1,25 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-4}} = 1,25 \text{ Тл}; \quad B_2 = \frac{0,25 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-4}} = 0,25 \text{ Тл};$$

$$B_3 = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-4}} = 1,5 \text{ Тл}; \quad B_B = B_3 = 1,5 \text{ Тл.}$$

По кривой $B(H)$ находим напряженности в стержнях

$$H_1 = 1500 \frac{\text{А}}{\text{м}}; \quad H_2 = 38 \frac{\text{А}}{\text{м}}; \quad H_3 = 625 \frac{\text{А}}{\text{м}}; \quad H_B = 8 \cdot 10^5 B = 1,2 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Определяем намагничивающие силы

$$F_1 = I_1 w_1 = H_1 l_1 + H_3 l_3 + H_B l_B = 1500 \cdot 0,8 + 625 \cdot 0,2 + 1,2 \cdot 10^6 \cdot 10^{-3} = 2525 \text{ А};$$

$$1,2 \cdot 10^6 \cdot 10^{-3} = 1348 \text{ А.}$$

Рассчитываем токи в обмотках

$$I_1 = \frac{F_1}{w_1} = \frac{2525}{500} = 5,05 \text{ A}; \quad I_2 = \frac{F_2}{w_2} = \frac{1348}{200} = 6,74 \text{ A}.$$

Контрольные вопросы

1. Назовите магнитные и немагнитные материалы.
2. Что называется магнитной цепью?
3. В чем заключается аналогия электрических и магнитных цепей?
4. Как определить магнитное сопротивление участка магнитной цепи?
5. Напишите уравнения Кирхгофа для разветвленной магнитной цепи.
6. Назовите устройства, где применяются магнитомягкие и магнитотвердые материалы.
7. Объясните механизм намагничивания ферромагнетиков.

Темы рефератов

1. Свойства магнитомягких и магнитотвердых материалов. Применение магнитных материалов в технике.
2. Зависимость намагничивающей силы соленоида заданной геометрии от сечения провода и числа витков.

3.1. Закон электромагнитной индукции

Рассмотрим проводник длиной l , который движется со скоростью v в магнитном поле (рис. 3.1). В проводнике имеются свободные электроны, которые вместе с проводником движутся в магнитном поле. Магнитное поле воздействует на эти электроны с силой F_0 , которая смещает электроны к концу 1 проводника. На другом конце 2 проводника будут концентрироваться положительные заряды (там возникает недостаток электронов).

В результате в проводнике возникает электродвижущая сила (ЭДС электромагнитной индукции e), а явление ее возникновения называется электромагнитной индукцией.

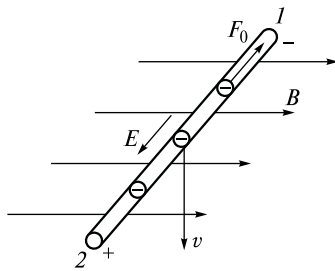


Рис. 3.1. ЭДС индукции в проводнике

Электродвижущая сила определяется выражением $e = Bvl \sin \alpha$. Если скорость v перпендикулярна вектору B , то $\alpha = 90^\circ$ и в этом случае $e = Bvl$. Направление e можно определить по правилу правой руки: если магнитные силовые линии B входят в ладонь, а отогнутый большой палец расположен по направлению скорости v , то четыре вытянутые пальца ладони показывают направление e . Закон электромагнитной индукции был открыт английским физиком М. Фарадеем. Формулируется он

следующим образом: любое изменение магнитного поля, в которое помещен проводник произвольной формы, вызывает в проводнике появление ЭДС электромагнитной индукции.

3.2. ЭДС индукции в контуре. Закон Ленца

Поместим в магнитное поле замкнутый контур — рамку из проводников, которая перемещается со скоростью v перпендикулярно линиям индукции (рис. 3.2). Если магнитное поле однородное (одинаковое во всех точках поля), то в проводниках $1-4$ и $2-3$ рамки будут индуцироваться одинаковые ЭДС e , в проводниках $1-2$ и $3-4$ ЭДС появляться не будут, так как они не пересекают силовые линии поля. Суммарная ЭДС в контуре будет равна нулю.

При перемещении рамки в неоднородном магнитном поле в ней будет появляться ЭДС, которую рассчитывают по формуле $e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, где $\Delta\Phi$ — изменение магнитного

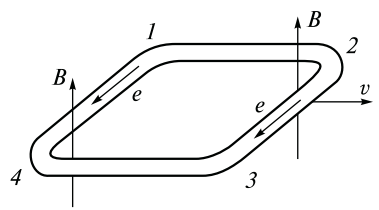


Рис. 3.2. ЭДС индукции в рамке

потока, пронизывающего контур за время Δt . Изменение магнитного

потока может происходить по различным причинам: из-за неоднородности магнитного поля при движении рамки; вследствие изменения потока во времени $\Phi = f(t)$; при деформации самой рамки.

Индукцированная в рамке ЭДС приводит к появлению в ней тока. Русский ученый Э.Х.Ленц первым сформулировал закон, который позволяет определить направление индуцированных ЭДС и тока. Этот закон называют *законом Ленца*. Формулируется он следующим образом: в замкнутом контуре, помещенном в магнитное поле, индуцируется ток такого направления, чтобы препятствовать изменению основного магнитного потока, пронизывающего контур.

Если магнитный поток, пронизывающий рамку, увеличивается, индуцируемый в рамке ток старается уменьшить основной поток, и наоборот, при уменьшении потока индуцируемый ток будет увеличивать общий поток. Об этом и говорит знак «минус» в формуле расчета ЭДС.

3.3. ЭДС самоиндукции и индуктивность катушки

Пропустим через катушку изменяющийся во времени электрический ток i (рис. 3.3). Этот ток будет создавать переменный магнитный поток и, следовательно, возникнет ЭДС, которая называется ЭДС самоиндукции e_L . Для количественной оценки этой ЭДС вводят понятие потокосцепления Ψ_L . Хотя витки катушки пронизываются различным количеством силовых линий, можно определить Ψ_L как суммарный магнитный поток самоиндукции, создаваемый током катушки i : $\Psi_L = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \dots + \Phi_w$, где $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots, \Phi_w$ — магнитные потоки самоиндукции от первого, второго, третьего и так далее витков катушки при протекании тока i .

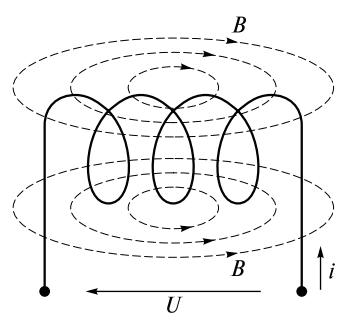


Рис. 3.3. Магнитное поле катушки с током

В среде с постоянной магнитной проницаемостью существует линейная зависимость между Ψ и i , т.е. $\Psi = Li$, где L — коэффициент пропорциональности, который называется индуктивностью катушки. Единицей индуктивности является генри (Гн).

Применяя формулу из подразд. 3.2, получаем выражение для ЭДС самоиндукции $e_L = -\frac{\Delta\Psi_L}{\Delta t} = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}$, где $\Delta\Psi_L$ и Δi — изменения потокосцепления и тока за время Δt .

Так же, как и ЭДС e индукции, ЭДС самоиндукции e_L подчиняется закону Ленца, т.е. препятствует изменению потока (тока) в катушке.

3.4. ЭДС взаимной индукции. Вихревые токи

Рассмотрим случай, когда две катушки расположены рядом и по одной из них протекает ток i_1 (рис. 3.4, а). Этот ток создает поток самоиндукции Φ_{11} , который полностью пронизывает катушку 1 и частично катушку 2. Поток Φ_{12} , пронизывающий катушку 2, называется потоком взаимной индукции.

Сцепляясь с витками катушек w_1 и w_2 , потоки образуют потокосцепления $\Psi_{11} = w_1\Phi_{11}$ и $\Psi_{12} = w_2\Phi_{12}$.

Оба потокосцепления создаются одним током и в среде с постоянной магнитной проницаемостью будут ему пропорциональны, т.е. $\Psi_{11} = L_1i_1$ и $\Psi_{12} = M_{12}i_1$, где L_1 — индуктивность первой катушки, M_{12} — коэффициент пропорциональности, который называется взаимной индуктивностью. Единицей взаимной индуктивности является генри (Гн).

Если при отсутствии тока в первой катушке во второй катушке пропустить ток i_2 , то возникнет поток самоиндукции второй ка-

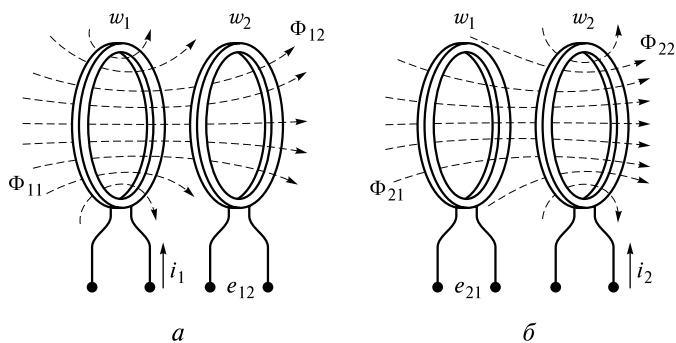


Рис. 3.4. Магнитное поле индуктивно связанных катушек:

а — ток в катушке 1; б — ток в катушке 2

тушки Φ_{22} и поток взаимной индукции Φ_{21} (рис. 3.4, б). Потокосцепление взаимной индукции Ψ_{21} определяется выражением $\Psi_{21} = M_{12}i_1$.

В среде без ферромагнетиков $M_{12} = M_{21} = M$. Взаимная индуктивность M зависит от размеров и расположения катушек, числа витков и магнитной среды.

Если ток i_1 будет изменяться во времени, то потокосцепления Ψ_{11} и Ψ_{12} тоже будут изменяться во времени. В обеих катушках будут появляться ЭДС индукции e_1 и e_{12} , при этом e_1 называется ЭДС самоиндукции первой катушки, а e_{12} — ЭДС взаимной индукции (см. рис. 3.4). Они определяются следующими выражениями:

$$e_1 = -\frac{\Delta\Psi_{11}}{\Delta t} = -L_1 \frac{\Delta i_1}{\Delta t}; \quad e_{12} = -\frac{\Delta\Psi_{12}}{\Delta t} = -M \frac{\Delta i_1}{\Delta t}.$$

ЭДС взаимной индукции образуется в любом замкнутом контуре, который пронизывается изменяющимся потоком. Так, сечение сердечника трансформатора можно рассматривать как контур, в котором ЭДС будет генерировать кольцевые токи. Эти токи называются вихревыми. Они вызывают потери в магнитных сердечниках различных устройств. Чтобы уменьшить вихревые токи сердечники трансформаторов набирают из тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается закон электромагнитной индукции?
2. Сформулируйте закон Ленца.
3. Что называется ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимной индукции?
4. Определите понятия индуктивности и взаимной индуктивности.
5. Как определить направление ЭДС индукции?
6. Что такое вихревые токи? Назовите положительную и отрицательную роли вихревых токов в электротехнических устройствах.

Темы рефератов

1. Конструирование электротехнических устройств на основе закона электромагнитной индукции.
2. Роль закона электромагнитной индукции при отключении электромагнитов, других электротехнических устройств, содержащих магнитные сердечники.
3. Применение вихревых токов в промышленности.

4.1. Основные понятия и характеристики

Большинство электротехнических устройств предназначено для преобразования энергии, передачи энергии и информации на значительные расстояния. Все эти задачи проще решить с помощью переменных токов и напряжений. Переменные токи возникают в цепях с источниками переменного тока и с источниками переменных ЭДС.

Переменными токами, напряжениями и ЭДС называются токи, напряжения и ЭДС, изменяющиеся с течением времени.

Значения тока в произвольные моменты времени t называются мгновенными значениями тока и обозначаются $i(t)$. Аналогично определяемые мгновенные значения напряжения и ЭДС обозначаются соответственно $u(t)$ и $e(t)$.

Наиболее часто в технике применяются периодические токи, напряжения и ЭДС, значения которых повторяются периодически, т. е. через равные промежутки времени (рис. 4.1).

Простейшим периодическим переменным током является синусоидальный (рис. 4.2), получивший широкое применение в электроэнергетике. Синусоидальные токи и напряжения обеспечивают наиболее экономичные режимы работы электротехнических устройств.

Мгновенные значения синусоидальных токов $i(t)$, напряжений $u(t)$ и ЭДС $e(t)$ математически описываются формулами

$$\begin{aligned} i(t) &= I_m \sin(\omega t + \Psi_i); \\ u(t) &= U_m \sin(\omega t + \Psi_u); \\ e(t) &= E_m \sin(\omega t + \Psi_e), \end{aligned}$$

где I_m , U_m , E_m — амплитудные значения тока, напряжения и ЭДС; ω — угловая частота синусоидальной функции; Ψ_i , Ψ_u , Ψ_e — начальные фазы тока, напряжения и ЭДС.

Угловая частота

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T,$$

где f — частота синусоидальной функции; T — период синусоидальной функции — минимальный промежуток времени, через который мгновенные значения синусоидальной величины повторяются.

В системе СИ время t и период T выражаются в секундах (с), частота f , равная числу периодов в секунду, в герцах (Гц). В энер-

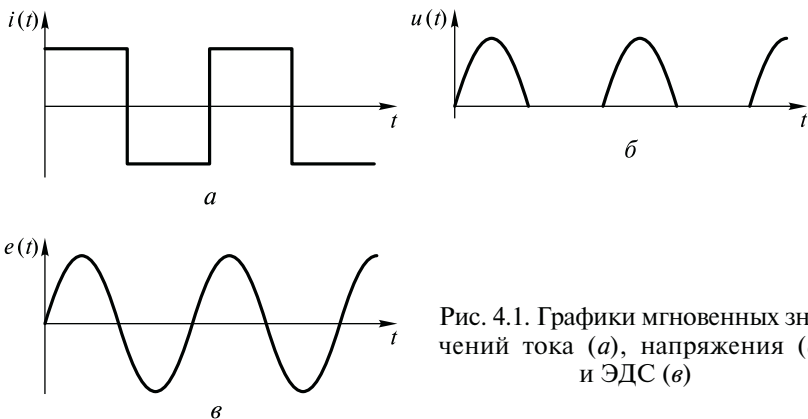


Рис. 4.1. Графики мгновенных значений тока (а), напряжения (б) и ЭДС (в)

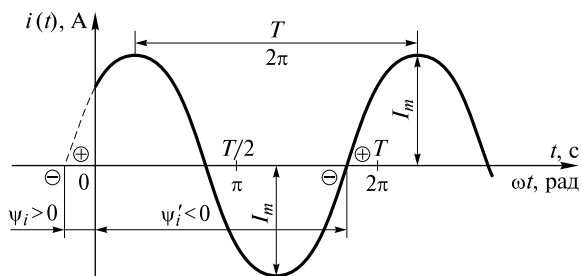


Рис. 4.2. График мгновенного значения синусоидального тока

гетических системах Российской Федерации и большинства стран мира применяются синусоидальные токи с частотой 50 Гц, а стран Северной и Южной Америки, ряда стран Юго-Восточной Азии, Африки — 60 Гц.

В энергоустановках автономных объектов (речные и морские суда, самолеты, вертолеты и т. д.) используются частоты 200, 400, 1000 Гц. Радиовещание, радиосвязь, телевидение, радиолокация используют частоты до $10 \cdot 10^{10}$ Гц и выше.

Единицей угловой частоты ω является радиан в секунду (рад/с).

Аргумент синусоидальной функции ($\omega t + \Psi$) называют текущей фазой. Фаза ($\omega t + \Psi$) и начальная фаза Ψ выражаются в радианах или градусах.

Разность начальных фаз двух синусоидальных токов и напряжений $\Psi_u - \Psi_i$ называется сдвигом по фазе. Если $\Psi_u - \Psi_i = 0$, то такие напряжение и ток называют синфазными. Если $\Psi_u - \Psi_i = \pm\pi = \pm 180^\circ$, то о таких напряжениях и токах говорят, что они находятся в противофазе. Если $\Psi_u - \Psi_i = \pm \frac{\pi}{2} = \pm 90^\circ$, то о таких напряжениях и токах говорят, что они находятся в квадратуре.

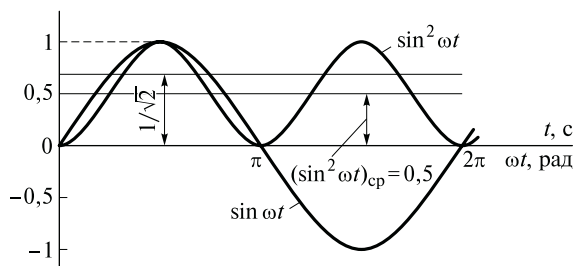


Рис. 4.3. Синусоида, квадрат синусоиды, среднее за период значение квадрата синусоиды, равное 0,5, и среднеквадратическое значение синусоиды, равное $1/\sqrt{2}$

Если $\Psi_u - \Psi_i > 0$, то напряжение обгоняет ток на угол $\Psi_u - \Psi_i$ или ток отстает от напряжения на угол $\Psi_u - \Psi_i$.

Переменный ток $i(t)$ характеризуют по его действующему значению I , равному среднеквадратическому значению переменного тока: $I = \sqrt{(i^2)_{cp}}$.

Численно действующее значение переменного тока равно такому значению постоянного тока, при котором выделяется за один период такое же количество теплоты, как и при данном переменном токе:

$$RI^2 = R(i^2)_{cp}.$$

В случае синусоидального тока

$$I^2 = (i^2)_{cp} = (I_m^2 \sin^2 \omega t)_{cp} = I_m^2 / 2.$$

Отсюда действующее значение синусоидального тока $I = I_m / \sqrt{2}$. Аналогично действующие значения синусоидальных напряжения и ЭДС $U = U_m / \sqrt{2}$; $E = E_m / \sqrt{2}$.

Смысл вычисления действующего значения синусоидальных токов объясняет рис. 4.3.

4.2. Представление синусоидальных функций с помощью векторов и комплексных чисел

Расчет токов и напряжений в цепях синусоидального тока с помощью методов, основанных на законах Кирхгофа, Ома, Фарадея, Джоуля—Ленца, значительно сложнее из-за необходимости выполнения сложных действий с тригонометрическими функциями. Трудности расчета облегчает применение комплексного метода, основанного на замене операций с синусоидальными функциями операциями с комплексными числами. Рассмотрим

вначале представление синусоидальных функций с помощью векторов, вращающихся на плоскости xOy (рис. 4.4). Проекция неподвижного вектора \vec{I}_m , имеющего угол Ψ_i с осью Ox (осью абсцисс) на ось Oy (ось ординат), равна $I_m \sin \Psi_i$.

Если же предположить, что вектор \vec{I}_m вращается с постоянной угловой скоростью ω против хода часовой стрелки, а Ψ_i — угол между ним и осью абсцисс в момент времени $t = 0$, то к произвольному моменту времени t этот угол увеличится на ωt и станет равным $(\omega t + \Psi_i)$. Его проекция на ось ординат в этот момент времени будет равна $I_m \sin(\omega t + \Psi_i)$, т.е. будет описываться формулой для мгновенного значения $i(t)$ синусоидального тока. Поэтому синусоидальную функцию $i(t)$ можно представить как проекцию вращающегося вектора \vec{I}_m , который в данном случае называется изображающим вектором.

Такое представление позволяет заменить сложные математические операции с синусоидальными функциями простыми операциями с векторами.

Векторы можно изображать не только на плоскости xOy , но и на комплексной плоскости в виде комплексного числа. Комплексное число состоит из вещественной (действительной) и мнимой частей. По оси абсцисс откладывают действительную часть, а по оси ординат — мнимую часть комплексного числа. Действительную ось обозначают $+1$ и -1 , а мнимую ось — $+j$ и $-j$. Буквой j обозначается в электротехнике мнимая единица $j = \sqrt{-1}$.

Комплексные числа обозначаются чертой снизу \underline{I}_m , допускается обозначение точкой сверху \dot{I}_m . Комплексное число $\underline{I}_m = I'_m + jI''_m$ изображается вектором, соединяющим начало координат и точку с координатами $I'_m = \text{Re}\{\underline{I}_m\}$ и $I''_m = \text{Im}\{\underline{I}_m\}$, равными действительной (Re) и мнимой (Im) частям комплексного числа. Такая форма представления и записи комплексного числа называется алгебраической. Комплексное число можно представить в полярной системе координат (рис. 4.5) в виде вектора с модулем $I_m = \sqrt{(I'_m)^2 + (I''_m)^2}$, образующего с полярной осью (осью $+1$) угол $\psi_i = \arctg(I''_m/I'_m)$. Такому

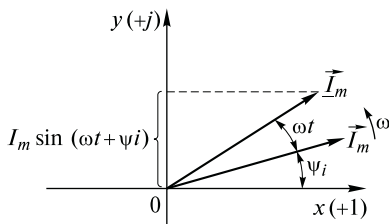


Рис. 4.4. Представление синусоиды с помощью вращающегося вектора

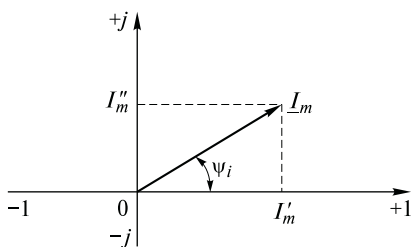


Рис. 4.5. Изображение комплексного числа на комплексной плоскости

представлению комплексного числа соответствуют показательная $\underline{I}_m = I_m e^{j\psi_i}$ и полярная $\underline{I}_m = I_m \angle \psi_i$ формы записи комплексного числа. Еще одна форма комплексного числа — тригонометрическая — может быть получена с помощью формулы Эйлера $\underline{I}_m = I_m e^{j\psi_i} = I_m \cos \psi_i + j I_m \sin \psi_i$.

Очевидно, что $I'_m = I_m \cos \psi_i$, $I''_m = I_m \sin \psi_i$.

Итак, $\underline{I}_m = I'_m + j I''_m = I_m \angle \psi_i = I_m e^{j\psi_i} = I_m \cos \psi_i + j I_m \sin \psi_i$ — формы записи комплексного числа.

Вращающемуся на комплексной плоскости вектору соответствует комплексная функция $F(j\omega t) = I_m e^{j(\omega t + \psi_i)} = I_m e^{j\psi_i} e^{j\omega t} = \underline{I}_m e^{j\omega t}$ (см. рис. 4.4).

По формуле Эйлера $F(j\omega t) = I_m e^{j(\omega t + \Psi_i)} = I_m \cos(\omega t + \Psi_i) + j I_m \sin(\omega t + \Psi_i)$, т. е. мгновенное значение синусоидального тока соответствует мнимой части комплексной функции $F(j\omega t)$:

$$i(t) = \text{Im}\{I_m e^{j(\omega t + \Psi_i)}\} = I_m \sin(\omega t + \Psi_i).$$

Комплексный метод используется для расчета синусоидальных токов и напряжений одной и той же частоты. Соответствующие токам и напряжениям комплексные функции изображаются векторами, вращающимися на комплексной плоскости с одинаковой угловой частотой ω , сохраняя неизменным углы между собой. Поэтому все расчеты с комплексными функциями можно выполнять, не учитывая указанного вращения, т. е. «выбросив» множитель $e^{j\omega t}$. Это означает, что синусоидальная функция времени может быть представлена не комплексной функцией (вращающимся вектором), а комплексным числом (неподвижным вектором). В результате сложные математические операции с синусоидальными функциями времени заменяются действиями с комплексными числами, а вместо сопоставления синусоидальных функций можно рассматривать векторы на комплексной плоскости, т. е. векторные диаграммы.

Складывать и вычитать комплексные числа $\underline{A} = A' + jA''$ и $\underline{B} = B' + jB''$ удобнее в алгебраической форме

$$\underline{A} \pm \underline{B} = (A' + jA'') \pm (B' + jB'') = (A' \pm B') + j(B'' \pm A'').$$

Умножать и делить комплексные числа легче в полярной форме. Если $\underline{A} = A \angle \alpha$, а $\underline{B} = B \angle \beta$, то $\underline{A}\underline{B} = (A \angle \alpha)(B \angle \beta) = AB \angle (\alpha + \beta)$,

$$\frac{\underline{A}}{\underline{B}} = \frac{A \angle \alpha}{B \angle \beta} = \frac{A}{B} \angle (\alpha - \beta).$$

Можно умножать и делить комплексные числа и в алгебраической форме, считая такие числа обычными двучленами:

$$\begin{aligned} \underline{A}\underline{B} &= (A' + jA'')(B' + jB'') = A'B' + jA'B'' + jA''B' + j^2 A''B'' = \\ &= (A'B' - A''B'') + j(A''B' + A'B''). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\underline{A}}{\underline{B}} &= \frac{A' + jA''}{B' + jB''} \frac{B' - jB''}{B' - jB''} = \frac{(A' + jA'')(B' - jB'')}{(B')^2 + (B'')^2} = \\ &= \frac{(A'B' + A''B'') + j(A''B' - A'B'')}{(B')^2 + (B'')^2} = \\ &= \frac{A'B' + A''B''}{(B')^2 + (B'')^2} + j \frac{A''B' - A'B''}{(B')^2 + (B'')^2}. \end{aligned}$$

При делении знаменатель $\underline{B} = B' + jB''$ и числитель $\underline{A} = A' + jA''$ были домножены на число $\underline{B} = B' - jB''$. Комплексные числа с одинаковыми действительными частями и равными по модулю и противоположными по знаку мнимыми частями называются сопряженными. Произведение двух комплексно-сопряженных чисел равно сумме квадратов мнимой и действительной частей: $(B' + jB'')(B' - jB'') = (B')^2 + (B'')^2$.

4.3. Идеальные элементы цепи переменного тока. Схемы замещения реальных элементов

В реальных пассивных элементах электрической цепи (резисторах, конденсаторах и катушках индуктивности) при синусоидальных токах происходят сложные процессы, связанные с накоплением и перераспределением электрической и магнитной энергии и преобразованием их в тепловую энергию. Поэтому их эквивалентные схемы включают в себя идеальные резистивные, емкостные и индуктивные элементы.

Идеальный резистивный элемент — элемент схемы, в котором происходит необратимое преобразование электрической энергии в работу, теплоту или другой вид энергии. Идеальный резистивный элемент в цепи переменного тока изображается так же, как в цепи постоянного тока, — прямоугольником.

Реальные резистивные элементы — резисторы — изготавливаются из различных материалов и имеют разные конструкции. В зависимости от конструкции создаются электрические и магнитные поля, в которых запасается энергия, т. е. резистор имеет дополнительные свойства индуктивного и емкостного элементов. На промышленной частоте эти составляющие малы, и ими можно пренебречь, полагая резистор идеальным. Действительно, рассмотрим лабораторный реостат, который представляет собой проводник, свитый в спираль. Между витками спирали существует емкость, а сама спираль представляет собой катушку индуктивности. При повышении частоты до частот радиодиапазона необходимо учитывать дополнительные (паразитные) емкости и индуктивности. На рис. 4.6 показаны схемы замещения резистора на различных

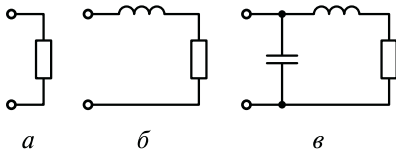


Рис. 4.6. Схемы замещения резистора на низких (а), средних (б) и высоких (в) частотах

тока обозначается буквой L . Этой же буквой обозначается величина, численно равная отношению потокосцепления Ψ индуктивного элемента к току и называемая индуктивностью $L = \Psi/i$.

Индуктивность является параметром идеального индуктивного элемента. Единицей индуктивности является генри (Гн). Отношение амплитуд или действующих значений напряжения и тока называется индуктивным сопротивлением и обозначается X_L ($X_L = U_{Lm}/I_m = U_L/I$).

При известных индуктивности L и угловой частоте ω индуктивное сопротивление $X_L = \omega L$. Величина B_L , обратная X_L , называется индуктивной проводимостью. Синусоидальный ток в индуктивном элементе отстает от напряжения на угол $\pi/2$ (или 90°). Если напряжение $u_L(t) = U_{Lm} \sin \omega t$, то ток $i(t) = I_m \sin(\omega t - 90^\circ)$. В комплексной форме $\underline{U}_{Lm} = j\omega L \underline{I}_m$, или $\underline{U} = j\omega L \underline{I}$. Идеальный индуктивный элемент близок по свойствам к проволочной катушке, навитой из хорошо проводящей проволоки.

Реальные катушки индуктивности изготавливаются из проводящих материалов, имеющих не нулевое сопротивление протеканию электрического тока. Они обладают межвитковой емкостью и емкостью между выводами. В случае когда сопротивление провода и частота малы, катушку индуктивности можно считать идеальной.

Схемы замещения реальной катушки могут быть различными в зависимости от области применения (рис. 4.7). Чаще всего учитывают потери энергии на нагревание, а на радиочастотах — еще и паразитную емкость. Рабочим параметром катушки индуктивности является индуктивность, а паразитными параметрами — емкость и сопротивление.

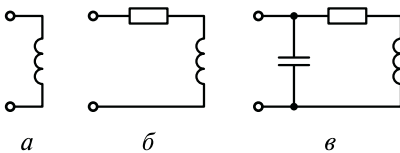


Рис. 4.7. Схемы замещения катушки индуктивности на низких (а), средних (б) и высоких (в) частотах

частотах. Рабочим параметром реального резистора является сопротивление, а паразитными параметрами — емкость и индуктивность.

Идеальный индуктивный элемент — элемент схемы, в котором запасается энергия магнитного поля. Идеальный индуктивный элемент в цепи переменного

тока обозначается буквой C . Этой же буквой обозначается величина,

Идеальный емкостной элемент — элемент, в котором запасается энергия электрического поля. Идеальный емкостной элемент в цепи переменного

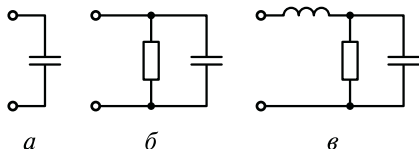


Рис. 4.8. Схемы замещения конденсатора на низких (а), средних (б) и высоких (в) частотах

численно равная отношению заряда q емкостного элемента к напряжению и называемая емкостью $C = q/U_C$.

Емкость представляет собой параметр емкостного элемента. Единицей емкости является фарад (Ф).

Отношение амплитуд и действующих значений напряжения и тока называется емкостным сопротивлением и $X_C = U_{Cm}/I_m = U_C/I$. При известных емкости C и угловой частоте ω емкостное сопротивление $X_C = 1/\omega C$. Единицей емкостного сопротивления является ом (Ом). Величина B_C , обратная X_C , называется емкостной проводимостью $B_C = 1/X_C$. Синусоидальный ток опережает напряжение на идеальном емкостном элементе на 90° . Если напряжение $u_C(t) = U_{Cm} \sin \omega t$, то ток $i(t) = I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$. В комплексной форме $\underline{U}_{Cm} = -j \frac{1}{\omega C} \underline{I}_m$ или $\underline{U}_C = -j \frac{1}{\omega C} \underline{I}$.

Реальный емкостной элемент — конденсатор — изготавливается из двух или более проводящих пластин, разделенных диэлектриком. Реальные диэлектрики обладают весьма высоким удельным сопротивлением и поэтому очень часто конденсатор можно полагать близким по своим свойствам к идеальному емкостному элементу. При низких частотах реальный конденсатор изображают на схеме замещения как идеальный емкостной элемент (рис. 4.8, а). При средних частотах в схему добавляют резистивный элемент, учитывающий потери в диэлектрике (рис. 4.8, б), а при высоких частотах — еще и индуктивный элемент, учитывающую индуктивности металлических частей и выводов конденсатора (рис. 4.8, в).

Рабочим параметром конденсатора является емкость, а паразитными параметрами — сопротивление и индуктивность.

4.4. Синусоидальный ток в RL -цепи

Пусть в последовательно соединенных элементах R и L (рис. 4.9) ток изменяется по синусоидальному закону: $I = I_m \sin \omega t$.

Требуется найти напряжение $u(t)$, т.е. его амплитуду U_m и начальную фазу.

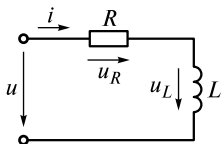


Рис. 4.9. Схема цепи с резистивным и индуктивным элементами

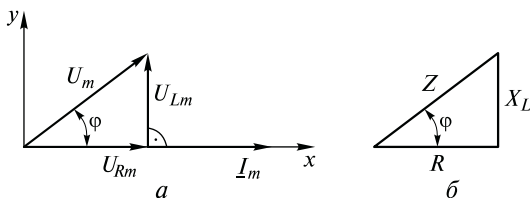


Рис. 4.10. Векторные диаграммы (а) и треугольник сопротивлений (б) RL -цепи

По второму закону Кирхгофа для рассматриваемой цепи $u = u_R + u_L$, где $u_R = Ri = RI_m \sin \omega t$; $u_L = \omega LI_m \sin(\omega t + 90^\circ)$. С учетом этого получим

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi) = RI_m \sin \omega t + \omega LI_m \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Определить искомые амплитуду и начальную фазу напряжения можно с помощью векторной диаграммы.

Векторная диаграмма — это совокупность векторов, изображающих на плоскости синусоидально изменяющиеся с одной и той же частотой величины. Каждый вектор вычерчивается на плоскости с учетом его начальной фазы, отсчитываемой от оси абсцисс. Отложим из начала координат вектор тока (рис. 4.10, а). В том же направлении отложим вектор напряжения на резисторе, который совпадает по фазе с вектором тока. Из конца вектора напряжения на резисторе отложим вектор напряжения на катушке, который перпендикулярен вектору тока (т.е. составляет с вектором тока угол $\pi/2$), так как напряжение на катушке опережает протекающий ток на угол $\pi/2$ (90°). Сумма этих векторов равна вектору напряжения, приложенному ко входу цепи.

Из треугольника напряжений $U_m^2 = U_{Rm}^2 + U_{Lm}^2 = R^2 I_m^2 + X_L^2 I_m^2 = (R^2 + X_L^2) I_m^2 = Z^2 I_m^2$, откуда искомая амплитуда напряжения

$$U_m = \sqrt{R^2 + X_L^2} I_m = Z I_m,$$

где Z — полное сопротивление RL -цепи, $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$.

Разделив обе части уравнения для треугольников напряжений на I_m , получим треугольник сопротивлений (рис. 4.10, б). Второй искомый параметр — сдвиг фаз — получается из простого тригонометрического соотношения для треугольника сопротивлений $\varphi = \arctg(X_L/R)$.

Для действующих значений тока и напряжения получаем:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{U}{Z}.$$

Следовательно, при синусоидальных напряжении и токе справедлив закон Ома для действующих значений.

4.5. Синусоидальный ток RC-цепи

Пусть к параллельно соединенным элементам R и C подключен источник, питающий их напряжением $u = U_m \sin \omega t$ (рис. 4.11). Требуется найти ток $i(t)$, его амплитуду и сдвиг по фазе относительно $u(t)$.

По первому закону Кирхгофа $i = i_R + i_C$, где $i_R = I_{Rm} \sin \omega t$; $i_C = I_{Cm} \sin(\omega t + \pi/2)$, а $I_{Rm} = U_m/R = GU_m$; $I_{Cm} = U_m/X_C = B_C U_m = \omega C U_m$.

С учетом этого $i(t) = GU_m \sin \omega t + \omega C U_m \sin(\omega t + \pi/2) = I_m \sin(\omega t - \varphi)$. Из треугольника токов (рис. 4.12, а) получим

$$I_m^2 = I_{Rm}^2 + I_{Cm}^2 = G^2 U_m^2 + B_C^2 U_m^2 = (G^2 + B_C^2) U_m^2 = Y^2 U_m^2,$$

откуда искомая амплитуда тока:

$$I_m = Y U_m = \sqrt{G^2 + B_C^2} U_m,$$

где Y — полная проводимость RC-цепи, $Y = \sqrt{G^2 + B_C^2} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + (\omega C)^2}$.

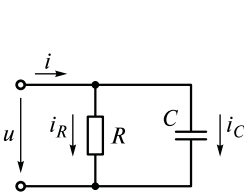


Рис. 4.11. Схема цепи с резистивным и емкостным элементами

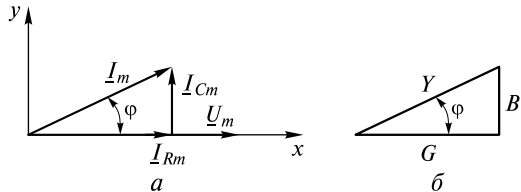


Рис. 4.12. Векторная диаграмма (а) и треугольник проводимостей (б) параллельной RC-цепи

Треугольнику токов соответствует треугольник проводимостей (рис. 4.12, б). Второй искомый параметр — сдвиг фаз — находим из простого тригонометрического соотношения для треугольника сопротивлений $\varphi = \arctg(-B_C/R)$.

4.6. Анализ процессов в цепи синусоидального тока при последовательном соединении элементов R, L, C

Пусть к последовательно соединенным элементам R, L и C приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$ (рис. 4.13). Необходимо найти ток $i(t)$, т.е. его амплитуду I_m и сдвиг по фазе относительно напряжения $u(t)$.

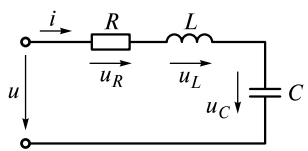


Рис. 4.13. Схема последовательной RLC-цепи

Для рассматриваемой цепи по второму закону Кирхгофа $u = u_R + u_L + u_C$.

Из подразд. 4.4, 4.5 известно, что амплитуды напряжений на элементах связаны с током выражениями $U_{mR} = RI_m$,

$$U_{mL} = \omega LI_m, \quad U_{mC} = \frac{1}{\omega C} I_m, \quad \text{причем на}$$

пряжение на резистивном элементе совпадает по фазе с током, а напряжения на индуктивном и емкостном элементах отличаются по фазе от тока на $+90^\circ$ и -90° соответственно.

Будем искать ток в виде $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$. Тогда $RI_m \sin(\omega t - \varphi) + \omega LI_m \sin(\omega t - \varphi + 90^\circ) + \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - \varphi - 90^\circ) = U_m \sin \omega t$.

При построении векторной диаграммы возможны три случая:

$\omega L > \frac{1}{\omega C}$, т.е. $X_L > X_C$; $U_{Lm} > U_{Cm}$ — цепь носит активно-индуктивный характер, т.е. ток отстает от напряжения по фазе на угол φ (рис. 4.14, а);

$\omega L < \frac{1}{\omega C}$, т.е. $X_L < X_C$; $U_{Lm} < U_{Cm}$ — цепь носит активно-емкостной характер, т.е. ток опережает напряжение по фазе на угол φ (рис. 4.14, б);

$\omega L = \frac{1}{\omega C}$, т.е. $X_L = X_C$; $U_{Lm} = U_{Cm}$ — цепь носит активный характер, и в ней наблюдается резонанс. Сдвиг фаз между током и напряжением равен нулю (рис. 4.14, в).

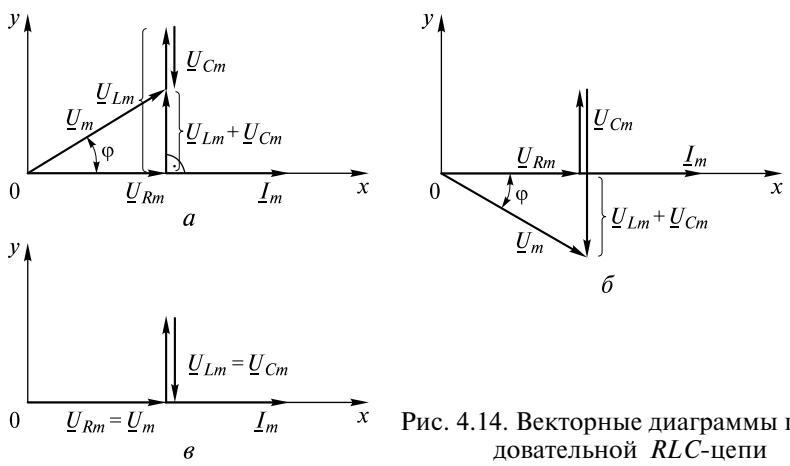


Рис. 4.14. Векторные диаграммы последовательной RLC-цепи

Из треугольника напряжений

$$\begin{aligned} U_m^2 &= U_{Rm}^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2 = R^2 I_m^2 + (X_L - X_C)^2 I_m^2 = \\ &= [R^2 + (X_L - X_C)^2] I_m^2 = Z^2 I_m^2. \end{aligned}$$

Откуда искомая амплитуда тока

$$I_m = \frac{U_m}{Z} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}},$$

где Z — полное сопротивление последовательной RLC -цепи,

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

Сдвиг фаз между напряжением и током: $\varphi = \arctg[(X_L - X_C)/R]$.

4.7. Комплексный метод расчета цепей синусоидального тока

При расчете цепей переменного тока также возникает необходимость описывать комплексы напряжения на элементах R, L, C .

Для R -элемента $u_R = Ri = RI_m \sin \omega t = U_{Rm} \sin \omega t$.

Для L -элемента $u_L = \omega LI_m \sin(\omega t + 90^\circ) = U_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ)$.

Для C -элемента $u_C = \frac{I_m}{\omega C} \sin(\omega t - 90^\circ) = U_{Cm} \sin(\omega t - 90^\circ)$.

Для соответствующих комплексов \underline{U}_R , \underline{U}_L и \underline{U}_C получаем

$$\underline{U}_R = RI; \quad \underline{U}_L = Lj\omega I = jX_L I; \quad \underline{U}_C = \frac{1}{j\omega C} I = \frac{1}{j} X_C I = -jX_C I,$$

где $jX_L = j\omega L$ и $-jX_C = -j \frac{1}{\omega C}$.

При использовании комплексного метода применимы законы Ома и Кирхгофа, позволяющие легко вычислять токи и напряжения в символической форме.

Закон Ома в комплексной форме:

для комплексов амплитудных значений $\underline{I}_m = \underline{U}_m / \underline{Z}$;

для комплексов действующих значений $\underline{I} = \underline{U} / \underline{Z}$;

для их модулей $I = U/Z$.

Первый закон Кирхгофа: в любом узле электрической цепи алгебраическая сумма комплексов токов равна нулю: $\sum \underline{I} = 0$.

Правило знаков: вытекающие в узел токи в алгебраической сумме берутся со знаком «минус», вытекающие токи берутся со знаком «плюс».

Второй закон Кирхгофа: в любом контуре цепи алгебраическая сумма комплексов ЭДС равна алгебраической сумме комплексов

падения напряжений на пассивных элементах этого контура $\sum \underline{E} = \sum \underline{IZ}$.

Правило знаков: если направления ЭДС и напряжения совпадают с заданным направлением обхода контура, то в алгебраической сумме они берутся со знаком «плюс», в противном случае — со знаком «минус».

4.8. Комплексные сопротивления и проводимости в цепях переменного тока

Как было показано в подразд. 4.7, цепи переменного тока характеризуются несколькими сопротивлениями.

Комплексное сопротивление

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = R + jX = Ze^{j\varphi} = Z \angle \varphi,$$

где R — активное сопротивление; X_L — индуктивное сопротивление, $X_L = \omega C$; X_C — емкостное сопротивление, $X_C = 1/\omega C$; X — реактивное сопротивление, $X = X_L - X_C$; Z — полное сопротивление (модуль комплексного сопротивления), $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}$; φ — аргумент комплексного сопротивления, $\varphi = \arctg[(X_L - X_C)/R] = \arctg(X/R)$.

Величина \underline{Y} , обратная \underline{Z} , называется комплексной проводимостью:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = Y \angle -\varphi = \frac{R^2}{Y^2} - j \frac{X^2}{Y^2} = G - jB,$$

где Y , G , B — соответственно полная, активная и реактивная проводимости RLC -цепи.

На комплексной плоскости удобно строить не только векторные диаграммы, но и треугольники сопротивлений и проводимостей, так как R и G имеют действительный (вещественный) характер, а jX и $-jB$ — мнимый.

На рис. 4.15 представлены треугольники сопротивлений и проводимостей на комплексной плоскости.

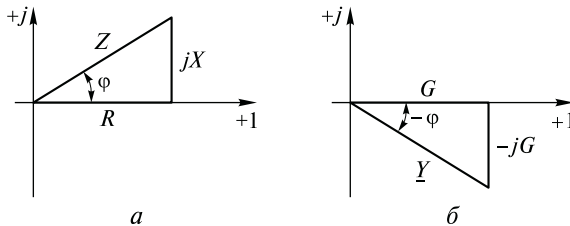


Рис. 4.15. Треугольники сопротивлений на комплексной плоскости для случаев активно-индуктивной (а) и активно-емкостной (б) нагрузки

4.9. Мощность в цепях синусоидального тока

Рассмотрим электрическую цепь, к которой приложено напряжение $u = U_m \sin \omega t$ и через которую протекает ток $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$.

Мгновенная мощность, поступающая в цепь, $p = ui = U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi)$, состоит из двух составляющих: постоянной величины $UI \cos \varphi$ и косинусоидальной — $UI \cos(2\omega t - \varphi)$, имеющей удвоенную частоту по сравнению с частотой напряжения и тока.

Среднее значение второй составляющей за период T , в течение которого она совершает два цикла изменений, равно нулю. Поэтому активная мощность, поступающая в рассматриваемую цепь, $P = p_{cp} = UI \cos \varphi$.

Множитель $\cos \varphi$ называется коэффициентом мощности. Активная мощность равна произведению действующих значений напряжения и тока, умноженному на коэффициент мощности. Чем ближе угол φ к нулю, тем ближе $\cos \varphi$ к единице и, следовательно, тем большая при заданных значениях U и I активная мощность передается от источника к приемнику.

Повышение коэффициента мощности электротехнических устройств — важная для экономики задача. Единицей активной мощности является ватт (Вт).

Мгновенная мощность колеблется с удвоенной угловой частотой относительно постоянной составляющей активной мощности. В промежутки времени, когда напряжение и ток имеют одинаковые знаки, мгновенная мощность положительна. Энергия поступает от источника в приемник, рассеивается в резисторах, запасается в магнитном поле катушек индуктивности и электрическом поле конденсаторов.

В промежутки времени, когда напряжение и ток имеют разные знаки, мгновенная мощность отрицательна и энергия частично возвращается приемником источнику.

Величина, равная произведению действующих значений тока и напряжения цепи, называется полной мощностью цепи $S = UI$, ее единицей является вольт-ампер (В·А).

При расчетах электротехнических цепей пользуются также понятием реактивная мощность, которая вычисляется по формуле $Q = UI \sin \varphi$.

Единицей этой мощности является вар, т. е. вольт-ампер реактивный.

Полная мощность определяется как геометрическая сумма активной и реактивной мощностей: $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

Кроме полной мощности рассматривают и комплексную мощность $\underline{S} = P + jQ$, единицей которой, как и единицей полной мощности, является вольт-ампер (В·А).

4.10. Баланс комплексных мощностей

Баланс мощностей применяется для проверки правильности решения электротехнических задач и является проявлением закона сохранения энергии в электрических цепях.

Сущность баланса мощностей сводится к тому, что мощность, отдаваемая в цепь источниками энергии переменного тока, полностью расходуется ее элементами. Активная составляющая потребляется резисторами, а реактивная циркулирует в реактивных элементах.

Комплекс полной мощности, отдаваемой в цепь источником электрической энергии, определяется выражением (здесь учитываются источники ЭДС и тока) $\underline{S}_u = \underline{U} \underline{I}^*$, где \underline{U} — комплекс разности потенциалов на зажимах источника; \underline{I} — сопряженный комплекс входного тока от источника в цепь.

Пусть $\underline{U} = Ue^{j\varphi U}$, $\underline{I} = Ie^{j\psi I}$, $\underline{I}^* = Ie^{-j\psi I}$.

Тогда $\underline{S}_u = \underline{U} \underline{I}^* = UIe^{j(\psi_U - \psi_I)} = S_u e^{j\varphi}$,

где φ — сдвиг фаз между током и напряжением, $\varphi = \psi_U - \psi_I$.

Для расчета баланса мощностей требуется привести это уравнение к алгебраической форме: $\underline{S}_u = S_u e^{j\varphi} = S_u \cos \varphi + j S_u \sin \varphi = P_u + j Q_u$.

Так определяют полную S_u , активную P_u и реактивную Q_u мощности, отдаваемые источником в сеть.

Все резисторы и реактивности рассчитываемой цепи потребляют активную $P_u = I^2 R$ и реактивную $Q_u = I^2 X_L - I^2 X_C$ мощности.

Таким образом, методика расчета баланса мощностей сводится к следующему.

Находят суммарную полную мощность всех источников цепи, а затем выделяют ее активную $\sum P_u$ и реактивную $\sum Q_u$ составляющие.

По значениям токов и параметрам элементов вычисляют активную мощность приемников $P_R = RI^2$, по формуле $Q_L = X_L I^2$ — реактивную мощность приемников в индуктивных элементах, а по формуле $Q_C = -X_C I^2$ — реактивную мощность в емкостных элементах.

Если активные и реактивные составляющие мощности источников и приемников: $\sum P_{и} = \sum P_{п}$; $\sum Q_{и} = \sum Q_{п}$, то баланс мощностей выполняется.

4.11. Резонансы напряжений и токов в электрических цепях

Резонансом называют режим электрической цепи, содержащей и индуктивные и емкостные элементы, при котором ток и напряжение на входе цепи совпадают по фазе. При резонансе входное

сопротивление, а следовательно, и входная проводимость цепи носят активный характер, т. е. входное реактивное сопротивление или проводимость цепи равны нулю.

Резонанс напряжений (последовательный резонанс) может возникнуть в последовательном контуре цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов R , L и C (рис. 4.16). Реактивное сопротивление такой

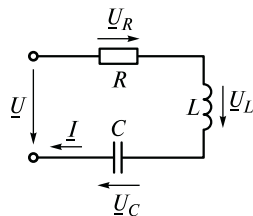


Рис. 4.16. Последовательный RLC -контур

цепи $X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$. Так как при резонансе

$X = 0$, то добиться возникновения резонанса можно, изменяя частоту питающего цепь синусоидального напряжения или параметры элементов C и L . При постоянных значениях L и C резонансная частота $\omega_p = 1/\sqrt{LC}$.

При известных частоте ω и емкости C резонансное значение индуктивности $L_p = 1/\omega^2 C$, а при известных частоте и индуктивности резонансная емкость $C_p = 1/\omega^2 L$.

В подразд. 4.6 было получено выражение для действующего значения тока в последовательно соединенных элементах R , L и C :

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

Резонансное значение тока $I_p = U/R$.

Разность частот ω_1 и ω_2 , соответствующих токам, в $\sqrt{2}$ раз меньшим, чем I_p , дает полосу пропускания последовательного контура $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$, а отношение $Q = \frac{\omega_p}{\Delta\omega}$ называется добротностью.

При резонансе в последовательном контуре напряжения на реактивных элементах в Q раз больше, чем напряжение источника питания. Из-за резкого возрастания напряжения на элементах C и L резонанс в последовательном контуре называют резонансом напряжений: $U_{Lp} = U_{Cp} = UQ$, $U_{Rp} = U$.

Добротность может быть рассчитана по параметрам контура $Q = \rho/R$, где ρ — характеристическое сопротивление контура, $\rho = \sqrt{L/C}$.

Векторная диаграмма при резонансе напряжений приведена на рис. 4.17.

Резонанс токов (параллельный резонанс) может возникнуть в двух параллельных вет-

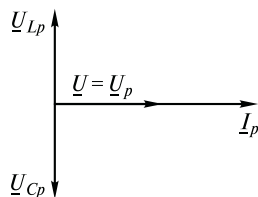


Рис. 4.17. Векторная диаграмма последовательного RLC -контура при резонансе

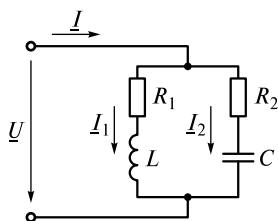


Рис. 4.18. Параллельный резонансный контур

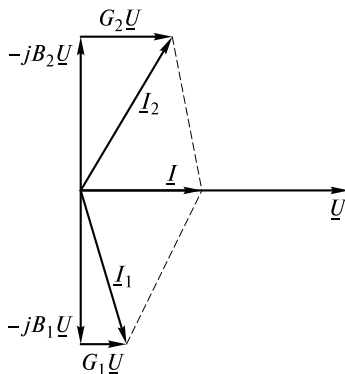


Рис. 4.19. Векторная диаграмма при параллельном резонансе

вах, когда в одну из них включены элементы R и L , а в другую — R и C . На рис. 4.18 представлена схема с такими ветвями.

Сопротивление ветви с R_1 и L равно $\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L$, а сопротивление ветви с R_2 и C равно $\underline{Z}_2 = R_2 - j\frac{1}{\omega C}$.

Их проводимости

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1} = \frac{1}{R_1 + j\omega L} = \frac{R_1}{R_1^2 + (\omega L)^2} - j \frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} = G_1 - jB_1;$$

$$\underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{R_2 - j\frac{1}{\omega C}} = \frac{R_2}{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} + j \frac{1/(\omega C)}{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = G_2 - jB_2.$$

Условие резонанса $B_1 + B_2 = 0$, т. е.

$$\frac{\omega_p L}{R_1^2 + (\omega_p L)^2} - \frac{1/(\omega C)}{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega_p C}\right)^2} = 0,$$

откуда $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{L/C - R_1^2}{L/C - R_2^2}}$.

Полученное выражение показывает, что возникновение резонанса токов можно добиться, изменяя частоту источника или параметры R_1, R_2, L, C .

Входная проводимость цепи при резонансе $\underline{Y}_p = G_1 + G_2$ носит чисто активный характер.

Резонансный ток на входе цепи $I = Y_p U = (G_1 + G_2)U$.

Векторная диаграмма при параллельном резонансе приведена на рис. 4.19.

4.12. Цепи с индуктивно связанными элементами

Две катушки называются индуктивно связанными, если изменение тока в одной из них вызывает возникновение напряжения на другой.

На рис. 4.20 показаны две катушки. Ток i_1 первой катушки создает магнитный поток Φ_{11} . Часть этого потока Φ_{21} , пронизывающая витки второй катушки, называется магнитным потоком взаимной индукции. Другая часть Φ_{1S} , называемая потоком рассеяния, замыкается вне витков второй катушки.

Поток взаимной индукции Φ_{21} , сцепляясь (пронизывая) с витками второй катушки, создает потокосцепление взаимной индукции Ψ_{21} . Если поток Φ_{21} пронизывает все w_2 витков второй катушки, то $\Psi_{21} = w_2 \Phi_{21}$.

Отношение потокосцепления Ψ_{21} к создающему его току i_1 называется взаимной индуктивностью $M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_1}$.

Аналогично определяется $M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{i_2}$.

При этом полагают, что $M_{21} = M_{12} = M$. Единицей взаимной индуктивности является генри (Гн).

Изменение во времени потокосцепления вызывает возникновение ЭДС взаимной индукции. При токе первой катушки $i_1 = I_m \sin \omega t$, $e_{2M} = -\omega M I_m \sin(\omega t + \pi/2)$.

Это приводит к возникновению напряжения взаимной индукции между зажимами второй катушки. При разомкнутых зажимах второй катушки, т.е. при $i_2 = 0$, это напряжение равно $u_{2M} = -e_{2M} = \omega M I_m \sin(\omega t + \pi/2)$.

При наличии тока во второй катушке, напряжение на ней зависит и от напряжения самоиндукции, и от напряжения взаимной индукции.

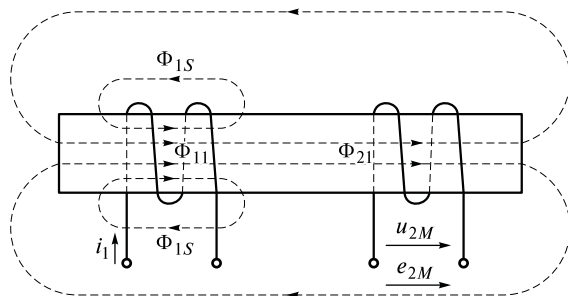


Рис. 4.20. Поток самоиндукции и взаимной индукции двух индуктивно связанных катушек

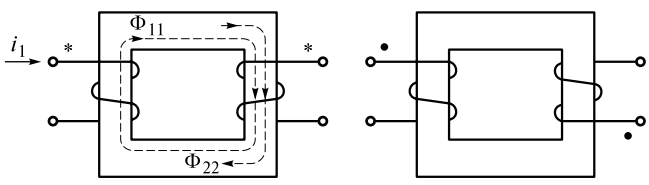


Рис. 4.21. Разметка одноименных зажимов при различных направлениях обмотки второй катушки

Чтобы знать, как направлены магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции, производят разметку одноименных зажимов индуктивно связанных катушек. Два зажима разных катушек называют одноименными, если при одинаковых направлениях токов катушек относительно этих зажимов магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции в каждой из них направлены одинаково и, следовательно, суммируются. Суммируются при этом и ЭДС (а также напряжение) самоиндукции и взаимной индукции. Одноименные зажимы обозначаются одинаковыми знаками (* или •, или Δ и т.д.). На рис. 4.21 показаны одноименные зажимы двух обмоток трансформаторов при различных направлениях обмотки второй катушки

Индуктивно связанные элементы могут быть в цепи включены последовательно, параллельно или принадлежать разным контурам цепи. При последовательном включении индуктивно связанных катушек возможны два способа включения: согласное и встречное. При согласном включении ток в цепи имеет одинаковое направление относительно одноименных зажимов (рис. 4.22, а), а при встречном — разное (рис. 4.22, б). При согласном включении магнитный поток первой катушки $\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{12}$, а второй катушки $\Phi_2 = \Phi_{22} + \Phi_{21}$. Соответственно потокоцепления $\Psi_1 = \Psi_{11} + \Psi_{12}$ и $\Psi_2 = \Psi_{22} + \Psi_{21}$.

Общее потокоцепление двух согласно включенных индуктивных элементов $\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$, а индуктивность $L = \frac{\Psi}{i} = \frac{\Psi_1 + \Psi_2}{i} = \frac{L_1 i + M i + L_2 i + M i}{i} = L_1 + L_2 + 2M$.

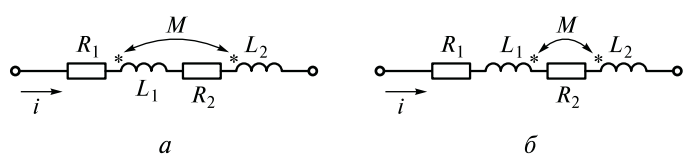


Рис. 4.22. Согласно (а) и встречное (б) включения двух индуктивно связанных катушек

При встречном включении элементов общая индуктивность $L = L_1 + L_2 - 2M$.

На рис. 4.23 изображена схема для экспериментального определения взаимной индуктивности. На ней два индуктивно связанных элемента включены по трансформаторной схеме, т.е. первая катушка своими зажимами подключена к источнику синусоидальной ЭДС, а вторая катушка — к вольтметру. Обычно сопротивление вольтметров очень велико, поэтому ток во второй катушке можно считать равным нулю. Напряжение между зажимами второй катушки будет состоять только из напряжения взаимной индукции.

Амплитуда напряжения второй обмотки связана с током первой обмотки выражением $U_{m2} = \omega M I_{m1}$. Так же связаны и их действующие значения $U_2 = \omega M I_1$.

Измерив I_1 с помощью амперметра A и U_2 с помощью вольтметра V , найдем $Z_M = \omega M = U_2 / I_1$, где Z_M — сопротивление индуктивной связи.

$$\text{Искомая взаимная индуктивность } M = \frac{Z_M}{\omega} = \frac{U_2}{\omega I_1}.$$

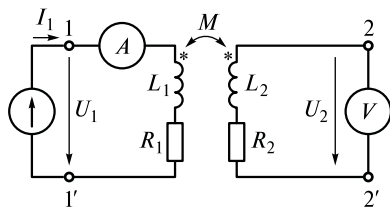


Рис. 4.23. Схема для экспериментального определения взаимной индуктивности

4.13. Трехфазные электрические цепи

Основные понятия и определения. Способы соединения обмоток источника питания трехфазной цепи. Трехфазная цепь представляет собой совокупность трех электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, синхронизированные таким образом, что их начальные фазы отличаются на угол $2\pi/3 = 120^\circ$. Трехфазные машинные генераторы объединяют электрически и механически все три электрические цепи и приводятся в движение внешним источником механической энергии. Каждую из частей трехфазной цепи принято называть фазой.

Трехфазные цепи — наиболее распространены в современной электроэнергетике, так как по сравнению с однофазными и другими многофазными цепями обладают следующими преимуществами:

- экономичность передачи энергии;
- простота получения вращающегося поля;
- наличие двух различных эксплуатационных напряжений — фазного и линейного;
- механический вращающий момент в трехфазных двигателях постоянен по величине и не зависит от времени.

Трёхфазная цепь включает в себя три основных типа элементов: источники электрической энергии (трехфазные генераторы или трансформаторы на промежуточных подстанциях), линии передачи и приемники энергии.

Трёхфазная система ЭДС создается на зажимах трехфазного синхронного генератора.

При вращении ротора его магнитное поле возбуждает в обмотках статора электродвижущие силы, которые имеют одинаковые амплитуды, одну и ту же частоту и сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол $2\pi/3$ (120°). Термин «фаза» используется для обозначения сдвига фаз между током и напряжением в электрической цепи, а также для обозначения отдельных частей электрических цепей, объединенных конструктивно в многофазную цепь.

Схемы замещения фаз трехфазного генератора или вторичных обмоток трехфазного трансформатора представлены на рис. 4.24.

Если ЭДС одной фазы (например, фазы A) принять за начальную с нулевой начальной фазой, то выражения мгновенных значений ЭДС фаз можно записать в виде

$$e_A = E_m \sin \omega t; \quad e_B = E_m \sin (\omega t - 2\pi/3); \quad e_C = E_m \sin (\omega t + 2\pi/3).$$

Графики мгновенных значений трехфазного источника ЭДС представлены на рис. 4.25, *а*.

Комплексы действующих значений ЭДС трехфазной цепи

$$\underline{E} = E; \quad \underline{E}_B = Ee^{-j2\pi/3} = E \angle -120^\circ; \quad \underline{E}_C = Ee^{-j4\pi/3} = Ee^{j2\pi/3} = E \angle 120^\circ.$$

Векторная диаграмма ЭДС трехфазного источника имеет вид, показанный на рис. 4.25, *б*.

Сумма мгновенных значений ЭДС равна нулю в любой момент времени $e_A + e_B + e_C = 0$. В комплексной форме $\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = 0$.

Различают две схемы соединения фаз источника: звездой и треугольником.

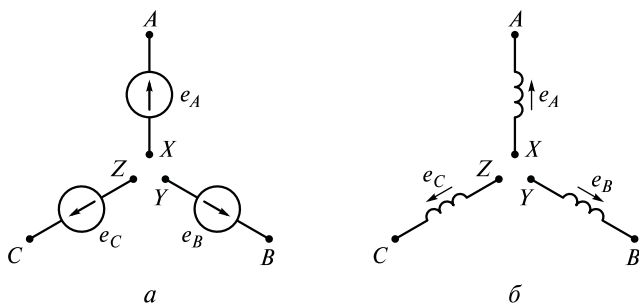


Рис. 4.24. Схемы замещения фаз трехфазного генератора (*а*) и вторичных обмоток трехфазного трансформатора (*б*)

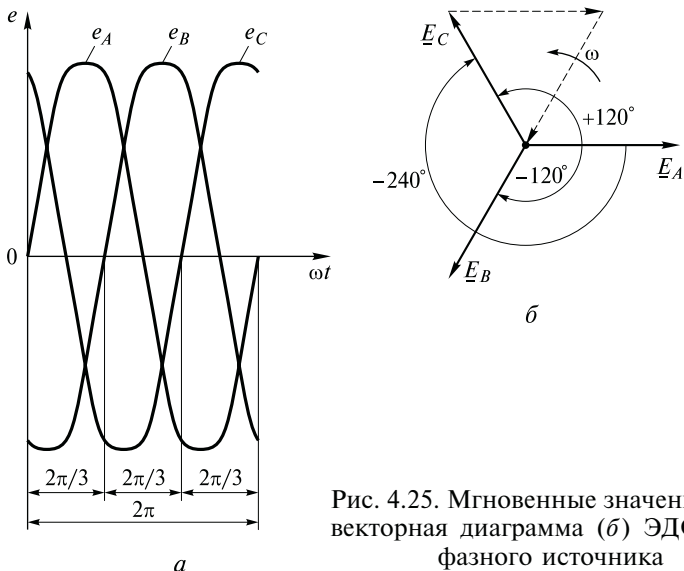


Рис. 4.25. Мгновенные значения (а) и векторная диаграмма (б) ЭДС трехфазного источника

При соединении звездой (рис. 4.26, а) концы фаз X , Y , Z соединяют в один общий узел N , называемый нейтралью или нейтральной точкой генератора (или трансформатора). Провода, соединяющие начала фаз источника и приемника, называются линейными, а провод, соединяющий нейтральные точки источника и приемника — нейтральным проводом, или нейтралью.

При соединении фаз источника треугольником (рис. 4.26, б) объединяют в одну точку начала и концы соответствующих фаз: X и B ; Y и C ; Z и A .

Обмотки фаз источника предпочитают соединять звездой, так как такое соединение обеспечивает лучший режим работы генераторов.

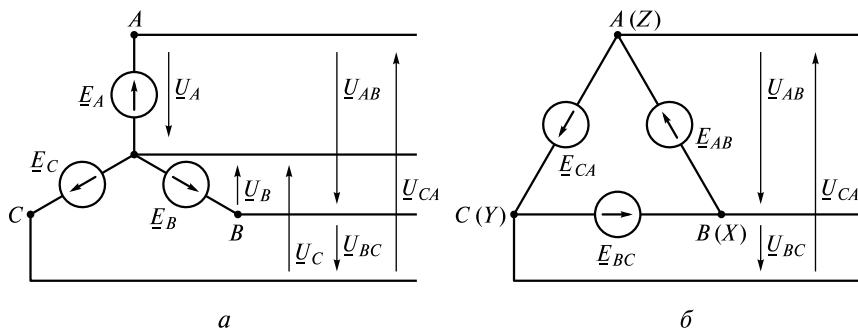


Рис. 4.26. Соединение фаз трехфазного источника звездой (а) и треугольником (б)

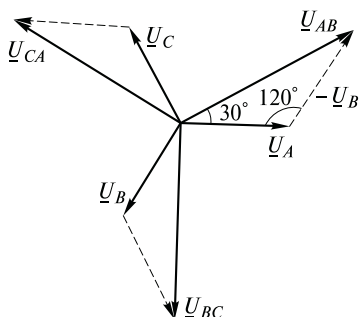


Рис. 4.27. Векторная диаграмма трехфазного источника, соединенного звездой

Фазным называют напряжение между началом и концом каждой фазы, а линейным — между началами двух фаз.

Соотношения между фазными и линейными напряжениями можно определить по второму закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B; \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_B - \underline{U}_C; \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_C - \underline{U}_A. \end{aligned}$$

Из векторной диаграммы (рис. 4.27) следует, что для схемы соединения звездой линейное напряжение $U_{AB} = 2U_A \cos 30^\circ = U_A \sqrt{3}$ или $U_L = \sqrt{3} U_\phi$, т. е. линейное напряжение в $\sqrt{3}$ раз превышает фазное. ГОСТ устанавливает ряд линейных и фазных напряжений, некоторые из которых даны ниже:

$$\begin{aligned} U_L &= 220 \text{ В}, \quad U_\phi = 127 \text{ В}; \\ U_L &= 380 \text{ В}, \quad U_\phi = 220 \text{ В}; \\ U_L &= 660 \text{ В}, \quad U_\phi = 380 \text{ В}. \end{aligned}$$

Соединение фаз нагрузки звездой. В случае если сопротивления фаз приемника равны $Z_a = Z_b = Z_c = Z e^{j\varphi}$, то такие приемники называются симметричными, если это условие не выполняется — несимметричными.

При соединении фаз нагрузки звездой с нейтралью (рис. 4.28) фазные напряжения источника и приемника равны:

$$\underline{U}_A = \underline{U}_a; \quad \underline{U}_B = \underline{U}_b; \quad \underline{U}_C = \underline{U}_c.$$

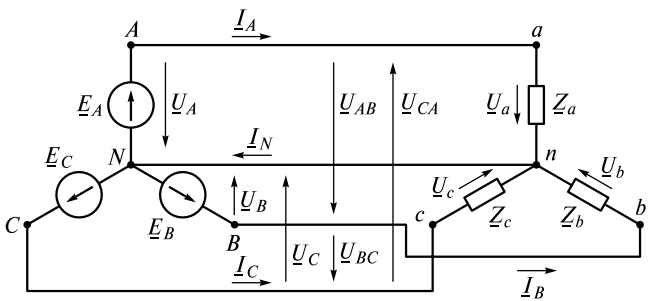


Рис. 4.28. Соединение фаз нагрузки звездой с нейтралью

Если комплексные сопротивления фаз приемника равны, то токи в каждой фазе равны линейным, равны между собой и сдвинуты по фазе по отношению к соответствующим фазным напряжениям на один и тот же угол:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a = \underline{U}_a / \underline{Z}_a;$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_b = \underline{U}_b / \underline{Z}_b;$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_c = \underline{U}_c / \underline{Z}_c.$$

По первому закону Кирхгофа ток в нейтральном проводе при симметричном приемнике равен нулю (см. векторную диаграмму на рис. 4.29):

$$\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0.$$

Следовательно, необходимость в нейтральном проводе при симметричном приемнике отпадает. Трехфазные цепи при соединении фаз приемника звездой без нейтрального провода называются трехпроводными и применяются только для симметричных приемников.

Несимметричные приемники включают к источнику энергии с помощью четырехпроводных цепей. Благодаря нейтральному проводу напряжение на каждой фазе приемника будет равно соответствующему фазному напряжению источника. Следовательно, нейтральный провод обеспечивает сохранение симметрии фазных напряжений несимметричного приемника. При этом токи в фазах не равны по модулю и сдвинуты по фазе на угол, отличающийся от 120° , так как комплексные сопротивления фаз не равны между собой. Их сумма — ток нейтрали — не равен нулю.

Если по каким либо причинам несимметричные приемники, соединенные звездой, окажутся включенными в трехпроводную сеть, то между нейтральными точками приемника и источника возникает напряжение, называемое смещением нейтрали (рис. 4.30).

В соответствии с методом узловых напряжений смещение нейтрали

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}.$$

Напряжения на фазах приемника можно определить, используя второй закон Кирхгофа:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{nN}; \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN}; \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN}.$$

Зная напряжение между нейтралью и фазные напряжения, легко найти фазные токи:

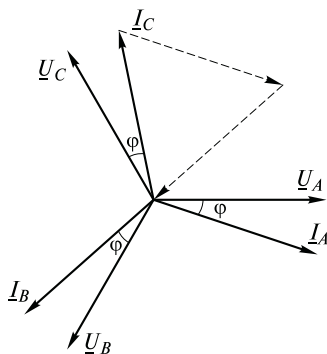


Рис. 4.29. Векторная диаграмма симметричной нагрузки, соединенной звездой

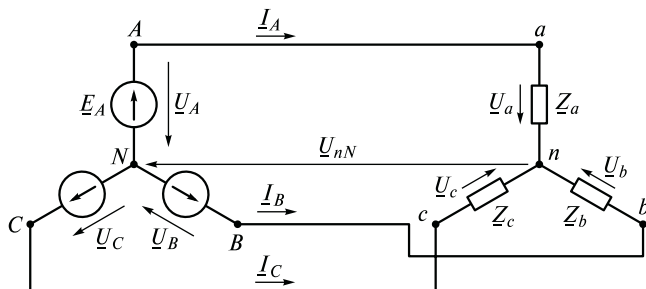


Рис. 4.30. Соединение фаз нагрузки звездой без нейтрали

$$\underline{I}_a = \underline{U}_a / \underline{Z}_a; \quad \underline{I}_b = \underline{U}_b / \underline{Z}_b; \quad \underline{I}_c = \underline{U}_c / \underline{Z}_c.$$

Соединение фаз нагрузки треугольником. В связи с тем что на практике значительная часть включаемых в трехфазную цепь приемников бывают несимметричными, важно обеспечить независимость работы отдельных фаз. Кроме четырехпроводной цепи подобными свойствами обладают и трехпроводные цепи при соединении фаз приемника треугольником (рис. 4.31).

При этом фазные напряжения приемника равны соответствующим линейным напряжениям источника $\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{AB}$; $\underline{U}_{bc} = \underline{U}_{BC}$; $\underline{U}_{ca} = \underline{U}_{CA}$.

Токи в фазах приемника

$$\underline{I}_{ab} = \underline{U}_{ab} / \underline{Z}_{ab}; \quad \underline{I}_{bc} = \underline{U}_{bc} / \underline{Z}_{bc}; \quad \underline{I}_{ca} = \underline{U}_{ca} / \underline{Z}_{ca}.$$

Линейные токи можно определить по фазным на основании первого закона Кирхгофа для узлов a , b , и c :

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$$

Из векторной диаграммы симметричной нагрузки, соединенной треугольником (рис. 4.32), следует, что в этом случае симмет-

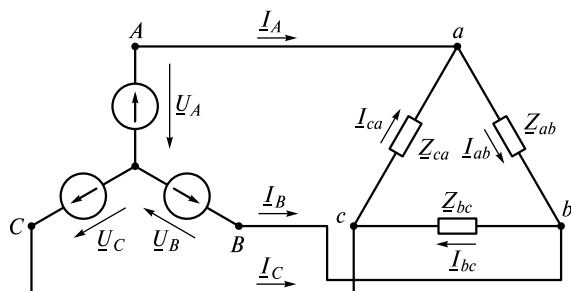


Рис. 4.31. Соединение фаз нагрузки треугольником

ричных приемников линейные токи в $\sqrt{3}$ раз больше фазных токов, т.е. $I_{л} = \sqrt{3}I_{\phi}$.

Симметричные трехфазные приемники, в частности электродвигатели, можно включать в трехпроводную цепь треугольником либо звездой в зависимости от напряжения сети. Многие типы электродвигателей имеют шесть выводов и на их паспортном щитке указывают два напряжения: одно при включении обмоток двигателя звездой, другое — треугольником.

Например, если на щитке указано 380/220, то это означает, что фазное напряжение двигателя равно 220 В и его обмотки можно соединить звездой, если линейное напряжение сети равно 380 В, или треугольником, если линейное напряжение сети равно 220 В.

Мощность трехфазных цепей. Активная мощность трехфазного источника равна сумме активных мощностей отдельных фаз:

$$P_u = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C.$$

Реактивная мощность трехфазного источника равна сумме реактивных мощностей отдельных фаз:

$$Q_u = Q_A + Q_B + Q_C = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C.$$

Активная мощность приемников трехфазной цепи равна сумме активных мощностей отдельных фаз: $P = P_a + P_b + P_c$.

Реактивная мощность приемников соответственно равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз: $Q = Q_a + Q_b + Q_c$. Полная мощность $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$. При симметричном трехфазном приемнике $P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi}\cos\varphi_{\phi}$; $Q = 3Q_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi}\sin\varphi_{\phi}$.

Так как за номинальные величины обычно принимают линейные напряжения и токи, то мощности удобнее выражать через линейные величины.

При соединении фаз приемника звездой $U_{\phi} = U_{л}/\sqrt{3}$, $I_{\phi} = I_{л}$.

При соединении треугольником $U_{\phi} = U_{л}$; $I_{\phi} = I_{л}/\sqrt{3}$.

Поэтому независимо от схемы соединения фаз симметричного приемника его активная мощность $P = \sqrt{3}U_{л}I_{л}\cos\varphi_{\phi} = \sqrt{3}UI\cos\varphi$. Реактивная мощность $Q = \sqrt{3}UI\sin\varphi$. Полная мощность $S = \sqrt{3}UI$.

Индикатор последовательности фаз. Часто необходимо определить последовательность фаз трехфазной цепи, например, для оп-

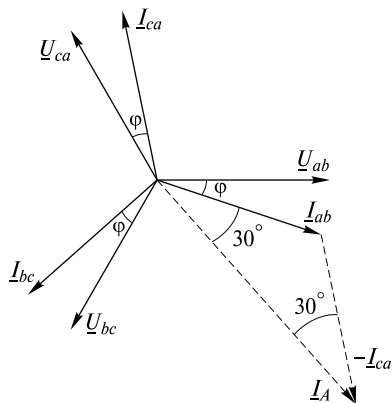


Рис. 4.32. Векторная диаграмма симметричной нагрузки, соединенной треугольником

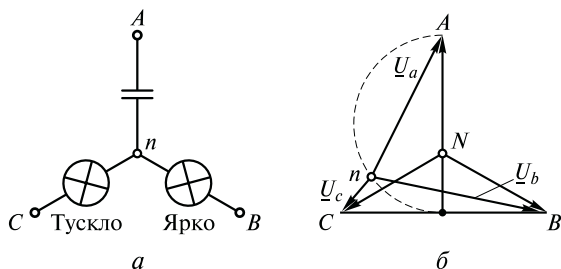


Рис. 4.33. Схема (а) и векторная диаграмма (б) указателя последовательности фаз

ределения направления вращения двигателя или при подсоединении трансформаторов. Для этого существует простой и надежный прибор — индикатор последовательности фаз.

Индикатор фаз (рис. 4.33) — это статическое устройство, состоящее из двух лампочек и конденсатора.

Конденсатор выбирают из условия $1/(\omega C) = X_C = R$, где R — это сопротивление ламп. Прибор снабжается гибкими проводами для подсоединения к фазам измеряемой цепи. Если выбрать одну из фаз в качестве фазы A и подключить к ней конденсатор, а к двум другим лампочки индикатора, то лампочка в фазе B будет гореть ярко, а в фазе C — тускло.

4.14. Способы повышения коэффициента мощности симметричных трехфазных приемников

В подразд. 4.13 было показано, что мощность в электрической цепи имеет две составляющих: активную и реактивную. Наиболее выгодный режим работы цепи тот, при котором совершаемая работа максимальна, т.е. мощность в цепи равна активной мощности P . При этом суммарная реактивная мощность равна нулю ($Q=0$).

Доля активной мощности в цепи определяется коэффициентом мощности $\lambda = \cos \varphi = P/S$, где S — полная мощность цепи, $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

Любая реальная электрическая цепь содержит все три вида пассивных элементов: резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы. Промышленные предприятия и большинство бытовых потребителей имеют в основном активно-индуктивные приемники электроэнергии. Очевидно, что подключение конденсаторов, позволяет повысить значение коэффициента мощности в цепях, содержащих резисторы и индуктивные элементы.

Компенсация реактивной мощности уменьшает ток, потребляемый двигателем из линии (для генератора уменьшается ток отдаваемый в линию и, следовательно, установленная мощность). Технико-экономические расчеты показывают, что во многих случаях целесообразно устанавливать батареи конденсаторов для повышения коэффициента мощности цепи.

В больших энергетических системах для повышения коэффициента мощности могут использоваться синхронные генераторы (компенсаторы) в специальных режимах.

При финансовых расчетах промышленных потребителей энергии с энергосистемой оплата зависит не только от количества потребленной энергии, но и от того, при каком коэффициенте мощности работает потребитель.

Примерно 70 % электрической энергии потребляется на промышленные нужды и примерно 30 % — в быту. Около 70 % промышленной нагрузки составляют асинхронные двигатели, потребляющие из сети активную и реактивную энергии.

Трансформаторы и другие промышленные нагрузки также потребляют реактивную энергию. На асинхронные двигатели и трансформаторы расходуется 80...90 % потребляемой реактивной энергии.

Очевидно, что загрузка линий передачи и трансформаторов потоками реактивной энергии не экономична и приводит к дополнительным потерям напряжения. Повышение коэффициента мощности промышленных предприятий и энергосистем осуществляется за счет организационных мероприятий по упорядочению работы оборудования предприятий и рационального использования мощностей и электротехнических устройств, а также за счет мероприятий по повышению коэффициента мощности с помощью компенсирующих устройств — синхронных компенсаторов и статических конденсаторов.

4.15. Техника безопасности при эксплуатации трехфазных цепей

Основой техники безопасности при обслуживании любых промышленных и бытовых устройств является строгое соблюдение правил эксплуатации электроустановок.

В соответствии с правилами эксплуатации электроустановок в установках напряжением до 1000 В для питания силовых и осветительных приемников напряжением 380 В применяют трехфазные четырехпроводные сети с глухозаземленной нейтралью.

При повышении требований к электробезопасности установок применяют трехпроводные сети с изолированной нейтралью. Выбор режима нейтрали осуществляется на основе технико-эконо-

мических расчетов, надежности электроснабжения; электробезопасности.

Токи промышленной частоты более 0,01 А опасны для человека, а токи, превышающие 0,08 А, смертельны. Опасные напряжения и токи могут возникать не только при прикосновении к одной из фаз трехфазной цепи, но и при прикосновении к заземленным токоведущим шинам и проводам, оказавшимся под нерасчетным напряжением в результате аварии. Если человек подойдет к опорам высоковольтных ЛЭП или трансформаторных установок при аварийных режимах работы последних, то может возникнуть опасное шаговое напряжение между ногами человека.

Прикосновение к одному из проводов трехфазной цепи с изолированной нейтралью может привести в случае аварии или некачественной изоляции к поражению человека линейным напряжением. Для снижения напряжений прикосновения применяют защитное заземление корпусов электроустановок.

В четырехпроводных сетях напряжением до 1000 В с заземленной нейтралью используют защитное зануление. В этом случае при повреждении изоляции фазный и нейтральный провода оказываются замкнутыми накоротко, что вызывает срабатывание защиты.

Контрольные вопросы

1. Какие величины называются переменными и периодическими?
2. Какими способами можно представить синусоидальную величину?
3. Дайте определение амплитуды, периода, частоты, фазы и начальной фазы синусоидальной величины.
4. Дайте определение среднего и действующего значения синусоидальной величины.
5. Какие физические явления приводят к сдвигу фаз между током и напряжением в цепях переменного тока?
6. Проанализируйте энергетические процессы в цепи с последовательным соединением резистора и катушки индуктивности.
7. Проанализируйте энергетические процессы в цепи с последовательным соединением резистора и конденсатора.
8. Проанализируйте энергетические процессы в цепи с последовательным соединением элементов R , L и C .
9. Охарактеризуйте понятие мощности в цепях синусоидального тока.
10. В чем состоит сущность комплексного метода?
11. Перечислите свойства комплексных чисел.
12. Как осуществляется переход от синусоидальных величин к комплексам и наоборот?
13. Запишите закон Ома в комплексной форме.
14. Запишите законы Кирхгофа в комплексной форме.
15. Дайте определение активной, реактивной и полной проводимостей в цепях переменного тока.

16. Какова методика определения проводимостей в цепях с параллельными ветвями?
17. Какова комплексная форма баланса мощностей?
18. Дайте определения активной и реактивной мощностей.
19. Изобразите графики мгновенной мощности для каждого из элементов резонансного RLC -контура.
20. Запишите выражение для комплексных сопротивлений RL -, RC - и RLC -цепей.
21. Как определяется угол сдвига φ между током и напряжением?
22. Запишите выражения для комплексной проводимости, выделите активную и реактивную части.
23. Запишите выражение для определения коэффициента мощности ($\cos \varphi$), поясните значение этого коэффициента.
24. Дайте определения активной, реактивной и полной мощности цепи, а также поясните, в каких единицах они определяются.
25. Каков физический смысл понятий активной, реактивной и полной мощности?
26. Дайте определение последовательного и параллельного колебательных контуров.
27. Запишите выражение, определяющее отношение напряжения на активном и реактивном элементах резонансной цепи.
28. Какой режим называется резонансом токов, каковы особенности этого режима?
29. Что такое добротность контура, как она определяется?
30. Почему при резонансе напряжений ток в цепи достигает наибольшего значения?
31. Запишите выражение для расчета резонансной частоты при резонансе токов.
32. Дайте определение взаимной индуктивности и ее магнитодвижущей силы.
33. Дайте определение встречного и согласного соединения магнитно связанных катушек.
34. Рассчитайте входное сопротивление для последовательного включения двух индуктивностей при встречном и согласном включениях и имеющих параметры: $R_1 = 3 \text{ Ом}$, $X_1 = 8 \text{ Ом}$, $R_2 = 5 \text{ Ом}$, $X_2 = 12 \text{ Ом}$ и $X_M = 4 \text{ Ом}$.
35. Какими преимуществами обладают трехфазные цепи по сравнению с однофазными?
36. Какие схемы применяют для соединения фаз трехфазных источников электрической энергии?
37. Какие напряжения и токи называют линейными, а какие — фазными?
38. Каковы соотношения между фазными и линейными напряжениями?
39. Какая нагрузка является симметричной, а какая — несимметричной?
40. Что такое смещение нейтрали и как его определяют?
41. Как влияет несимметричная нагрузка на напряжение нагрузки при соединении звездой без нейтрального провода?
42. Каково назначение нейтрального провода?

Темы рефератов

1. Представление синусоидальных функций с помощью векторов и комплексных чисел.
2. Сопротивления и проводимости в цепях синусоидального тока.
3. Мощности в цепях синусоидального тока.
4. Расчет симметричных и несимметричных трехфазных цепей.
5. Последовательный и параллельный резонанс в электрических цепях.

ГЛАВА 5

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

5.1. Общие сведения об электротехнических устройствах

Электрическая энергия широко используется в производстве и в быту, так как она хорошо транспортируется (передается на расстояние), легко преобразуется в другие виды энергии.

Преобразование электрической энергии происходит в электрических устройствах, которые могут быть объединены по виду преобразованной энергии. Наиболее широкое применение находят следующие электротехнические устройства:

преобразователи электрической энергии в электрическую (трансформаторы, преобразователи, выпрямители, регуляторы напряжения и тока и т.д.);

устройства, преобразующие электрическую энергию в тепловую (нагреватели, дуговые электрические печи, аппараты электрической сварки, индукционные печи и т.д.);

устройства, преобразующие электрическую энергию в механическую (электрические двигатели, электрические аппараты, электроизмерительные приборы, электроинструменты и т.д.);

устройства, преобразующие электрическую энергию в световую (лампы накаливания, люминесцентные лампы, прожекторы и другие виды осветительной аппаратуры).

Существуют также устройства, позволяющие преобразовывать электрическую энергию в звуковую, химическую и другие виды энергии. Перечисленные устройства используют в различных технологических процессах, в современных информационных системах, в научных исследованиях.

5.2. Виды и методы электрических измерений

Трудно найти область современного производства, где бы не осуществлялись измерения.

Измерение — определение значений физических величин опытным путем с помощью специальных технических средств. Устрой-

ства, позволяющие проводить измерения, называются средствами измерения. Особая роль принадлежит электроизмерительной технике, которая позволяет наиболее просто осуществить процесс измерения.

Измерения в зависимости от способа получения результата подразделяются на прямые и косвенные. Прямыми называют такие измерения, при которых искомое значение находится непосредственно по показанию приборов (измерение тока амперметром, напряжения — вольтметром, электроэнергии — счетчиком). При косвенных измерениях результат определяют по формуле, включающей в себя величины, значения которых найдены с помощью прямых измерений (измерение электрического сопротивления с помощью вольтметра и амперметра — сначала измеряют напряжение и ток, а затем по закону Ома вычисляют сопротивление).

Существуют два основных метода электрических измерений: непосредственной оценки и сравнения.

При методе непосредственной оценки измеряемая величина определяется по показанию прибора. Шкала прибора градуируется в соответствующих единицах измеряемой величины по эталонному прибору на заводе при изготовлении прибора. В качестве примера можно привести измерения вольтметром, амперметром, фазометром, ваттметром и т. д. Основными преимуществами этого метода являются простота измерений и малые затраты времени.

При методе сравнения измеряемая величина сравнивается с эталоном, образцовой или рабочей мерой. Точность измерений значительно выше, но возрастает и сложность измерений.

5.3. Погрешности измерений

Из-за несовершенства приборов при всяком измерении появляется погрешность Δ , которая называется абсолютной. *Абсолютная погрешность измерения* Δ — разность между измеренным A и действительным A_d значениями измеряемой величины. Абсолютная погрешность имеет размерность измеряемой величины и не позволяет сравнивать метрологические характеристики различных средств и методов измерений. Поэтому вводят безразмерные формы погрешности — относительную и приведенную.

Относительная погрешность δ — отношение абсолютной погрешности к истинному (действительному) значению измеряемой величины. Как правило, ее выражают в процентах $\delta \approx \frac{\Delta}{A_d} 100$.

Истинное значение измеряемой величины не известно, поэтому обычно пользуются выражением $\delta \approx \frac{\Delta}{A} 100$.

Величины Δ и δ характеризуют точность измерения. Чтобы оценить погрешность прибора, вводят приведенную погрешность γ .

Приведенная погрешность γ — отношение абсолютной погрешности Δ к нормирующему значению $A_{\text{норм}}$. Значение $A_{\text{норм}}$ принято выбирать равным верхнему пределу шкалы прибора, т.е. $A_{\text{норм}} = A_{\text{max}}$, отсюда $\gamma = \frac{\Delta}{A_{\text{max}}} 100$.

Абсолютная погрешность Δ обусловлена систематическими и случайными погрешностями прибора, а также ошибками лица, проводящего измерения.

Систематическая погрешность остается постоянной или изменяется по определенному закону. Она возникает из-за влияния факторов, которые могут быть учтены. К ним относятся, например, температура, электромагнитные поля, радиация, несовершенство прибора и т.д.

Случайная погрешность возникает по случайному закону вследствие факторов, которые нельзя учесть. Оценку этой погрешности можно произвести только при большом количестве измерений, используя статистические методы.

Различают также погрешности, связанные с эксплуатацией прибора — основную и дополнительную.

Основная погрешность возникает при нормальных условиях эксплуатации, которые указаны в паспорте.

Дополнительная погрешность возникает при отклонении условий измерения от нормальных.

Погрешность измерительного средства характеризуют *классом точности* — значением приведенной погрешности в процентах. Это значение округляют до одного из следующих чисел, установленных для электроизмерительных приборов: 4,0; 2,5; 1,5; 1,0; 0,5; 0,2; 0,1; 0,05.

Класс точности является обобщенной метрологической характеристикой измерительного средства. Зная класс точности, мож-

но найти абсолютную и относительную погрешности: $\Delta = \gamma \frac{A_{\text{max}}}{100}$;

$$\delta = \gamma \frac{A_{\text{max}}}{A}.$$

5.4. Основные характеристики электроизмерительных приборов

Измерительные приборы должны обладать определенными характеристиками, основными из которых являются: погрешность, чувствительность, диапазон измерения, потребляемая мощность.

Погрешность прибора, как было указано в подразд. 5.3, определяется его классом точности.

Чувствительностью S прибора называется отношение приращения перемещения указателя измерения Δa (например, стрелки электромеханического прибора) к приращению измеряемой величины ΔX $\left(S = \frac{\Delta a}{\Delta X} \right)$. Если шкала прибора равномерная, то

$S = \frac{a}{X}$. Величина, обратная чувствительности, называется ценой

деления шкалы прибора $c = \frac{1}{S}$.

Диапазон измерения — область значений измеряемой величины X , для которой погрешность прибора укладывается в класс точности.

Потребляемая мощность — мощность, которую потребляет прибор для выполнения необходимых измерений. Чем меньше потребляемая мощность, тем выше качество прибора.

5.5. Классификация электроизмерительных приборов

Для удобства изучения и применения электроизмерительные приборы классифицируют по различным признакам.

Все приборы подразделяются по классам точности. Класс точности указывают на циферблате прибора.



По виду измеряемой величины электроизмерительные приборы делятся на приборы для измерения электрических (напряжение, ток, мощность, сопротивление и др.) и неэлектрических (температура, давление, влажность и др.) величин.

По способу представления измеряемой величины приборы подразделяются на аналоговые и цифровые. Аналоговые приборы имеют шкалу со стрелкой и измеряют непрерывные электрические сигналы. Эти приборы могут быть электромеханическими или электронными. Цифровые приборы измеряемый непрерывный сигнал переводят во временные импульсы, которые затем считываются цифровым устройством.

По роду тока различают приборы постоянного тока, переменного тока и комбинированные.

На процесс измерения также оказывает влияние расположение самого прибора, которое обозначается специальными значками на циферблате прибора. На циферблат прибора с помощью условных обозначений наносятся основные характеристики прибора, облегчающие его эксплуатацию (табл. 5.1).

Обозначения на шкалах электроизмерительных приборов

Наименование	Обозначение
Прибор магнитоэлектрический	
Логометр магнитоэлектрический	
Прибор электромагнитный	
Прибор электродинамический	
Логометр электродинамический	
Прибор индукционный	
Прибор электростатический	
Прибор выпрямительной системы	
Прибор термоэлектрический	
Постоянный ток	—
Переменный ток	~
Постоянный и переменный ток	≍
Вертикальное положение шкалы	
Горизонтальное положение шкалы	
Изоляция испытана напряжением 2 кВ	
Защита от внешних магнитных полей	
Защита от внешних электрических полей	

5.6. Электромеханические измерительные приборы

Электромеханические приборы отличаются относительной простотой и высокой надежностью. Класс точности этих приборов достигает 0,05. Конструкция электромеханических приборов содержит следующие общие элементы: измерительная цепь; измерительный механизм; демпфирующее устройство; стрелка; шкала; корпус и ряд дополнительных устройств.

Измерительная цепь предназначена для преобразования измеряемой величины в величину, которая воздействует на измерительный механизм.

Измерительный механизм преобразует поступающую из измерительной цепи электрическую величину в механическое перемещение (обычно угловое).

Демпфирующее устройство служит для устранения колебаний стрелки возле положения равновесия. Демпфирующее устройство создает момент, который действует только во время движения стрелки и исчезает при отсчете результата (остановке стрелки).

Стрелка и шкала предназначены для отсчета результата измерений.

Корпус прибора защищает механизм от влаги, пыли, механических повреждений. В некоторых приборах корпус играет роль экрана от электромагнитных полей.

Дополнительные устройства создают противодействующий момент $M_{пр}$, обеспечивают свободное вращение подвижной системы со стрелкой, балансира, установку нуля и т.д.

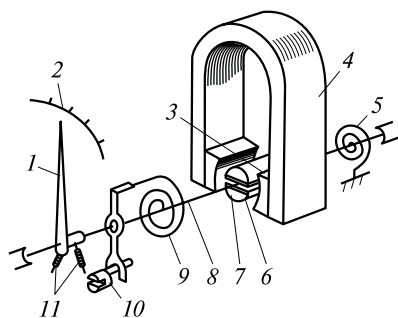


Рис. 5.1. Магнитоэлектрический измерительный прибор:

1 — стрелка; 2 — шкала; 3 — полюсные наконечники; 4 — постоянный магнит; 5, 9 — пружины; 6 — подвижная катушка; 7 — неподвижный цилиндр; 8 — ось; 10 — устройство установки нуля; 11 — противовесы

Приборы магнитоэлектрической системы. Указанные приборы имеют высокую точность, малую потребляемую мощность, равномерную шкалу. Применяют их обычно в качестве амперметров, вольтметров и омметров в цепях постоянного тока.

В основе приборов магнитоэлектрической системы лежит силовое воздействие магнитного поля на находящийся в нем проводник с током. Магнитоэлектрический измерительный прибор (рис. 5.1) состоит из постоянного магнита 4 с полюсными наконечниками 3. Между полюсными наконечниками расположен неподвижный цилиндр 7, изготовленный из магнитной стали. Та-

кая конструкция позволяет получить в воздушном зазоре между цилиндром и полюсными наконечниками радиально равномерное магнитное поле. В этом поле находится подвижная катушка *b* с числом витков *w*, которая укреплена на оси *δ*. Концы обмотки с помощью спиральных пружин *5*, *9*, создающих противодействующий момент $M_{пр}$, соединены электрически с измерительной цепью.

По катушке протекает ток *I*. Каждый виток катушки *b* может быть представлен в виде двух проводников длиной *l*. По этим проводникам ток протекает в противоположном направлении и создает пару сил, действующей на обе активные части витка. По закону Ампера, сила $F = BlwI$. Пара сил создает вращающий момент

$$M_{вр} = 2F \frac{d}{2} = BlwdI, \text{ где } d \text{ — ширина катушки.}$$

Вращающий момент уравнивается противодействующим моментом, который пропорционален углу поворота рамки α , т.е. $M_{пр} = k\alpha$, где *k* — коэффициент пропорциональности. Поскольку $M_{вр} = M_{пр}$, получаем $BlwdI = k\alpha$, откуда находим связь угла поворота α катушки с током *I* в ней:

$$\alpha(I) = \frac{Blwd}{k} I = SI. \text{ Полученное}$$

выражение позволяет найти чувствительность прибора $S = \frac{\alpha}{I} =$

$$= \frac{Blwd}{k}.$$

Для приборов магнитоэлектрической системы *S* постоянна, цена деления *c* шкалы тоже постоянна, $c = \frac{1}{S}$. Именно по этой причине шкала у таких приборов равномерная.

Для измерения в цепях переменного тока необходимо добавить выпрямитель. Такое сочетание магнитоэлектрического прибора и выпрямителя называют прибором выпрямительной системы.

Приборы электромагнитной системы.

Такие приборы используют для измерения в цепях постоянного и переменного тока в качестве амперметров, вольтметров и фазометров. Приборы просты по устройству, широко применяются в качестве щитовых, но имеют невысокие точность и чувствительность.

Принцип действия электромагнитного измерительного прибора (рис. 5.2) основан на взаимодействии магнитного поля и

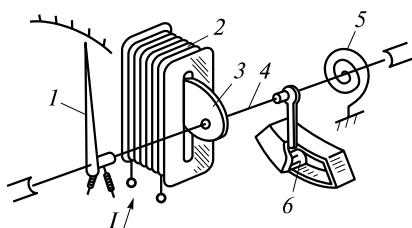


Рис. 5.2. Электромагнитный измерительный прибор:

1 — стрелка; 2 — катушка; 3 — ферромагнитный сердечник; 4 — ось; 5 — пружина; 6 — демпфер

ферромагнитного сердечника. В качестве источника магнитного поля служит катушка 2, по которой протекает ток I . Ферромагнитный сердечник 3 под действием магнитного поля катушки втягивается в нее и поворачивает ось 4, на которой закреплена стрелка 1. Противодействующий момент $M_{\text{пр}} = k_2\alpha$ создается спиральной пружиной 5 и пропорционален углу поворота стрелки 1. Для устранения колебаний стрелки используют воздушный демпфер 6.

По закону Ампера, сила взаимодействия катушки и сердечника $F = BlwI$, где B — индукция в магнитном сердечнике; l , w , I — соответственно длина активной части проводников, число витков и ток катушки.

Индукция B в сердечнике создается магнитным полем катушки и пропорциональна току I , т.е. $B \equiv I$. Таким образом, сила F и, следовательно, вращающий момент $M_{\text{вр}}$ будут пропорциональны квадрату тока: $M_{\text{вр}} = k_1 I^2$. Вращающий момент уравновешивается противодействующим моментом ($M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$). В результате получаем

$\alpha = \frac{k_1}{k_2} I^2 = k I^2$. Приборы электромагнитной системы можно при-

менять и для измерения напряжений. Выражая I через U и сопро-

тивление катушки R_k , получаем $\alpha = k \left(\frac{U}{R_k} \right)^2 = \frac{k}{R_k^2} U^2$.

Угол поворота стрелки прибора пропорционален квадрату тока или напряжения катушки. Это означает, что шкала электромагнитного прибора является неравномерной.

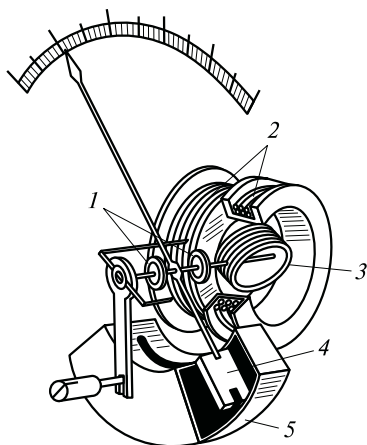


Рис. 5.3. Электродинамический измерительный прибор:

1 — пружина; 2 — неподвижная катушка; 3 — подвижная катушка; 4 — стрелочный механизм; 5 — демпфирующее устройство

Приборы электродинамической системы. Эти приборы применяют в цепях постоянного и переменного токов. Они отличаются высокой точностью (класс точности 0,1; 0,2; 0,5), но имеют большое внутреннее потребление электроэнергии и сравнительно низкую чувствительность.

Электродинамический измерительный прибор (рис. 5.3) состоит из неподвижной катушки 2, имеющей две секции, подвижной катушки 3, стрелочного механизма 4, демпфирующего устройства 5. Подвижная катушка находится внутри неподвижной и может поворачиваться на оси вместе со стрелкой.

По неподвижной катушке протекает ток I_1 , который создает внут-

ри нее магнитное поле. К подвижной катушке с помощью спиральных пружин I подводят ток I_2 . Этот ток взаимодействует с магнитным полем неподвижной катушки, в результате чего появляется вращающий момент $M_{вр}$, который и отклоняет подвижную катушку со стрелкой. Противодействующий момент создается спиральными пружинами I , а колебания стрелки гасятся демпфирующим устройством 5 .

Вращающий момент электродинамического прибора пропорционален обоим токам: $M_{вр} = kI_1I_2$. Такое соотношение вытекает из закона Ампера $F = Bl\omega I$, так как индукция магнитного поля неподвижной катушки B создается током I_1 , причем B пропорциональна I_1 .

В случае синусоидальных токов выражение для вращающего момента приобретает вид $M_{вр} = kI_1I_2\cos\Psi$, где Ψ — угол сдвига фаз между токами I_1 и I_2 .

Электродинамический прибор можно использовать для измерения тока (в этом случае обе катушки соединены последовательно и по ним протекает один ток), мощности или в качестве фазометра. В последних двух случаях прибор имеет две пары зажимов (два входа).

Шкала амперметров и вольтметров электродинамической системы неравномерная.

Приборы индукционной системы. Индукционный измерительный прибор (рис. 5.4) обычно применяется в качестве счетчика электрической энергии в цепях переменного тока. Прибор содержит два неподвижных электромагнита 1 и 5 , вращающийся алюминиевый диск 3 , укрепленный на оси 2 .

По обмоткам обоих электромагнитов протекают синусоидальные токи I_1 и I_2 , которые создают потоки Φ_1 и Φ_2 .

Оба потока пронизывают диск и наводят в нем вихревые токи. Один из потоков пропорционален напряжению цепи, другой — току. Магнитный поток Φ_1 взаимодействует с вихревыми токами, созданными электромагнитом 5 , а поток Φ_2 — с вихревыми токами, созданными электромагнитом 1 . Возникает вращающий момент $M_{вр}$, который начинает вращать диск. Постоянный магнит 4 служит для создания тормозного момента.

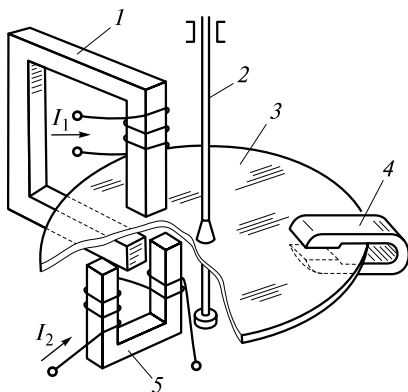


Рис. 5.4. Индукционный измерительный прибор:

1, 5 — неподвижные электромагниты;
2 — ось; 3 — диск; 4 — магнит тормозного момента

Вращающий момент диска зависит от тока и напряжения цепи, а также от угла сдвига фаз между ними φ . Тормозной момент зависит от скорости вращения диска, поэтому при равенстве моментов $M_{вр} = M_{тр}$ скорость вращения дисков будет увеличиваться при возрастании $M_{вр}$. Число оборотов n диска за время t будет пропорционально электрической энергии W , потребленной цепью за это время: $W = Pt = cn$, где P — мощность цепи; c — коэффициент, зависящий от конструкции счетчика.

На основе индукционных измерительных механизмов разработаны и выпускаются однофазные и трехфазные счетчики электрической энергии переменного тока. Они просты по конструкции, широко применяются в промышленности и быту. Класс точности этих приборов 1,0; 2,0; 2,5.

Приборы электростатической системы. Эти приборы обычно применяются в качестве вольтметров в цепях, имеющих значительные магнитные поля.

Электростатический измерительный прибор (рис. 5.5) представляет собой воздушный конденсатор, образованный неподвижными 1, 4 и подвижной 3 пластинами. Неподвижных и подвижных пластин может быть несколько. Подвижная пластина укреплена на одной оси со стрелкой 2 прибора и может поворачиваться внутри неподвижных пластин.

К обеим пластинам подается измеряемое напряжение U , в результате чего на них появляются электрические заряды противоположного знака, которые создают электрическое поле между пластинами. Электрическое поле воздействует на подвижную пластину и поворачивает ее, причем

силы электрического поля стремятся повернуть подвижную пластину таким образом, чтобы энергия электрического поля

$$W_э = \frac{CU^2}{2} \text{ стала наибольшей.}$$

Напряжение U при измерении не меняется, поэтому энергия электрического поля может увеличиваться только за счет емкости конденсатора C . Так как емкость конденсатора наибольшая при полностью втянутой подвижной пластине, то подвижная пластина втягивается и поворачивает стрелку. Движение пластины прекращается, когда противодействующий момент, создаваемый гиб-

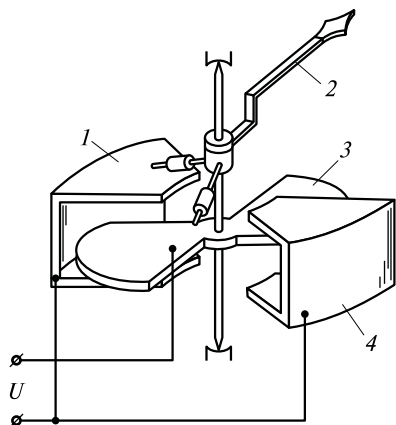
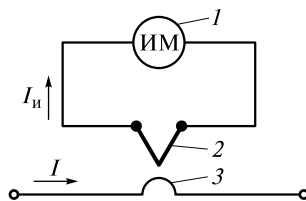


Рис. 5.5. Электростатический измерительный прибор:

1, 4 — неподвижные пластины; 2 — стрелка; 3 — подвижная пластина

Рис. 5.6. Термоэлектрический преобразователь:

I — магнитоэлектрический прибор; 2 — термопара; 3 — нагреватель



кой пружиной, уравнивает вращающий момент. Шкала электростатического прибора неравномерная.

Вольтметры электростатической системы имеют широкий частотный диапазон, малое потребление электроэнергии, не зависят от магнитных полей. Выпускаются переносные и щитовые вольтметры классов точности 0,5; 1,0; 1,5 на напряжение от 10 до 300 В.

К недостаткам рассмотренных приборов относятся малая чувствительность, большая зависимость от электрических полей (механизм прибора необходимо экранировать), невысокая точность.

Приборы термоэлектрической системы. Термоэлектрические приборы состоят из термоэлектрического преобразователя и магнитоэлектрического прибора. Термоэлектрические приборы применяются обычно в цепях переменного тока в качестве амперметров и вольтметров. Основными достоинствами приборов является высокая точность измерений в широком диапазоне частот и независимость показаний от формы кривой тока (класс точности термоэлектрических амперметров составляет 1,0; 1,5).

Термоэлектрический преобразователь (рис. 5.6) состоит из нагревателя 3, миниатюрной термопары 2 и магнитоэлектрического прибора I . В качестве нагревателя обычно используется тонкая проволока из нихрома или константана, по которой протекает измеряемый ток I . На выходе термопары развивается термоЭДС, которая пропорциональна количеству теплоты, выделяемой током I в нагревателе, т. е. $E = k_1 I^2$. Ток $I_{и}$ измерительного механизма (ИМ) зависит от термоЭДС, сопротивлений термопары и измерительного механизма. Показания термоэлектрического прибора пропорциональны квадрату действующего значения тока, т. е. шкала прибора неравномерная и имеет квадратичный характер.

ТермоЭДС преобразователя очень мала, поэтому часто применяют термобатареи (рис. 5.7), состоящие из нескольких термопар, что увеличивает чувствительность прибора.



Рис. 5.7. Термобатарея

Недостатками приборов являются большая чувствительность к перегрузкам, ограниченный срок службы термопреобразователей, большое внутреннее потребление электроэнергии, неравномерность шкалы.

5.7. Аналоговые электронные приборы

Электронными измерительными приборами называют приборы, содержащие различные электронные устройства в качестве основных функциональных узлов. Эти приборы применяются для измерений электрических величин на постоянном и переменном токе, в качестве различных источников и преобразователей.

Электронные приборы подразделяются на аналоговые и цифровые. В аналоговых электронных приборах производятся измерения непрерывной величины обычно с помощью прибора магнитоэлектрической системы. В цифровых измерительных приборах измеряемый сигнал преобразуется в электрический код и отображается затем в цифровой форме.

Аналоговые электронные измерительные приборы можно подразделить на четыре основные группы:

- 1) вольтметры, осциллографы, частотомеры, фазометры и т. д.;
- 2) приборы для измерения параметров электрической цепи (измерители сопротивления, емкости, индуктивности, параметров транзисторов, диодов и др.);
- 3) различные источники сигналов, измерительные генераторы;
- 4) элементы измерительных схем [ослабители сигнала (аттенюаторы), делители, фазовращатели и др.].

Рассмотрим кратко принцип действия наиболее широко применяемых электронных аналоговых приборов.

Электронные вольтметры составляют самую обширную группу электронных приборов.

На рис. 5.8 приведена структурная схема электронного вольтметра постоянного тока. Вольтметр состоит из входного устройства, усилителя постоянного тока и магнитоэлектрического измерительного механизма. В качестве входного устройства применяют высокоомный резистивный делитель, с которого сигнал поступает на вход усилителя постоянного тока, предназначенного для увеличения чувствительности прибора. Магнитоэлектрический прибор, обладающий равномерной шкалой и высокой точностью, служит для считывания результата.



Рис. 5.8. Структурная схема электронного вольтметра постоянного тока



Рис. 5.9. Структурная схема электронного вольтметра переменного тока

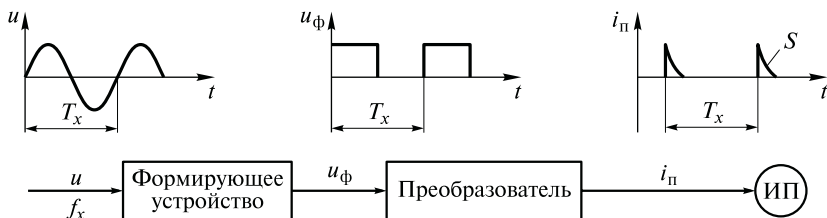


Рис. 5.10. Структурная схема и временные диаграммы электронного частотомера

Электронный вольтметр переменного тока, структурная схема которого показана на рис. 5.9, содержит дополнительный элемент — выпрямитель, так как магнитоэлектрический измерительный механизм работает только в цепи постоянного тока.

Имеется несколько разновидностей электронных вольтметров. Наиболее употребительными являются вольтметры постоянного и переменного тока, универсальные вольтметры, которые позволяют измерять напряжение, ток, сопротивление, частоту и другие величины.

Рассмотрим принцип работы другого электронного аналогового устройства — частотомера, структурная схема которого и временные диаграммы приведены на рис. 5.10. Частотомер состоит из формирующего устройства (ФУ), имеющего большое входное сопротивление. На вход ФУ подается синусоидальное напряжение U неизвестной частоты f_x , которую нужно измерить. Формирующее устройство преобразует синусоидальный входной сигнал в прямоугольные импульсы. В следующем устройстве — преобразователе — прямоугольные импульсы дифференцируются и детектируются (выпрямляются). В результате на выходе преобразователя получаются одинаковые импульсы, различающиеся только расстоянием между ними (периодом T_x). Магнитоэлектрический измерительный прибор (ИП) показывает среднее значение тока I_{cp} , пропорциональное площади импульса S и частоте, т. е.

$$I_{cp} = \frac{S}{T_x} = S f_x.$$

5.8. Цифровые электронные приборы

В цифровых электронных приборах непрерывная (аналоговая) величина преобразуется в дискретную с помощью дискретизации

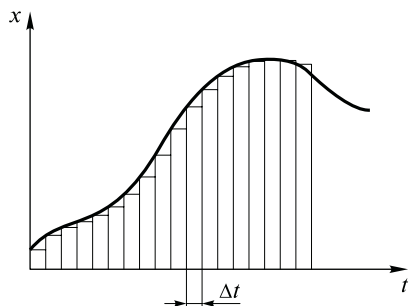


Рис. 5.11. Дискретизация непрерывного сигнала по времени

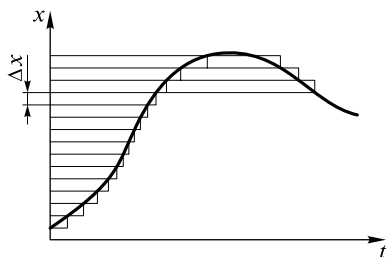


Рис. 5.12. Квантование сигнала по уровню

по времени и квантования по уровню. На рис. 5.11 показана дискретизация непрерывного сигнала по времени с шагом дискретизации Δt , а на рис. 5.12 — квантование по уровню с квантом Δx . С помощью этих операций непрерывный сигнал представляется в виде конечного числа значений.

В процессе дискретизации непрерывная величина $x(t)$ заменяется последовательностью отсчетов $x(t_k)$ с шагом дискретизации $\Delta t = t_{k+1} - t_k$.

В процессе квантования непрерывная величина $x(t)$ заменяется конечным набором ее дискретных значений x_n , отличающихся одно от другого на величину Δx , которая называется шагом квантования.

Устройство, в котором аналоговая величина преобразуется в дискретную, называется аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Различают три типа АЦП: с времяимпульсным преобразованием, частотно-импульсным преобразованием и поразрядным уравниванием.

Рассмотрим принцип работы АЦП с времяимпульсным преобразованием. Этот тип АЦП применяют в цифровых приборах для измерения напряжений, токов, частот и т.д. В его основе лежит преобразование измеряемой величины в интервал времени, заполненный импульсами. Упрощенная структурная схема АЦП показана на рис. 5.13. Измеряемая величина x на входе АЦП преобразуется в первом блоке в интервал времени Δt . Во втором блоке интервал времени Δt преобразуется в последовательность импульсов N (цифровой код). Цифровой код подается на дешифратор, который преобразует его в напряжения, воздействующие на цифровое отсчетное устройство.

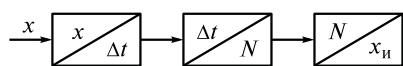


Рис. 5.13. Упрощенная структурная схема АЦП

На рис. 5.14 изображена схема процесса преобразования интервалов времени в цифровой код времяимпульсного АЦП. На один из входов блока формирования

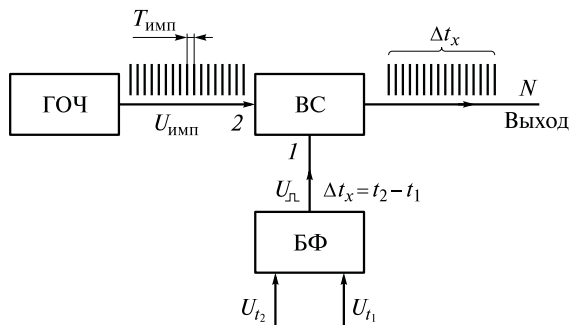


Рис. 5.14. Схема процесса преобразования интервалов времени в цифровой код

(БФ) прямоугольных импульсов поступает импульс U_{11} . С этого момента БФ начинает формировать прямоугольный импульс $U_{л}$ длительностью $\Delta t_x = t_2 - t_1$. Время t_2 определяется подаваемым на второй вход другим коротким импульсом U_{12} , который соответствует измеряемой величине; время t_2 зависит от измеряемой величины, так как АЦП преобразует измеряемую величину во временной интервал. На выходе БФ формируется прямоугольный импульс $U_{л}$ длительностью $\Delta t_x = t_2 - t_1$, который подается на вход I временного селектора (ВС). На вход 2 ВС поступает последовательность коротких стабилизированных импульсов $U_{имп}$ с постоянной частотой следования $f_{имп}$. Эти импульсы вырабатываются генератором образцовой частоты (ГОЧ). Временный селектор пропускает через себя эти импульсы на выход, если на вход I поступает с БФ прямоугольный импульс $U_{л}$. Импульс U_{12} , поступающий на БФ по окончании измерения, дает команду на прекращение выработки прямоугольного импульса $U_{л}$. Сигнал на входе I ВС становится равным нулю, и ВС прекращает поступление импульсов с ГОЧ на выход. Таким образом, к моменту окончания измерения на выходе АЦП формируется временной интервал Δt_x , заполненный импульсами с ГОЧ. Период импульсов ГОЧ $T_{имп}$ выбирается на много меньше Δt_x , что позволяет приблизительно найти

число импульсов N на выходе АЦП:
$$N = \frac{\Delta t_x}{T_{имп}}$$
. Это выражение

показывает, что временной интервал Δt_x пропорционален числу импульсов N на выходе АЦП.

Рассмотрим принцип работы цифрового вольтметра постоянного тока, использующего времяимпульсный АЦП. Структурная схема такого вольтметра показана на рис. 5.15, а.

С блока управления (БУ) на блок формирования (БФ) подается запускающий импульс U_{11} , соответствующий началу измерения, и БФ начинает формировать прямоугольный импульс $U_{л}$. Времен-

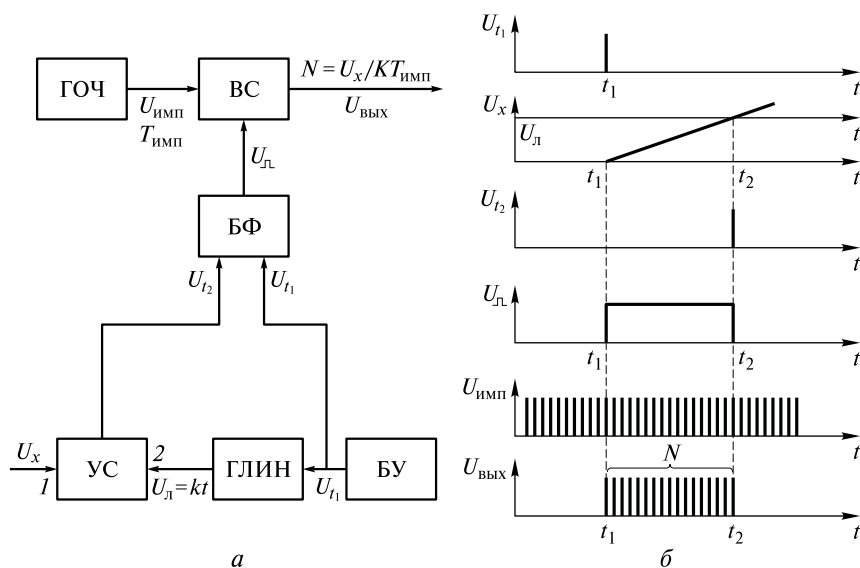


Рис. 5.15. Цифровой вольтметр постоянного тока:
 а — структурная схема; б — временные диаграммы

ной селектор (ВС) открывается, и импульсы генератора образцовой частоты (ГОЧ) поступают на выход АЦП. Одновременно импульсы U_{t1} с выхода БУ поступает на вход генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН), который начинает формировать импульс линейно зависящего от времени напряжения $U_L = kt$, где k — коэффициент пропорциональности; t — время.

Напряжения U_L подается на вход 2 устройства сравнения (УС), а на вход 1 УС поступает измеряемое постоянное напряжение U_x . Выходное напряжение УС U_{t2} будет равно нулю, пока выполняется соотношение $U_L < U_x$ (рис. 5.15, б). Когда линейно нарастающее напряжение U_L достигнет U_x , т.е. $U_L = U_x = k(t_2 - t_1) = k\Delta t_x$, на выходе УС появится импульс U_{t2} . Этот импульс, воздействуя на вход БФ, прекращает формирование прямоугольного импульса U_{t1} , и ВС закрывается для прохождения импульсов с ГОЧ на выход АЦП.

Цифровой код $N \approx \frac{\Delta t_x}{T_{\text{имп}}}$. Выражая Δt_x через U_x , получаем $N \approx \frac{U_x}{kT}$.

В результате измеряемое напряжение U_x на выходе АЦП представляется цифровым кодом N . Далее с помощью дешифратора и цифрового отсчетного устройства считываем результат измерения.

Достоинством цифровых приборов являются малые погрешности измерения (0,1 ... 0,001), высокое быстродействие, возможность сопряжения с ЭВМ для последующей обработки результатов измерения.

К недостаткам цифровых приборов следует отнести сложность конструкции, высокую стоимость и меньшую по сравнению с электромеханическими приборами надежность.

5.9. Измерения тока и напряжения

Ток и напряжение являются основными величинами, характеризующими режим электрической цепи.

Обычно ток измеряют амперметром, включенным последовательно с элементом электрической цепи, в котором измеряется ток. Включение амперметра, имеющего сопротивление R_A , вызывает изменение тока в измеряемой цепи, что приводит к погрешности. Погрешность, возникшая в результате включения приборов, называется методической.

Рассмотрим методическую погрешность при включении амперметра в цепь (рис. 5.16). Ток в цепи при отсутствии амперметра $I_x = U/R$. После включения амперметра ток I становится меньше: $I = U/(R + R_A)$. Относительная погрешность измерения

$$\delta_A = \frac{I - I_x}{I_x} = \frac{\frac{U}{R + R_A} - \frac{U}{R}}{\frac{U}{R}} = -\frac{R_A}{R + R_A} = -\frac{\frac{R_A}{R}}{1 + \frac{R_A}{R}}.$$

Для амперметров $R_A \ll R$, следовательно, $\delta_A = -\frac{R_A}{R} = -\frac{R_A I^2}{R I^2} = -\frac{P_A}{P}$, где P_A — мощность, потребляемая амперметром; P — мощность измеряемого элемента.

Методическая погрешность при измерении тока тем меньше, чем меньше потребляемая амперметром мощность по сравнению с мощностью измеряемой цепи.

Напряжение измеряют вольтметром. Вольтметр подключают параллельно к измеряемой цепи (рис. 5.17). При подключении вольтметра режим электрической цепи также меняется и появляется

методическая погрешность $\delta_V = \frac{U - U_x}{U_x}$, где

U — истинное значение напряжения на измеряемом элементе; U_x — напряжение на зажимах вольтметра. Находя с помощью законов Кирхгофа U и U_x для электрических цепей, показанных на рис. 5.17, б, после преобразования получаем:

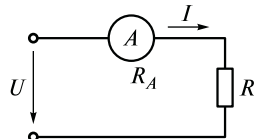


Рис. 5.16. Схема включения амперметра

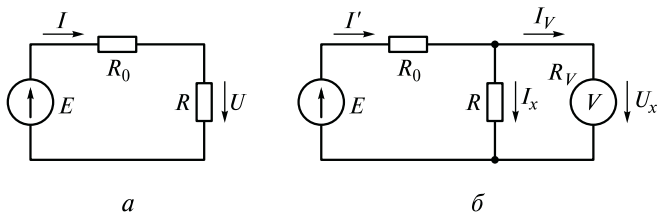


Рис. 5.17. Измерение напряжения:
a — исходная схема; *б* — схема измерений

$$\delta_V = \frac{\frac{R}{R_V}}{1 + \frac{R}{R_V} + \frac{R}{R_0}} \approx -\frac{\frac{R}{R_V}}{1 + \frac{R}{R_0}}$$

Обычно в вольтметре $R \ll R_V$, поэтому отношением R/R_V в знаменателе пренебрегаем.

Методическая погрешность при измерении напряжения тем меньше, чем больше сопротивление вольтметра R_V по сравнению с сопротивлением измеряемой цепи R или чем меньше потребляемая вольтметром мощность по сравнению с мощностью измеряемой цепи.

Электрический ток можно измерять с помощью измерительного резистора $R_{и}$ и вольтметра (рис. 5.18). В этом случае сопротивление $R_{и}$ выбирают много меньше сопротивления измеряемой цепи R , т.е. $R_{и} \ll R$. Измерив напряжение $U_{и}$, находят ток по закону Ома: $I = U_{и}/R_{и}$. Такой метод измерения тока используют при лабораторных исследованиях, в электронных и радиотехнических цепях, в электрических цепях с большими токами. Универсальные электронные приборы (цифровые и аналоговые), в которых предусматривается измерение тока, содержат во входном устройстве измерительный резистор в качестве датчика тока.

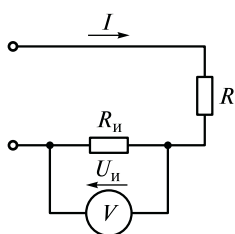


Рис. 5.18. Схема измерения тока с помощью вольтметра и измерительного резистора

Сложнее всего измерять слишком маленькие и, наоборот, слишком большие токи и напряжения. Для измерения малых токов (до 100 мкА) обычно применяют цифровые микроамперметры или гальванометры с электронными усилителями. Переменные токи более 100 мкА можно измерять выпрямительными микроамперметрами, токи в диапазоне от 10 мА до 100 А в частотном диапазоне до десятков килогерц измеряют амперметрами различных систем. При высоких частотах (до сотен мегагерц) для измерений применяют термоэлектрическую систему.

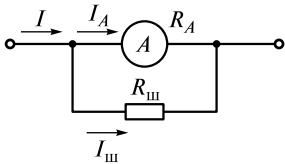


Рис. 5.19. Измерительная схема амперметра с шунтом

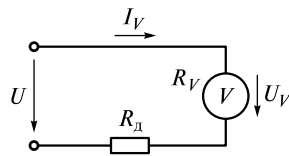


Рис. 5.20. Измерительная схема вольтметра с добавочным резистором

Для измерения больших постоянных токов (более 100 А) применяют амперметры с шунтами. Параллельно амперметру с внутренним сопротивлением R_A включают шунт с сопротивлением $R_{ш}$ (рис. 5.19). Шунт ограничивает ток амперметра I_A , который не должен превышать максимального предела измерений при любом измеряемом токе:

$$I_A = I \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_A},$$

откуда

$$\frac{I}{I_A} = n = \frac{R_{ш} + R_A}{R_{ш}} = 1 + \frac{R_A}{R_{ш}},$$

где n — коэффициент расширения пределов измерения амперметром; $R_{ш}$ — сопротивление шунта, $R_{ш} = \frac{R_A}{n - 1}$.

Для измерения больших переменных токов промышленной частоты используют измерительные трансформаторы тока.

Малые напряжения измеряют с помощью электронных цифровых и аналоговых приборов, компенсаторов, позволяющих измерять постоянные напряжения с большой точностью. Для измерения напряжений более 1000 В применяют как электронные, так и электромеханические приборы с добавочными резисторами и измерительными трансформаторами напряжения.

Предел измерения многих вольтметров можно увеличить с помощью добавочного резистора $R_д$, включенного последовательно с вольтметром (рис. 5.20). Измеряемое напряжение $U = U_V +$

$$+ I_V R_д = U_V + \frac{U R_д}{R_V + R_д}, \text{ откуда } U_V = U - U \frac{R_д}{R_V + R_д} = U \frac{R_V}{R_V + R_д}.$$

Коэффициент расширения пределов измерения вольтметром $m = \frac{U}{U_V} =$

$$= \frac{R_V + R_д}{R_V} = 1 + \frac{R_д}{R_V}.$$

Добавочное сопротивление $R_д = R_V(m - 1)$.

5.10. Измерение электрической мощности и энергии

Мощность в электрических цепях измеряют ваттметром. Обычно для этого применяют ваттметр электродинамической системы. Ваттметр содержит две обмотки: токовую и напряжения, начала которых обозначаются точкой или звездочкой (рис. 5.21). Токовая обмотка I изготавливается из толстого провода и обладает малым внутренним сопротивлением (как амперметр), обмотка напряжения 2 , напротив, содержит большое количество витков из тонкого провода и имеет большое внутреннее сопротивление (как у вольтметра).

В цепи переменного тока для измерения активной мощности ваттметр включают по схеме, изображенной на рис. 5.21. Ваттметр будет показывать активную мощность $P = UI \cos \varphi$, где φ — разность фаз между фазами напряжения и тока.

В трехфазных цепях активную мощность измеряют по методам трех и двух ваттметров. Активная мощность P трехфазной цепи с нулевым проводом определяется суммой показаний всех трех ваттметров (рис. 5.22): $P = P_{w1} + P_{w2} + P_{w3}$. При использовании метода двух ваттметров (рис. 5.23) активная мощность находится как алгебраическая сумма показаний ваттметров: $P = P_{w1} + P_{w2}$. При измерении двумя ваттметрами некоторые показания могут быть отрицательными.

Оба метода измерения активной мощности применимы в симметричных и несимметричных трехфазных цепях.

Реактивная мощность при симметричной нагрузке может быть измерена двумя ваттметрами, также включенными по схеме, показанной на рис. 5.23. При этой схеме реактивная мощность $Q = \sqrt{3}(P_{w1} - P_{w2})$. При несимметричной нагрузке реактивную мощность измеряют с помощью двух или трех ваттметров, включенных по специальным схемам.

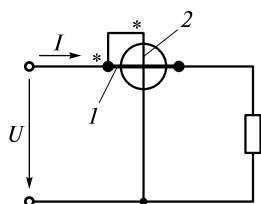


Рис. 5.21. Схема включения ваттметра:

I — токовая обмотка; 2 — обмотка напряжения

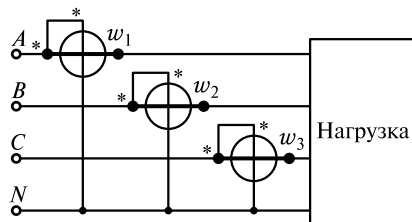


Рис. 5.22. Схема измерения активной мощности по методу трех ваттметров

Полную мощность S измеряют с помощью вольтметра и амперметра. В однофазной цепи переменного тока $S = UI$, в трехфазной цепи $S = \sqrt{3} UI$, где U и I — линейные напряжение и ток.

В цепях постоянного тока для измерения мощности обычно пользуются методом амперметра—вольтметра. Потребляемая цепью мощность $P = UI$.

Электрическую энергию измеряют с помощью индукционных счетчиков. Обычно счетчики включают по таким же схемам, что и ваттметры. В однофазных цепях ведется учет только активной энергии, поэтому реактивную энергию в этих цепях не измеряют.

В трехфазных цепях измеряют активную и реактивную энергии. Для этого применяют трехфазные электрические счетчики. Принцип действия этих счетчиков такой же, как и однофазных, но в одном корпусе объединены три счетчика.

Для контроля потребляемой энергии выпускают электронные многофункциональные счетчики, позволяющие измерять одновременно основные электрические величины: активную и реактивную энергии; активную, реактивную и полную мощности; коэффициент мощности; частоту; ток; напряжение и т. д. Эти приборы содержат микропроцессор, память и позволяют автоматизировать контроль и учет электрической энергии в автоматизированной системе контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ).

5.11. Измерение сопротивлений, индуктивностей, емкостей

Все электротехнические устройства обладают электрическим сопротивлением. Условно сопротивления электротехнических устройств можно разделить на малые (до 1 Ом), средние (от 1 до $1 \cdot 10^5$ Ом) и большие (более $1 \cdot 10^5$ Ом). Наиболее просто измерять средние сопротивления. Для этого применяют методы амперметра—вольтметра и омметра.

Метод амперметра—вольтметра — косвенный метод измерения сопротивлений, который базируется на законе Ома. Реализуют его с помощью двух схем, отличающихся подключением вольтметра. В обеих схемах нужно учитывать погрешность из-за наличия сопротивлений вольтметра R_V и амперметра R_A .

При методе омметра схема измерения содержит магнитоэлектрический измерительный механизм (ИМ) и добавочный резистор R_d (рис. 5.24). Ток в цепи I определяется выражением

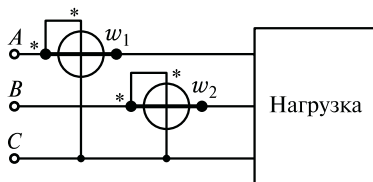


Рис. 5.23. Схема измерения активной мощности по методу двух ваттметров

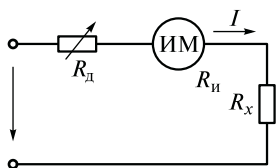


Рис. 5.24. Схема измерения сопротивления по методу омметра

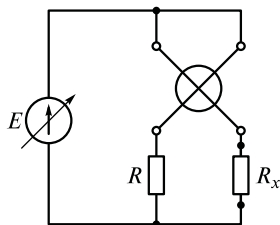


Рис. 5.25. Схема мегомметра

$$I = \frac{U}{R_d + R_и + R_x}$$
. Угол отклонения стрелки α пропорционален току

$\alpha = SI$, где S — чувствительность измерительного механизма. Из

выражения $\alpha = SI = S \frac{U}{R_d + R_и + R_x}$ следует, что шкала прибора,

проградуированная в единицах сопротивления, нелинейная. Конечное положение стрелки соответствует $R_x = 0$, а начальное — $R_x \rightarrow \infty$.

Омметры удобны и просты в эксплуатации, но имеют значительную погрешность. В настоящее время широкое применение находят цифровые универсальные приборы — мультиметры, которыми можно измерять различные электрические величины, в том числе и сопротивления.

Большие сопротивления обычно измеряют с помощью омметров, содержащих логометрические измерительные механизмы. Такие приборы называются мегомметрами (рис. 5.25). Мегомметры не требуют установки нуля, как омметры, а в качестве источника питания содержат небольшие генераторы напряжением 500 или 1000 В.

Малые сопротивления измеряют методом амперметра— вольтметра или мостовым методом. Мостовой метод предусматривает применение специальных измерительных мостов. Измерительный мост содержит в плечах регулируемые резисторы R_2 , R_3 , R_4 и измеряемое сопротивление R_x (рис. 5.26). В диагональ моста включают нуль-индикатор (НИ), выполняемый обычно на базе магнитоэлектрического гальванометра.

Изменяя сопротивления плеч R_2 , R_3 , R_4 , уравнивают мост, т. е. добиваются положения, когда НИ показывает нуль. В уравновешенном мосте $R_x R_4 = R_2 R_3$. Так как R_2 , R_3 , R_4 — известные сопротивления моста, то R_x можно найти по формуле $R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4}$.

Для точного измерения сопротивлений применяют компенсационный метод. Его целесообразно использовать для средних и

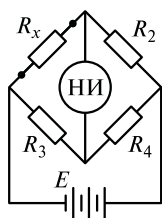


Рис. 5.26. Мостовая схема

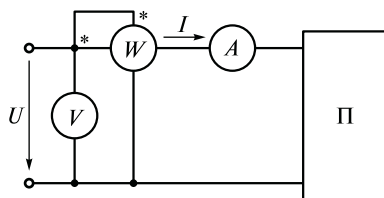


Рис. 5.27. Схема измерения индуктивности и емкости по методу амперметра—вольтметра—ваттметра

малых сопротивлений. Компенсационный метод позволяет измерять сопротивления с точностью 0,02 %.

Для измерения индуктивностей и емкостей в электрических устройствах широко применяется метод амперметра—вольтметра—ваттметра (рис. 5.27). Сначала измеряют ток I , напряжение U и мощность P . Затем вычисляют активное сопротивление приемника

$R = \frac{P}{I^2}$, полное сопротивление приемника $Z = \frac{U}{I}$, реактивное сопротивление приемника $X = \sqrt{Z^2 - R^2}$.

Для определения индуктивности пользуются $L = X_L/\omega$, емкости находят $C = 1/(\omega X_C)$.

5.12. Измерение неэлектрических величин

Общие принципы измерения. Для измерения неэлектрических величин широко применяются электроизмерительные приборы. Они удобны в эксплуатации, позволяют проводить дистанционные измерения и автоматизировать технологические процессы. Процесс измерения неэлектрических величин может быть представлен схемой, показанной на рис. 5.28. Неэлектрическая величина X поступает на вход преобразователя. В преобразователе X преобразуется в электрический сигнал $Y(X)$. Этот сигнал поступает в электрическую измерительную цепь, в которой он преобразуется в другой более удобный для измерения электрический сигнал Y , который поступает на выходное измерительное устройство.



Рис. 5.28. Схема процесса измерения неэлектрических величин

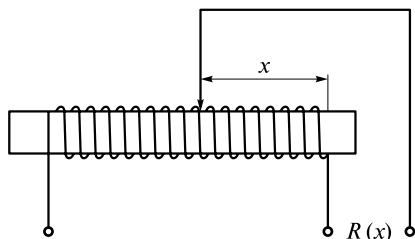


Рис. 5.29. Схема резистивного преобразователя

По принципу действия преобразователи подразделяют на параметрические и генераторные.

В параметрических преобразователях измеряемая величина преобразуется в какой-нибудь параметр электрической цепи — сопротивление R , индуктивность L или емкость C . В генераторных преобразователях измеряемая величина вызывает появление ЭДС.

В качестве выходного измерительного устройства применяют аналоговое или цифровое устройство. Промежуточный блок обычно содержит мостовые или компенсационные схемы, позволяющие привести электрический сигнал, получаемый с выхода преобразователя, к удобному для измерения виду.

Преобразователи неэлектрических величин. Резистивные преобразователи (рис. 5.29) относятся к параметрическим, у которых под воздействием механических величин изменяются сопротивления. Различают реостатные преобразователи, тензорезисторы, пьезорезисторы. Резистивные преобразователи, изменяя свое сопротивление, вызывают изменение тока или напряжения пропорционально измеряемой величине. Появившееся напряжение или ток воздействует на измерительное устройство, шкала которого проградуирована в единицах измеряемой величины.

Резистивные преобразователи широко применяются для измерения механических перемещений, давления, силы, уровня жидкости.

Принцип работы *индуктивных преобразователей* основан на изменении индуктивности электромагнитной катушки в зависимости от сопротивления магнитной цепи.

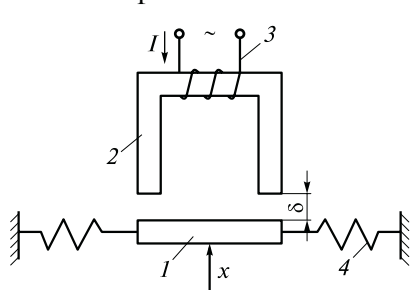


Рис. 5.30. Схема индуктивного преобразователя:

1 — якорь; 2 — магнитопровод; 3 — катушка; 4 — пружина

(рис. 5.30) изменяются зазор δ и магнитное сопротивление магнитопровода 2, что вызывает изменение индуктивности катушки 3 и тока I . Ток катушки будет зависеть от линейного перемещения x , т. е. $I=f(x)$. Пружина 4 служит для создания противодействующей силы.

Индуктивные преобразователи применяют для измерения линейных и угловых перемещений, механических усилий, давлений.

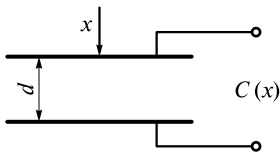


Рис. 5.31. Схема емкостного преобразователя

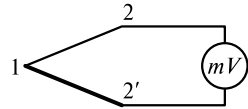


Рис. 5.32. Схема термоэлектрического преобразователя

Принцип работы *емкостного преобразователя* основан на зависимости емкости конденсатора от расстояния между пластинами. При изменении линейного перемещения x изменяется d (рис. 5.31), а следовательно, и C . На выходе преобразователя получается зависимость $C(x)$.

Емкостные преобразователи применяются для измерения перемещений, уровней жидкостей, давления.

Термоэлектрические преобразователи (преобразователи генераторного типа) широко применяются для измерений температуры. Действия этих преобразователей основано на возникновении ЭДС при нагреве или охлаждении спая из двух различных проводников 1—2 и 1—2' (термопары) (рис. 5.32). Соединение электродов в точке 1 называется рабочей точкой. Температура точек 2 и 2' поддерживается постоянной. Из-за разницы температур в точках 2 и 1, 2' и 1 в контуре возникает ЭДС, которую измеряют милливольтметром (mV). Обычно эта ЭДС небольшая, поэтому для ее измерения применяют предварительное усиление либо используют компенсационные методы.

Контрольные вопросы

1. Какие устройства относятся к электротехническим?
2. Что называется прямыми измерениями?
3. Что такое косвенные измерения?
4. Назовите погрешности измерения.
5. Что такое класс точности прибора?
6. Назовите основные характеристики измерительных приборов.
7. В чем отличие аналоговых измерительных приборов от цифровых?
8. Назовите основные конструктивные элементы электромеханических измерительных приборов.
9. Объясните устройство, назначение, основные достоинства и недостатки приборов магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической, электростатической и индукционной систем.
10. Что собой представляют электронные аналоговые приборы?
11. Объясните основной принцип работы цифровых электронных приборов.

12. Назовите основные схемы измерения тока и напряжения.
13. Что такое методическая погрешность?
14. Как измеряется мощность в цепях постоянного, переменного и трехфазного токов?
15. Назовите основные методы измерений сопротивлений, индуктивностей, емкостей.
16. В чем заключается принцип измерения неэлектрических величин?

Темы рефератов

1. Области применения цифровых измерительных приборов.
2. Основные особенности электронных аналоговых приборов и области их применения.
3. Применение информационно-измерительных комплексов.
4. Измерение высоких напряжений и больших токов.

6.1. Типы, назначение, устройство и принцип действия

Трансформатор — статический электромагнитный аппарат, служащий для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток той же частоты, но другого напряжения.

Потребность трансформирования — повышения и понижения переменного напряжения — вызвана необходимостью передачи электрической энергии на большие расстояния. Чем выше напряжение, тем при равной мощности источника энергии меньше ток. Следовательно, для передачи энергии требуются провода меньшего сечения, что приводит к значительной экономии цветных металлов, из которых изготавливаются провода линий электропередачи. Потери электрической энергии в проводах также уменьшаются с уменьшением тока. При передаче электрической энергии от электростанций к потребителям происходит многократное повышение и понижение напряжения.

По назначению трансформаторы можно разделить на следующие типы:

силовые одно- и трехфазные трансформаторы номинальной мощностью от нескольких единиц до 1 млн кВ·А и напряжением до 1250 кВ — используются в сетях для распределения электроэнергии. К силовым относятся и трансформаторы малой мощности от 10 до 300 В·А, применяемые в устройствах радиотехники, промышленной электроники и автоматики. По способу охлаждения силовые трансформаторы подразделяются на масляные и воздушные;

автотрансформаторы — используются для изменения (регулирования) напряжения, имеют, как правило, плавную регулировку выходного напряжения;

измерительные трансформаторы — применяются в качестве элементов измерительных устройств;

трансформаторы специального назначения — применяются в конкретных электротехнических устройствах для различных целей. Примерами могут служить сварочные трансформаторы для различных видов сварки, импульсные трансформаторы для преобразования высокочастотных импульсных периодически повторяющихся сигналов в радиолокационной технике и телевидении.

Конструктивное исполнение и электромагнитные процессы, происходящие в трансформаторах различных типов, имеют много

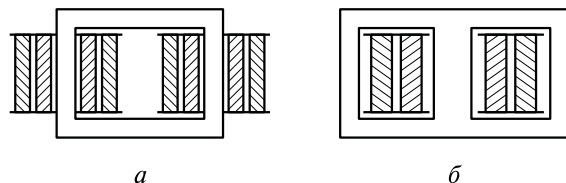


Рис. 6.1. Расположение обмоток однофазных трансформаторов со стержневым (а) и броневым (б) магнитопроводами

общего. Поэтому для изучения их работы рассмотрим однофазный двухобмоточный трансформатор.

Трансформатор состоит из обмоток и магнитопровода — стального сердечника, набранного из листов электрической стали толщиной 0,35...0,5 мм для уменьшения потерь от вихревых токов. Листы сердечника покрываются лаком для изоляции друг от друга. Части магнитопровода, на которых располагаются обмотки, называются стержнями. Части магнитопровода, замыкающие стержни, называются ярмом. Трансформатор имеет не менее двух обмоток, связанных между собой общим магнитным потоком. Обмотки электрически изолированы друг от друга; исключением в этом отношении являются автотрансформаторы, у которых обмотка низшего напряжения является частью обмотки высшего напряжения.

Однофазные трансформаторы по форме магнитопровода подразделяются на стержневые и броневые (рис. 6.1). У маломощных трансформаторов сечение стержней выполняется прямоугольным, у мощных — близким к круглому.

Обмотка трансформатора, соединенная с источником электроэнергии, называется первичной (рис. 6.2). Соответственно первичными именуются все величины, относящиеся к этой обмотке: число витков w_1 , напряжение u_1 , сила тока i_1 и т.д. Обмотка, соединенная с нагрузкой, называется вторичной, относящиеся к

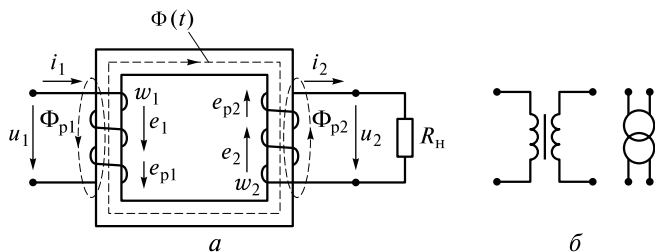


Рис. 6.2. Электромагнитная схема (а) и условные обозначения (б) однофазного двухобмоточного трансформатора

ней величины также называются вторичными (w_2, u_2, i_2). У некоторых трансформаторов может быть несколько вторичных обмоток, питающих разные цепи.

Под действием подведенного переменного напряжения в первичной обмотке возникает ток i_1 и возбуждается изменяющийся магнитный поток. Этот магнитный поток индуцирует в первичной обмотке трансформатора ЭДС самоиндукции e_1 , а во вторичной обмотке — ЭДС взаимной индукции e_2 . ЭДС e_2 создает напряжение u_2 на выходных зажимах трансформатора. При замыкании вторичной цепи на нагрузку возникает ток i_2 , который образует собственный магнитный поток, накладывающийся на поток первичной обмотки. В результате создается общий поток Φ . Стрелки направления напряжения u_1 и тока i_1 представляют первичную обмотку как приемник энергии. Положительное направление потока Φ связано с током i_1 правилом правого винта. Стрелки направления e_2 и i_2 соответствуют представлению вторичной обмотки источником энергии. Силовые линии магнитного поля замыкаются как по сердечнику, так и по воздуху вокруг витков обмоток, создавая магнитные потоки рассеяния Φ_{p1} и Φ_{p2} , которые, в свою очередь, наводят в первичной и вторичной обмотках ЭДС рассеяния e_{p1} и e_{p2} .

Для идеализированного трансформатора, у которого потоки рассеяния и активные сопротивления обмоток пренебрежимо малы, $u_1 = -e_1$; $u_2 = e_2$, откуда $U_{1m} = E_{1m}$; $U_{2m} = E_{2m}$.

$$\text{В случае если } u_1 = U_{1m} \sin \omega t, \text{ то } \Phi(t) = \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \text{ где } \Phi_m = \frac{U_{1m}}{\omega_1 \omega}.$$

Таким образом, при синусоидальном входном напряжении u_1 магнитный поток в сердечнике $\Phi(t)$ также синусоидален и отстает от напряжения на угол $\pi/2$. Поток $\Phi(t)$ индуцирует в обмотках синусоидальные ЭДС, мгновенные значения которых $e_1 = E_{1m} \sin(\omega t - \pi)$, $e_2 = E_{2m} \sin(\omega t - \pi)$, где $E_{1m} = \omega_1 \omega \Phi_m$; $E_{2m} = \omega_2 \omega \Phi_m$.

Из этих выражений видно, что e_1 и e_2 отстают от Φ на угол $\pi/2$, а от u_1 — на угол π .

Действующие значения синусоидальных ЭДС обмоток

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \omega_1 \Phi_m = 4,44 f \omega_1 \Phi_m, \quad E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \omega_2 \Phi_m = 4,44 f \omega_2 \Phi_m.$$

Коэффициент трансформации

$$n = \frac{E_{1m}}{E_{2m}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}.$$

6.2. Анализ работы ненагруженного трансформатора

Режим работы ненагруженного трансформатора, называемый режимом холостого хода, возникает при разомкнутой вторичной обмотке, когда $I_2 = 0$.

По показаниям измерительных приборов в режиме холостого хода определяются потери в стали сердечника от гистерезиса и вихревых токов при переменном намагничивании, ток холостого хода и коэффициент трансформации.

Уравнения для обмоток при холостом ходе имеют вид

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1(R_1 + jX_1); \quad \underline{U}_2 = \underline{E}_2,$$

где X_1 — индуктивное сопротивление первичной обмотки, обусловленное потоком рассеяния, $X_1 = \omega L_{p1}$.

Векторная диаграмма, иллюстрирующая электрическое состояние нагруженного трансформатора (в режиме холостого хода), показана на рис. 6.3. Она строится следующим образом. За исходный вектор, откладываемый горизонтально, принимается вектор магнитного потока Φ , одинаковый для обеих обмоток. Векторы, соответствующие комплексам действующих значений ЭДС обмоток, отстают от Φ на $\pi/2$. Вектор комплекса действующего значения тока первичной обмотки \underline{I}_{1x} опережает Φ на угол магнитного запаздывания (потерь) δ , обусловленный наличием гистерезиса в ферромагнитном материале сердечника.

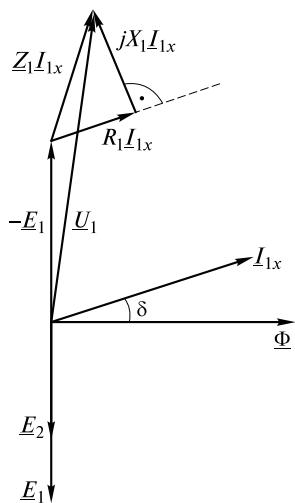


Рис. 6.3. Векторная диаграмма ненагруженного трансформатора

Рис. 6.3. Векторная диаграмма ненагруженного трансформатора

6.3. Приведение обмоток трансформатора

Коэффициент трансформации трансформаторов относительно велик. При анализе их работы на векторной диаграмме трудно изобразить в одном масштабе первичное и вторичное напряжения. Поэтому осуществляют приведение вторичной обмотки к числу витков первичной, т.е. при построении диаграммы и расчетах заменяют реальный трансформатор с коэффициентом трансформации w_1/w_2 приведенным трансформатором, у которого коэффициент трансформации равен 1.

Приведение не должно изменить режим первичной цепи, а во вторичной цепи должны сохраниться неизменными энерги-

тические условия, т.е. активная и реактивная мощности и их распределение между отдельными элементами вторичной цепи. Приведенные величины обозначаются штрихом сверху: E'_2 ; I'_2 ; R'_2 и т.д.

$$\text{Поскольку } E_1 = nE_2 = \frac{w_1}{w_2} E_2, \text{ то } E'_2 = nE_2 = \frac{w_1}{w_2} E_2 = E_1.$$

В таком же отношении при приведении изменяются вторичное напряжение и падение напряжения во вторичной обмотке:

$$U'_2 = nU_2; \quad I'_2 R'_2 = nI_2 R_2; \quad I'_2 X'_2 = nI_2 X_2.$$

При приведении тока не должна измениться намагничивающая сила вторичной обмотки, чтобы не изменился магнитный поток в сердечнике:

$$I_2 w_2 = I'_2 w_1, \text{ откуда } I'_2 = I_2 \frac{w_2}{w_1} = \frac{I_2}{n}.$$

При приведении не должна изменяться полная мощность вторичной цепи $S_2 = U_2 I_2 = U'_2 I'_2 = nU_2 I'_2$, откуда также следует $I'_2 = \frac{I_2}{n} = \frac{w_2}{w_1} I_2$.

Из условия неизменности активной мощности можно получить выражение для приведенного активного сопротивления вторичной обмотки

$$I_2^2 R_2 = I_2'^2 R_2' = \frac{I_2^2}{n^2} R_2', \text{ откуда } R_2' = n^2 R_2 = (w_1/w_2)^2 R_2.$$

Из условия неизменности реактивной мощности можно получить выражение для приведенного реактивного сопротивления вторичной обмотки

$$I_2^2 X_2 = I_2'^2 X_2' = \frac{I_2^2}{n^2} X_2', \text{ откуда } X_2' = n^2 X_2 = (w_1/w_2)^2 X_2.$$

6.4. Анализ работы нагруженного трансформатора

Для приведенного трансформатора имеем следующие характеризующие его состояние уравнения:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + I_1(R_1 + jX_1); & \underline{E}'_2 &= \underline{U}'_2 + I'_2(R'_2 + jX'_2); \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_{1x} - \underline{I}'_2. \end{aligned}$$

Предположим, что нагрузка трансформатора имеет активно-индуктивный характер, т.е. $\underline{Z}_н = R_н + jX_н$.

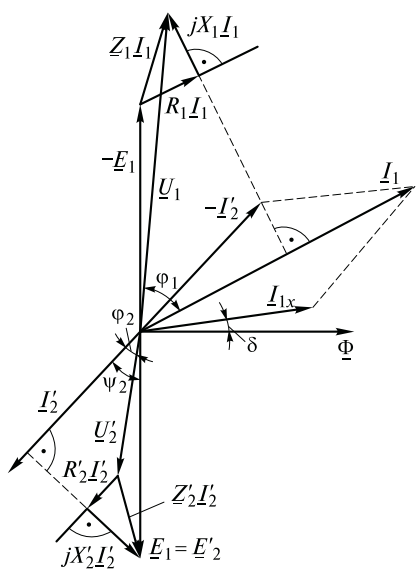


Рис. 6.4. Векторная диаграмма нагруженного трансформатора

Тогда напряжение вторичной обмотки $\underline{U}'_2 = \underline{I}'_2 \underline{Z}'_H = \underline{I}'_2 (R'_H + jX'_H)$.

Электрическое состояние нагруженного трансформатора удобнее всего анализировать с помощью векторной диаграммы (рис. 6.4). Построение векторной диаграммы нагруженного трансформатора начинаем с вектора магнитного потока Φ , как первопричины физических процессов в трансформаторе. Векторы ЭДС обмоток отстают от Φ на угол $\pi/2$. Вектор тока \underline{I}'_2 отстает от ЭДС \underline{E}'_2 на угол $\psi_2 = \arctg \frac{X'_H + X'_2}{R'_H + R'_2}$. Пристраиваем к вектору \underline{E}'_2 вектор $-\underline{I}'_2 (R'_2 + jX'_2)$ и находим вектор \underline{U}'_2 , который опережает вектор

тока \underline{I}'_2 на угол $\varphi_2 = \arctg \frac{X'_H}{R'_H}$. Вектор тока \underline{I}_1 отстает от вектора напряжения \underline{U}_1 на угол φ_1 .

Строим вектор тока холостого хода первичной обмотки \underline{I}_{1x} , который опережает вектор Φ на угол магнитного запаздывания (потерь) δ , обусловленный наличием гистерезиса в ферромагнитном материале сердечника. Далее строим вектор тока первичной обмотки $\underline{I}_1 = \underline{I}_{1x} - \underline{I}'_2$, а затем вектор напряжения первичной обмотки $\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 (R_1 + jX_1)$.

6.5. Схемы замещения трансформатора

Исследование работы трансформатора значительно упрощается, если реальный трансформатор заменить эквивалентной электрической схемой замещения, в которой магнитная связь между обмотками заменена электрической. Используют T-образную схему замещения.

Выделим в первичной и вторичной обмотках активные сопротивления обмоток R_1, R'_2 и индуктивные сопротивления X_1, X'_2 , определяемые потоками рассеяния (рис. 6.5). Так как в приведенном трансформаторе $\underline{E}_1 = \underline{E}'_2$, то точки a и a' , b и b' имеют одинаковые потенциалы и их можно соединить, не вызывая перераспределения токов в катушках. Так как магнитный поток в сердце-

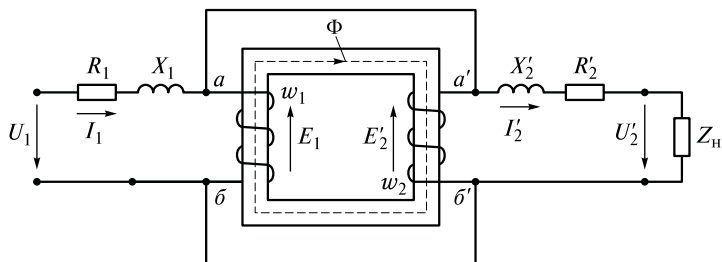


Рис. 6.5. Эквивалентная схема замещения трансформатора

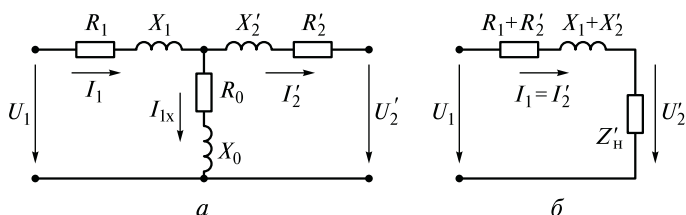


Рис. 6.6. Т-образная (а) и упрощенная (б) схемы замещения трансформатора

чнике практически не зависит от нагрузки, то обмотки w_1 и w_2 можно на основании уравнения намагничивающих сил заменить одной обмоткой с током холостого хода I_{1x} , а ее, в свою очередь, представить некоторыми эквивалентными активным и индуктивным сопротивлениями R_0 , X_0 (рис. 6.6, а).

Для многих практических расчетов величиной тока холостого хода пренебрегают и от Т-образной схемы замещения переходят к упрощенной (рис. 6.6, б).

6.6. Опыты холостого хода и короткого замыкания

Для определения ряда величин, характеризующих работу трансформатора, используют опыты холостого хода и короткого замыкания.

Схема включения приборов при опыте холостого хода представлена на рис. 6.7, а. В процессе опыта измеряют U_1 , U_2 , I_{1x} , P_0 при изменении U_1 от 0 до $U_{1н}$.

В данном опыте определяют:

коэффициент трансформации n . По показаниям вольтметров, пренебрегая падением напряжения в первичной обмотке $I_{1x}Z_1$, контролируют номинальное напряжение первичной обмотки и

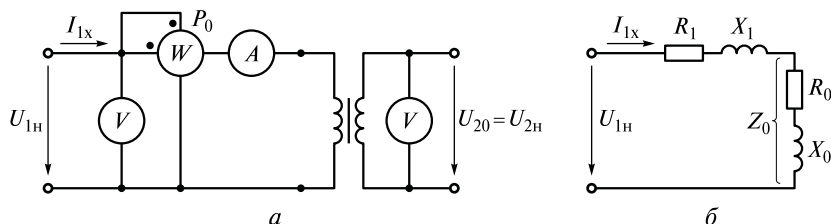


Рис. 6.7. Схема включения измерительных приборов (а) и схема замещения трансформатора (б) при опыте холостого хода

замеряют соответствующее напряжение вторичной обмотки. Коэффициент трансформации подсчитывают по формуле

$$n = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = \frac{U_{1H}}{U_{20}},$$

где U_{1H} , U_{2H} — номинальные значения напряжений обмоток, соответствующие номинальному (расчетному) режиму работы трансформатора;

ток холостого хода I_{1x} . Этот ток, измеренный амперметром, обычно выражают в процентах от номинального тока первичной обмотки

$$I_x = \frac{I_{1x}}{I_{1H}} 100;$$

потери в стали сердечника от гистерезиса. Мощность P_0 , потребляемая трансформатором из сети и измеряемая ваттметром, расходуется на покрытие потерь в первичной обмотке трансформатора: $P_0 = I_{1x}^2 R_0$. В реальных трансформаторах $R_1 \ll R_0$; $X_1 \ll X_0$, поэтому показание ваттметра P_0 соответствует мощности потерь в стали магнитопровода;

параметры контура схемы замещения (рис. 6.7, б)

$$Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{1x}}, \quad R_0 = \frac{P_0}{I_{1x}^2}, \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2};$$

коэффициент мощности холостого хода $\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{I_{1x} U_{1H}}$;

угол магнитных потерь $\delta = 90^\circ - \varphi_0$.

Опыт короткого замыкания проводится при понижении первичного напряжения трансформатора до величины $U_{1к}$, при которой токи в обмотках равны номинальным (рис. 6.8, а).

При опыте короткого замыкания (так как он проводится при пониженном напряжении) потери в стали на гистерезис незначительны и ими пренебрегают. Считается, что вся мощность, по-

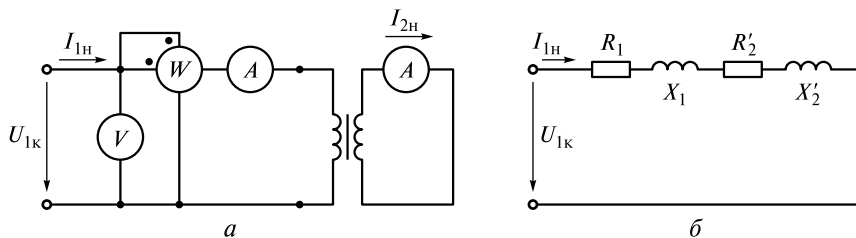


Рис. 6.8. Схема включения измерительных приборов (а) и схема замещения трансформатора (б) при опыте короткого замыкания

требляемая из сети, расходуется в сопротивлениях первичной и вторичной обмоток R_1 и R'_2 .

В этом опыте определяют:

потери в обмотках P_k при номинальных токах (ваттметром);
 параметры схемы замещения (рис. 6.8, б)

$$Z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1н}} = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}; \quad R_k = R_1 + R'_2; \quad X_k = X_1 + X'_2; \quad R_k = \frac{P_k}{I_{1н}^2};$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2};$$

полное падение напряжения короткого замыкания (в процентах)

$$U_k = \frac{U_{1к}}{U_H} 100 = \frac{I_{1н} Z_k}{U_H} 100.$$

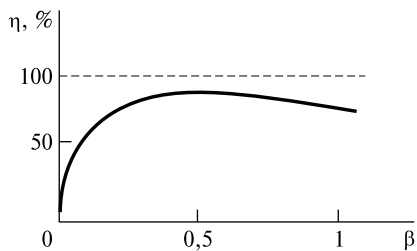
Величина U_k (в процентах) позволяет рассчитать ток короткого замыкания трансформатора в условиях эксплуатации. В этих условиях режим короткого замыкания является аварийным, возникающим из-за ошибок персонала подстанции, пробоя изоляции и т. д.

При коротком замыкании во вторичной цепи токи I_1 и I_2 резко возрастают. Установившееся значение тока короткого замыкания в первичной обмотке

$$I_{1к} = \frac{U_{1н}}{Z_{1к}} = \frac{100}{U_k} I_{1н}.$$

6.7. Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициент полезного действия трансформатора определяется отношением активной мощности вторичной обмотки к активной мощности первичной обмотки



$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_3 + P_c} = \frac{P_2}{P_2 + P_k + P_0} = \frac{P_2}{P_2 + I_{1H}^2 R_k + P_0}$$

Рис. 6.9. Зависимость КПД трансформатора от нагрузки

где $P_3 = P_k$; P_c — потери в стали, $P_c = P_0$.

Введем понятие коэффициента номинальной нагрузки

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1H}} \approx \frac{I_2}{I_{2H}}$$

Тогда $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \frac{I_{2H}}{I_{2H}} = \beta S_H \cos \varphi_2$; $I_1^2 R_k \frac{I_{1H}^2}{I_{1H}^2} = \beta^2 P_k$.

Окончательное выражение для определения КПД принимает вид

$$\eta = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_k + P_0}$$

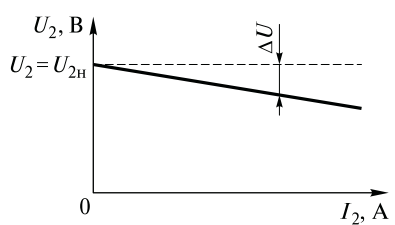
Таким образом, КПД зависит от нагрузки трансформатора $\eta = f(\beta)$ (рис. 6.9).

У реального трансформатора η имеет максимум при $\beta \approx 0,5$ и может достигать 99 %.

6.8. Внешняя характеристика трансформатора

Зависимость вторичного напряжения U_2 трансформатора от тока вторичной обмотки I_2 при $U_1 = \text{const}$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$ называется внешней характеристикой трансформатора (рис. 6.10).

Изменение вторичного напряжения ΔU определяется выражениями



$$\Delta U = \frac{U_{2H} - U_2}{U_{2H}} 100;$$

Рис. 6.10. Внешняя характеристика трансформатора

$$\Delta U = \frac{U'_{2н} - U'_2}{U'_{2н}} 100 = \frac{U_1 - U'_2}{U_1} 100;$$

$$\Delta U \approx \beta (U_a \cos \varphi_2 + U_p \sin \varphi_2).$$

6.9. Трехфазные трансформаторы

Трансформирование электроэнергии трехфазного тока можно осуществить тремя однофазными трансформаторами или одним трехфазным. На каждом из трех стержней трехфазного трансформатора размещаются две обмотки (первичная и вторичная), принадлежащие одной фазе (рис. 6.11).

Начала первичных обмоток обозначают большими буквами A, B, C , а концы — X, Y, Z ; начала вторичных обмоток обозначают малыми буквами a, b, c , концы — x, y, z .

Физические процессы, происходящие в каждой фазе трехфазного трансформатора, ничем не отличаются от физических процессов в однофазном трансформаторе, и, следовательно, векторная диаграмма однофазного трансформатора может рассматриваться как диаграмма одной фазы трехфазного трансформатора.

Обмотки трехфазных трансформаторов могут соединяться звездой или треугольником. Такие соединения условно обозначаются символами \star и \triangle . Если соединенная звездой обмотка имеет выведенную нейтральную точку, то к символу звезды добавляется нижний индекс 0 (\star_0). Обозначение схемы соединений обмоток трансформатора имеет вид дроби, в числителе которой указан способ соединения первичной обмотки, а в знаменателе — вторичной. Например, обозначение \star_0/\triangle говорит о том, что первичная обмотка соединена звездой с выводом нейтрали, а вторичная обмотка — треугольником.

Чтобы условно обозначить угол сдвига фаз между одноименными векторами линейных напряжений первичных и вторичных обмоток, принято деление трансформаторов по группам соединения обмоток. Для обозначения группы соединения трехфазного трансформатора положение векторов линейных напряжений первичной и вторичной обмоток сопоставляют с положением стрелок часов. Вектор линейного напряжения первичной обмотки совмещают с минутной стрелкой, когда она стоит на цифре 12, а вектор линейного напряжения вторичной обмотки — с часовой

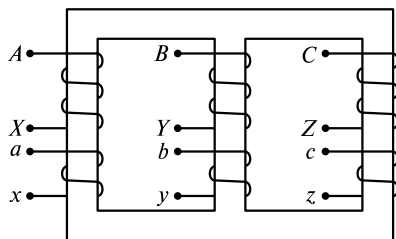


Рис. 6.11. Расположение обмоток трехфазного трансформатора

стрелкой, положение которой определяет номер группы (1, 2, 3, ..., 12).

Схемы соединений звездой и треугольником могут иметь 12 различных групп со сдвигом фаз линейных напряжений от 0 до 330° через каждые 30°. Большое разнообразие групп соединений не удобно для эксплуатации, поэтому государственный стандарт ограничивает число различных схем и групп соединений тремя: $\triangle/\triangle_0 - 0$ (наиболее распространенное соединение); $\triangle/\triangle - 11$; $\triangle_0/\triangle - 11$.

Числа 0 и 11 указывают на группу соединения обмоток трансформаторов, сдвиг фаз которых составляет соответственно 0 и 330°.

Коэффициент трансформации трехфазного трансформатора при соединении \triangle/\triangle вычисляется как отношение линейных напряжений, при соединении $\triangle/\triangle -$ как отношение фазных напряжений.

6.10. Параллельная работа трансформаторов

Для обеспечения более экономичной и надежной работы системы распределения энергии на подстанциях размещают несколько силовых трансформаторов. При выходе из строя одного трансформатора оставшиеся несут нагрузку потребителей. При снижении нагрузки, некоторые трансформаторы отключают, чтобы остальные работали в режиме, близком к номинальному, с максимальным КПД. При параллельной работе одноименные зажимы разных трансформаторов подключаются к одной и той же фазе сети.

Условия совместимости параллельной работы трансформаторов проще рассмотреть на примере однофазных трансформаторов $T1$ и $T2$, используя схему их включения (рис. 6.12, а) и эквивалентную схему (рис. 6.12, б).

При $E_1 \neq E_2$ в цепи будет уравнительный ток $I_{ур} = \frac{E_1 - E_2}{Z_{1к} + Z_{2к}}$ даже при отсутствии нагрузки.

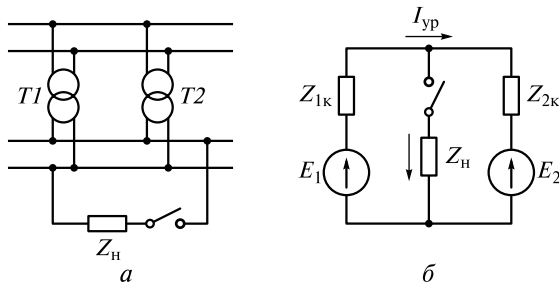


Рис. 6.12. Схема включения (а) и эквивалентная схема (б) двух параллельно включенных трансформаторов

По обобщенному закону Ома при подключенной нагрузке

$$I_1 = \frac{E_1 - U_H}{Z_{1к}}, \quad I_2 = \frac{E_2 - U_H}{Z_{2к}}.$$

При $E_1 = E_2$: $\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_{2к}}{Z_{1к}}$, но $Z_{1к} = \frac{U_{1к} U_H^2}{S_{1н} \cdot 100}$ и $Z_{2к} = \frac{U_{2к} U_H^2}{S_{2н} \cdot 100}$.

Следовательно $\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_{2к}}{U_{1к}} \frac{S_{1н}}{S_{2н}}$.

При равенстве номинальных мощностей в трехфазных трансформаторах ($S_{1н} = S_{2н}$) их токи нагрузки будут обратно пропорциональны напряжению короткого замыкания. Поэтому для правильного распределения нагрузки между трансформаторами $T1$ и $T2$ необходимо обеспечить:

одинаковый коэффициент трансформации (с погрешностью не более $\pm 0,5\%$);

равенство напряжений короткого замыкания (с погрешностью не более $\pm 10\%$);

одинаковые группы соединений.

6.11. Автотрансформаторы

В отличие от силовых двухобмоточных трансформаторов автотрансформаторы имеют одну обмотку для высокого и низкого напряжений. При этом обмотка низкого напряжения является частью обмотки высокого напряжения. Поэтому обмотки имеют не только магнитную связь, но и гальваническую, следовательно, энергия тоже передается двумя путями — через гальваническую связь и через магнитную. Схема однофазного понижающего автотрансформатора изображена на рис. 6.13.

Высокое напряжение U_1 подведено к обмотке, имеющей w_1 витков. Часть этой обмотки (w_2 витков) — обмотка низкого напряжения. При разомкнутой вторичной обмотке устанавливается ток холостого хода, равный $I_{1х}$. Этот ток создает магнитодвижущую силу (МДС) $I_{1х} w_1$, которая индуцирует ЭДС в первичной и вторичной обмотках автотрансформатора по закону электромагнитной индукции ($E = 4,44 f w_i \Phi_m$). При этом коэффициент трансформации автотрансформатора $n = E_1/E_2 = w_1/w_2 \approx I_2/I_1$, т.е. равен коэффициенту трансформации обычного трансформатора.

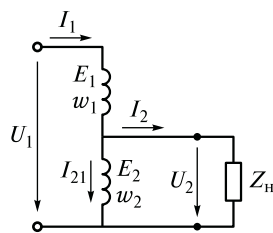


Рис. 6.13. Схема однофазного понижающего автотрансформатора

При включении нагрузки во вторичной цепи протекает ток I_2 , который создает МДС. Магнитный поток в сердечнике становится равным $w_2 I_2 = (w_2 - w_1) I_1$. Отсюда $I_2 = (1 - n) I_1$. Как видно из последнего выражения, ток в общей части обмотки значительно меньше, поскольку автотрансформаторы обычно имеют коэффициент трансформации $1 < n < 3$. Поэтому при изготовлении автотрансформаторов затрачивается меньше ферромагнитного металла и проводов.

Автотрансформаторы применяют в качестве силовых устройств при передаче электрической энергии, для пуска мощных электрических двигателей и регулирования напряжения. По условиям техники безопасности нельзя применять трансформаторы, у которых первичное напряжение относится к категории высоких напряжений, а вторичное — к категории низких. Потери энергии в автотрансформаторах меньше, чем в двухобмоточных трансформаторах, и, следовательно, автотрансформаторы обладают бóльшим КПД.

6.12. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы применяются для измерений в сетях высокого напряжения, защиты персонала от опасных напряжений и токов и для расширения пределов измерения стандартных приборов. Существует два типа измерительных трансформаторов: трансформаторы напряжения (ТН) и трансформаторы тока (ТТ).

Трансформаторы напряжения служат для подключения вольтметров, электрических счетчиков энергии, различного рода реле и других приборов. Трансформаторы напряжения изготавливают таким образом, что вторичная обмотка имеет номинальное напряжение 100 В при любом номинальном напряжении первичной обмотки. Показания вольтметра умножают на коэффициент трансформации или градуируют прибор на измеряемое напряжение. Трансформаторы напряжения работают в режиме близком к холостому ходу и имеют классы точности 0,5; 1,0; 3,0.

Трансформаторы тока служат для подключения амперметров, электрических счетчиков энергии, различного рода реле и других приборов. Первичная обмотка трансформатора тока включается последовательно с нагрузкой, а во вторичную обмотку включается амперметр. Номинальный ток вторичной обмотки имеет значение 5 А при любом номинальном токе первичной обмотки. Так как внутреннее сопротивление амперметра мало, то трансформатор тока работает в режиме, близком к короткому замыканию. При нормальной работе трансформатора тока магнитодвижущая сила равна разности МДС обмоток ($I_1 w_1 - I_2 w_2$), а при размыкании вторичной обмотки МДС резко увеличивается, возрастают потери, трансфор-

матор перегревается и, кроме того, возникают опасные напряжения, достигающие нескольких сотен вольт. Поэтому вторичную обмотку трансформатора тока нельзя оставлять разомкнутой.

Трансформаторы тока имеют классы точности 0,2; 0,5; 1,0; 3,0; 10,0.

Контрольные вопросы

1. Опишите устройство трансформатора.
2. На каком законе основан принцип действия трансформатора?
3. От каких параметров зависит ЭДС вторичной обмотки трансформатора?
4. Назовите источники потерь энергии в трансформаторе при холостом ходе.
5. Какой схемой замещения представляется трансформатор при холостом ходе?
6. Как зависят ток первичной обмотки и магнитный поток в магнитопроводе трансформатора от нагрузки трансформатора?
7. Для чего приводят параметры вторичной обмотки к первичной?
8. Как рассчитывают приведенные ток, напряжение, ЭДС и сопротивления?
9. Как определяются параметры схемы замещения трансформатора?
10. Постройте и поясните векторную диаграмму приведенного трансформатора.
11. При каких токах и напряжениях проводятся опыты холостого хода и короткого замыкания?
12. Как определяют мощность потерь энергии в сердечнике и обмотках трансформатора?
13. Почему уменьшается напряжение вторичной обмотки трансформатора при увеличении тока нагрузки?
14. Какую зависимость называют внешней характеристикой трансформатора?
15. Как определяется КПД трансформатора и от чего он зависит?
16. При какой нагрузке трансформатор имеет максимальный КПД и как определить эту нагрузку?
17. Как устроен трехфазный трансформатор?
18. Какие способы соединения и группы соединения приняты для трехфазных трансформаторов?
19. В чем преимущество автотрансформатора по сравнению с двухобмоточным трансформатором?
20. Каково назначение измерительных трансформаторов?

Темы рефератов

1. Нагруженный трансформатор. Анализ работы, схема замещения, измерения параметров.
2. Экспериментальное определение параметров трансформатора в режиме холостого хода.

7.1. Назначение и классификация

Электрические машины представляют собой устройства, в которых электрическая энергия, поступающая из сети, превращается в механическую энергию вращения вала электрического двигателя. Другой вид электрических машин — генераторы — превращают механическую энергию (турбины, дизельного двигателя, ветра и т.д.) в электрическую энергию, которая затем поступает в электрическую сеть или потребляется на месте.

К электрическим машинам относятся также устройства с вращающимся валом, которые применяются для специальных целей (преобразователи, усилители, компенсаторы и т.д.).

Работа электрических машин существенно зависит от вида электрического тока, потребляемого или вырабатываемого данной машиной.

Электрические машины подразделяются на электрические машины постоянного и переменного тока. В свою очередь, электрические машины переменного тока подразделяются на однофазные и трехфазные, синхронные и асинхронные. Приведенная классификация электрических машин одинаково применима как к генераторам, так и к двигателям.

7.2. Конструкция электрических машин и свойство обратимости

В любых электрических машинах постоянного и переменного тока можно выделить неподвижную часть, называемую статором, и подвижную часть, называемую ротором. На рис. 7.1 изображена машина постоянного тока. Статор и ротор изготавливаются из специальной магнитной стали, причем ротор для всех машин набирается из пластин, а статор изготавливается в виде пакета пластин только для машин переменного тока. На статор и ротор наматывают электрические обмотки, по которым протекает электрический ток. Вал ротора закреплен на подшипниках для уменьшения потерь при вращении. С помощью специальных муфт он соединяется с механическим устройством.

По конструкции генератор и двигатель незначительно отличаются друг от друга. Электрические машины обратимы, т.е. одна и

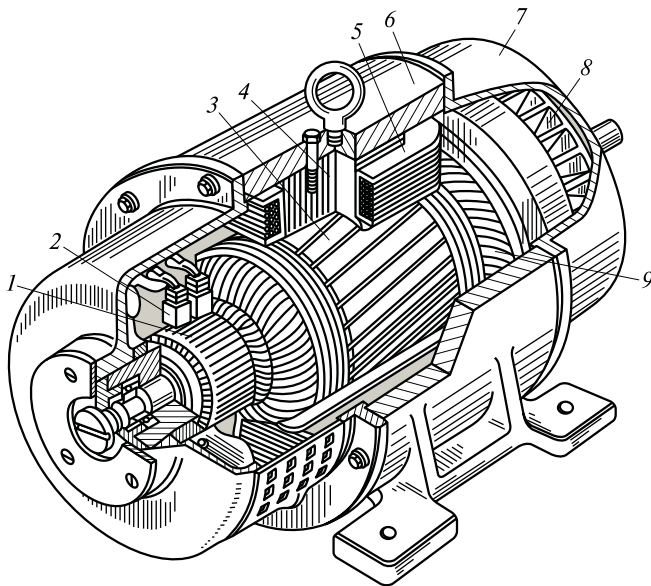


Рис. 7.1. Устройство машины постоянного тока:

1 — коллектор; 2 — щетка; 3 — сердечник якоря; 4 — сердечник главного полюса; 5 — полюсная катушка; 6 — статор; 7 — подшипниковый щит; 8 — вентилятор; 9 — обмотка якоря

та же машина может работать и как генератор, и как двигатель. Это не означает, что любой двигатель можно использовать в качестве генератора. Обычно машины проектируют и используют либо как двигатель, либо как генератор. А свойство обратимости говорит о том, что во время работы двигатель может перейти в генераторный режим и, наоборот, генератор может начать работать в двигательном режиме.

Существует ряд машин, которые используют как в двигательном, так и в генераторном режиме, например стартер-генераторы.

7.3. Генераторы постоянного тока

Назначение и принцип действия генератора постоянного тока.

Генераторы постоянного тока предназначены для производства электрической энергии постоянного тока. Они применяются в качестве автономных источников питания, сварочных генераторов, для питания двигателей постоянного тока, используемых в машиностроении, металлургии, в системах автоматики.

Принцип действия генератора основан на появлении ЭДС в рамке, вращающейся в магнитном поле (рис. 7.2). Соединим зажимы *a*

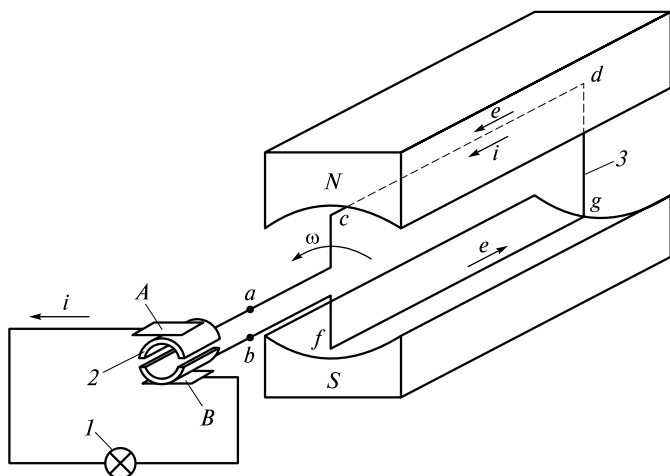


Рис. 7.2. Принцип работы генератора постоянного тока:
 1 — лампа; 2 — коллектор; 3 — рамка; A, B — щетки

и b рамки 3 с разрезанным медным кольцом (коллектором) 2, по которому скользят щетки A и B . Предположим, что рамка и кольцо образуют жесткую механическую систему, закрепленную на подшипниках, которая может вращаться в магнитном поле постоянного магнита с полюсами N и S . При вращении рамки с угловой частотой ω в проводниках $c-d$ и $f-g$ рамки будет возникать ЭДС индукции e . Направление ЭДС можно определить по правилу правой руки (см. подразд. 3.1). Направление тока в проводниках рамки (если цепь замкнута) будет совпадать с направлением ЭДС.

В положении, показанном на рис. 7.2, ток i протекает от точки d к точке c проводника $c-d$. Как только рамка повернется на 180° и проводник $c-d$ займет положение проводника $f-g$, ток в нем поменяет свое направление и будет протекать от c к d .

Электродвижущая сила рамки будет изменяться по синусоидальному закону: $e = E_m \sin \omega t$ (рис. 7.3), где E_m — амплитуда ЭДС.

Угловая частота $\omega = \frac{2\pi}{60} n$, где n — частота вращения рамки, об/мин.

Синусоидальным будет и напряжение на зажимах a и b рамки u_{ab} . Напряжение на щетках u_{AB} будет иметь вид выпрямленной синусоиды (рис. 7.3). Таким образом, разрезанное медное кольцо (коллектор) 2 выпрямляет синусоидальный ток (через лампу 1 течет выпрямленный ток). Коллектор играет роль механического выпрямителя переменного тока, индуцируемого в рамке.

Устройство. Основными частями генератора постоянного тока являются статор (неподвижная часть) и ротор (подвижная часть).

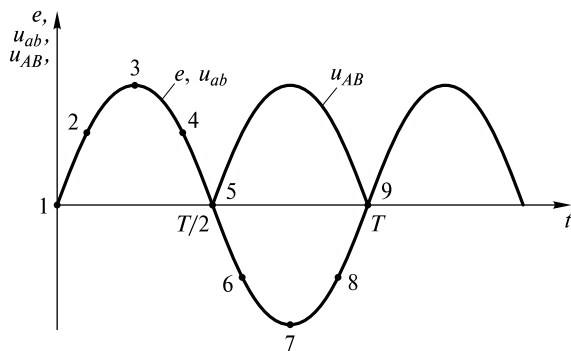


Рис. 7.3. Напряжение на щетках генератора:

1, 2, ..., 9 — точки на кривой u_{ab}

Статор состоит из станины 1 (рис. 7.4), к которой с внутренней стороны крепятся главные полюсы 2. На каждый главный полюс помещают катушки 3 обмотки возбуждения, которые соединяют последовательно. Обмотку возбуждения подключают к отдельному источнику постоянного тока или параллельно обмотке якоря (в таком случае генератор называется динамо-машиной). Для более равномерного распределения магнитного поля в воздушном зазоре главные полюсы имеют наконечники 4. Станину вместе с главными полюсами и наконечниками изготавливают из ферромагнитного материала. Вместе с обмоткой возбуждения они образуют систему, которая называется индуктор. Индуктор создает постоянное магнитное поле, силовые линии которого замыкаются через главные полюсы, наконечники, якорь и станину. Обычно ста-

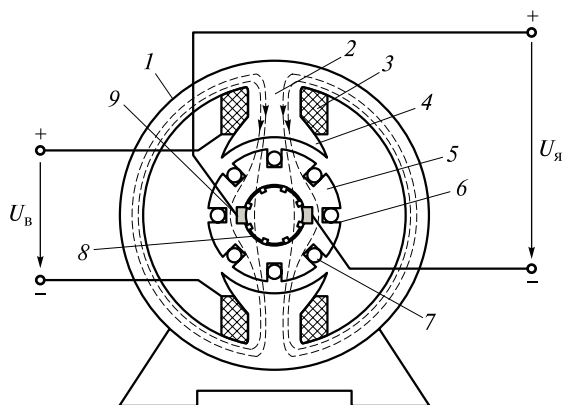


Рис. 7.4. Конструктивная схема генератора постоянного тока:

1 — станина; 2 — полюс; 3 — катушка обмотки возбуждения; 4 — полюсные наконечники; 5 — якорь; 6 — паз; 7 — обмотка якоря; 8 — коллектор; 9 — щетка

нина машин постоянного тока выполняется из сплошного материала, в то время как полюсы и особенно полюсные наконечники изготавливаются из листовой магнитной стали (в виде пакета пластин).

Подвижную часть машин постоянного тока — ротор — обычно называют якорем. Якорь 5 представляет собой цилиндр, собранный из листовой магнитной стали. В цилиндре имеются пазы 6, куда закладывается обмотка якоря 7. На рис. 7.4 обмотка якоря показана в виде проводников. Проводники образуют витки, которые объединяются в секции. Каждая секция соединяется с коллекторными пластинами коллектора 8. Коллектор является частью ротора и представляет собой цилиндр, состоящий из медных пластин, которые изолированы друг от друга. К каждой пластине коллектора подсоединяются два конца секций якоря. С помощью неподвижных щеток 9 осуществляется электрический контакт с обмоткой вращающегося якоря. Напряжение на щетках U_y является выходным напряжением генератора, к которому подключают нагрузку (двигатели, сварочные аппараты, электромагниты и т.д.)

При вращении якоря проводники его обмотки пересекают силовые линии магнитного поля, созданного индуктором, и в этих проводниках появляется ЭДС индукции. Напряжение на щетках якоря (выходное напряжение) складывается из ЭДС отдельных проводников, образующих секции.

Конструкции генераторов и двигателей постоянного тока в основном одинаковы, но ротор генератора приводится во вращение от постороннего двигателя (дизеля, турбины, асинхронного двигателя и т.д.), а ротор двигателя

вращается под действием электромагнитного момента, который порождается токами возбуждения и якоря, потребляемыми из сети.

Конструкция обмотки якоря и ЭДС якоря. При вращении рамки в постоянном магнитном поле (см. рис. 7.2) индуцируемая в рамке ЭДС изменяется по синусоидальному закону: $e = E_m \sin \omega t$ (см. рис. 7.3). Выделим на кривой $e(t)$ точки 1, 2, ..., 9, сдвинутые по времени друг от друга на $T/8$. Каждой отмеченной на графике точке соответствует определенное положение рамки. Представим схематично все эти положения в виде положений катушки с зажимами a, b , (рис. 7.5).

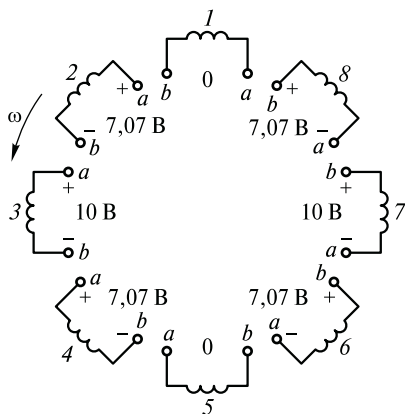
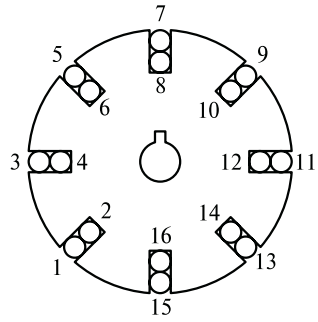


Рис. 7.5. Схема, поясняющая конструкцию якорной обмотки:

1, 2, ..., 8 — положения катушки при вращении якоря; a, b — зажимы катушки

Рис. 7.6. Проводники обмотки якоря:

1, 2, ..., 16 — номера проводников в пазах якоря



Для простоты рассуждений примем $E_m = 10$ В, тогда $e = 10 \sin \omega t$. Мгновенное значение ЭДС в точке 1 будет равно $e_1 = 10 \sin \omega \cdot 0 = 0$ ($t_1 = 0$), в точке 2 — $e_2 = 10 \sin \frac{2\pi T}{8} = 7,07$ В, в точке 3 — $e_3 = 10 \sin \frac{2\pi 2T}{8} = 10$ В и т.д.

На рис. 7.5 указаны мгновенные значения ЭДС для каждого момента времени (для каждого положения рамки).

Допустим, что якорь имеет восемь пазов и в каждом пазу уложены два проводника (рис. 7.6): четные проводники находятся внутри, нечетные — у поверхности паза. Эти 16 проводников образуют восемь катушек, расположенных так же, как показано на рис. 7.5. Вся эта система катушек вращается с частотой ω . Соединим все катушки в такой последовательности: $1 \rightarrow 10 \rightarrow 3 \rightarrow 12 \rightarrow 5 \rightarrow 14 \rightarrow 7 \rightarrow 16 \rightarrow 9 \rightarrow 2 \rightarrow 11 \rightarrow 4 \rightarrow 13 \rightarrow 6 \rightarrow 15 \rightarrow 8 \rightarrow 1$.

В результате получим замкнутый контур (рис. 7.7), в котором алгебраическая сумма ЭДС будет равна нулю, т.е. $\sum e = 0 + 7 + 10 + 7 + 0 - 7 - 10 - 7 = 0$. Так как $\sum e = 0$, то и ток в этом контуре будет равен нулю. Поместим на вал коллектор, состоящий из восьми пластин, и каждую пластину соединим с перемычкой между катушками (см. рис. 7.7). Контурная ЭДС $\sum e = 0$, следовательно, токи по-прежнему будут отсутствовать. Через щетки, которые скользят по коллектору, осуществляется электрический контакт с якорем.

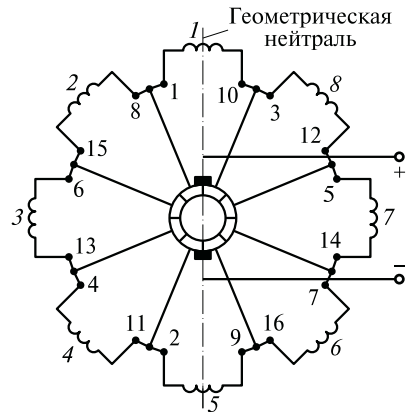


Рис. 7.7. Схема соединения якорной обмотки:

1, 2, ..., 8 — номера катушек; 8—1, 10—3, ..., 6—15 — соединения проводников якоря с коллектором

Щетки, оставаясь неподвижными, замыкают накоротко две соседние пластины коллектора, поэтому щетки располагают у катушек с наименьшей ЭДС (на геометрической нейтрали). Геометрическая нейтраль проходит через катушки 1 и 5 и перпендикулярна главным полюсам.

В катушках 1 и 5 ЭДС индукции будет всегда равна нулю и, следовательно, токи коммутации будут минимальными. Приведенная выше последовательность соединения проводников в пазах якоря (1 → 10 → 3 → 12 и т.д.) соответствует петлевой обмотке. Кроме петлевых обмоток в якорях машин постоянного тока используют однослойные и многослойные волновые обмотки.

Электродвижущая сила индукции, наводимая в проводнике, пересекающем магнитное поле (см. рис. 3.1), может быть найдена по формуле $e = Blv$, где B — индукция магнитного поля в зазоре; l — длина проводника; v — скорость движения проводника.

Машины постоянного тока изготавливают таким образом, чтобы индукция B в каждой точке зазора была одинаковой. Обычно находят среднее значение индукции в зазоре $B_{cp} = \Phi/S$, где Φ — поток, создаваемый в зазоре обмоткой возбуждения; S — площадь, которую пронизывает этот поток. Площадь примерно равна поверхности якоря между парами полюсов, т.е.

$$S = l\tau = l \frac{\pi D}{2p},$$

где τ — полюсное деление, $\tau = \frac{\pi D}{2p}$; D — диаметр якоря; p — число пар полюсов.

Линейная скорость якоря

$$v = \Omega \frac{D}{2} = \frac{2\pi}{60} \frac{D}{2} n = \frac{\pi D}{60} n,$$

где Ω — угловая скорость вращения якоря; n — частота вращения якоря, мин⁻¹.

Щетки делят обмотку якоря на две части, которые относительно щеток соединены параллельно. Число параллельных обмоток относительно щеток обозначают $2a$. Для петлевой обмотки a всегда равно p .

Подставляя в формулу для ЭДС B_{cp} , v и $N_{я}$ — число проводников обмотки якоря, получаем выражение для ЭДС якоря

$$E = B_{cp} l v N_{я} = \frac{p N_{я}}{a 60} n \Phi = C_e n \Phi,$$

где C_e — постоянная для данной машины, $C_e = \frac{p N_{я}}{a \cdot 60}$.

Таким образом, ЭДС зависит от частоты вращения якоря и магнитного потока.

Электромагнитный момент генератора. В магнитном поле индуктора при вращении якоря на проводник с током I действует электромагнитная сила $F = BI$, где B — индукция в зазоре; l — длина проводника.

Всего обмотка якоря содержит $N_{я}$ проводников, которые включены последовательно в секции. Секции относительно щеток подключаются параллельно и содержат $2a$ параллельных ветвей. Следовательно, ток в проводнике $I = \frac{I_{я}}{2a}$, где $I_{я}$ — ток якоря. Электромагнитная сила, действующая на якорь, содержащий $N_{я}$ проводников, $F = Bl \frac{I_{я}}{2a} N_{я}$.

Электромагнитный момент $M_{эм}$, действующий на якорь, связан с силой F выражением $M_{эм} = F \frac{D}{2}$, где D — диаметр якоря.

Окончательное выражение для электромагнитного момента имеет вид

$$M_{эм} = B_{ср} l \frac{I_{я}}{2a} N_{я} \frac{D}{2} = \frac{N_{я} p}{2\pi a} \Phi I_{я} = C_M \Phi I_{я},$$

где C_M — коэффициент, постоянный для данного генератора.

Электромагнитный момент генератора постоянного тока зависит от магнитного потока индуктора и тока якоря. Если поток Φ постоянный (ток возбуждения постоянный), то момент зависит только от тока якоря: $M_{эм} = C_M \Phi I_{я} = k_M I_{я}$, где k_M — постоянная генератора.

Уравнение генератора постоянного тока. Обмотка возбуждения генератора, служащая для создания потока индуктора Φ , подключается к источнику постоянного тока с напряжением U_B (см. рис. 7.4). Ротор (якорь) генератора приводится во вращение постоянным (внешним) устройством (дизельный, паровой, гидравлический двигатель и т. д.). В обмотке якоря наводится ЭДС индукции $E = C_E \Phi n$. Эквивалентная схема генератора показана на рис. 7.8. При включении в обмотку якоря нагрузки R_H в ней будет протекать ток $I_{я}$. Напряжение на выходе генератора $U_H = E - R_{я} I_{я}$, а ток

$$I_{я} = \frac{E - U_H}{R_{я}} = \frac{C_E \Phi n}{R_{я}},$$

где $R_{я}$ — сопротивление обмотки якоря.

Реакция якоря и способы улучшения коммутации на коллекторе. Магнитный поток индуктора, создаваемый током возбуждения I_B , пронизывает якорь в направлении

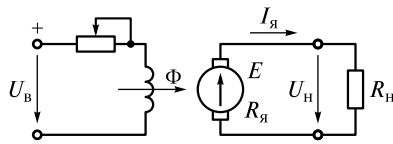


Рис. 7.8. Эквивалентная схема генератора постоянного тока

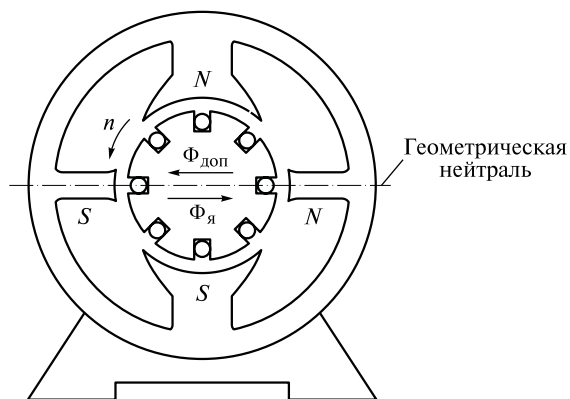


Рис. 7.9. Направление потоков якоря и дополнительных полюсов

от северного полюса N к южному S (см. рис. 7.4). Такое распределение силовых линий имеет место пока нет тока в якоре (цепь якоря разомкнута). При подключении к цепи якоря нагрузки R_n появляется ток якоря $I_я$, который создает новый магнитный поток якоря $\Phi_я$. Направление потока $\Phi_я$ будет совпадать с геометрической нейтралью (рис. 7.9). Магнитный поток $\Phi_я$ деформирует магнитное поле, создаваемое индуктором, в результате положение геометрической нейтрали смещается. Расположение щеток становится неоптимальным, и происходит искрение коллектора.

Чтобы улучшить условия коммутации на коллекторе в магнитную систему статора добавляют дополнительные магнитные полюса с обмоткой, соединенной последовательно с обмоткой якоря (см. рис. 7.9). Ток якоря, протекая также и по обмоткам дополнительных полюсов, создает поток $\Phi_{доп}$, который направлен встречно $\Phi_я$. Поток дополнительных полюсов $\Phi_{доп}$ компенсирует поток $\Phi_я$, и в результате положение геометрической нейтрали машины остается неизменным, а следовательно, остаются благоприятными условия коммутации, искрение будет незначительным.

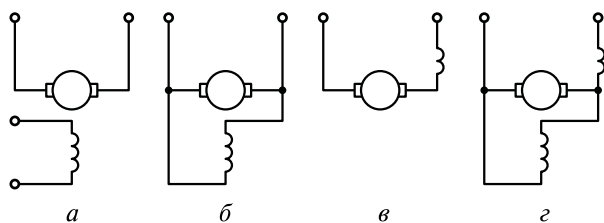


Рис. 7.10. Обозначения на электрических схемах генераторов постоянного тока независимого (а), параллельного (б), последовательного (в) и смешанного (г) возбуждения

Виды генераторов постоянного тока и их характеристики. Свойства генераторов постоянного тока существенно зависят от способа их возбуждения. Различают генераторы независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения (рис. 7.10).

Обычно обмотки машин независимого и параллельного возбуждения выполняются из тонкого провода и содержат большое число витков. Эти обмотки обладают большой индуктивностью, что необходимо учитывать при отключении питания. Обмотки машин последовательного возбуждения содержат малое число витков и выполнены из провода с большой площадью сечения. Индуктивность таких обмоток невелика.

Генераторы постоянного тока характеризуются зависимостью выходного напряжения U от тока нагрузки I . Такая зависимость называется внешней характеристикой. Вид этой характеристики зависит от способа возбуждения. На рис. 7.11 показаны внешние характеристики генераторов постоянного тока с разными способами возбуждения.

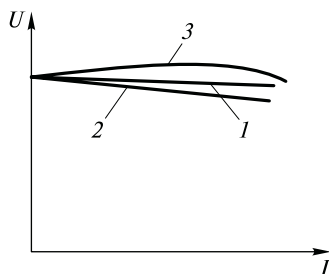


Рис. 7.11. Внешние характеристики генераторов постоянного тока:

- 1 — независимое возбуждение;
- 2 — параллельное;
- 3 — смешанное

7.4. Двигатели постоянного тока

Устройство, принцип действия и уравнения двигателей. Конструкция двигателя постоянного тока аналогична конструкции генераторов постоянного тока. Статор с главными полюсами и обмоткой возбуждения создает магнитное поле индуктора. Обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного напряжения. Якорь также содержит обмотку, по которой протекает ток, потребляемый из сети. Ток якоря взаимодействует с магнитным потоком индуктора, в результате образуется электромагнитный момент, который и вращает ротор двигателя. Электромагнитный момент двигателя $M_{эм}$ определяется по той же формуле, что и для генератора: $M_{эм} = C_m \Phi I_{я}$. Конечно, направление $M_{эм}$ у двигателя противоположно направлению у генератора, так как направление тока $I_{я}$ также изменяется на обратное.

На рис. 7.12 приведена эквивалентная схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения. В обмотке якоря наводится ЭДС индукции. Для ЭДС якоря двигателя справедлива та же формула, что и для ЭДС генератора: $E = C_E \Phi n$.

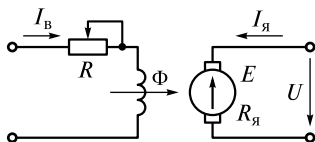


Рис. 7.12. Эквивалентная схема двигателя независимого возбуждения

Напряжение сети $U = E + R_я I_я$. Отсюда ток якоря $I_я = \frac{U - E}{R_я}$, частота вращения двигателя $n = \frac{U - R_я I_я}{C_E \Phi}$.

Типы двигателей. Конструкция индукторов в двигателях постоянного тока аналогична конструкции индукторов в генераторах постоянного тока. По способу возбуждения двигатели также подразделяют на четыре типа: независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. Обмотки возбуждения изображаются на схемах так же, как у генераторов (см. рис. 7.10).

Двигатели постоянного тока независимо от способа возбуждения описываются одними и теми же приведенными выше уравнениями для ЭДС якоря, электромагнитного момента двигателя, тока якоря, частоты вращения вала двигателя. На основе этих уравнений можно проанализировать характеристики двигателей разных типов возбуждения.

Основные характеристики двигателей. Для анализа режимов работы двигателей постоянного тока целесообразно знать: ЭДС якоря E ; напряжение U ; ток якоря $I_я$; электромагнитный момент якоря $M_{эм}$; частоту вращения якоря n . Все эти величины связаны уравнениями, приведенными выше. Как и все формулы, эти уравнения являются идеализированными, поэтому часто работу двигателей постоянного тока анализируют с помощью различных характеристик. Для двигателей наиболее важными являются:

механическая характеристика $n = f(M)$, представляющая зависимость частоты вращения якоря от момента на валу;

рабочие характеристики, представляющие собой зависимости частоты вращения n , момента M , тока $I_я$ и КПД η от мощности на валу двигателя P_2 .

На рис. 7.13 изображена механическая характеристика двигателя независимого возбуждения при разном напряжении источника питания. Эта характеристика представляет собой ряд параллельных линий, зависящих от приложенного напряжения. Плавно изменяя напряжение источника питания, можно также плавно регулировать

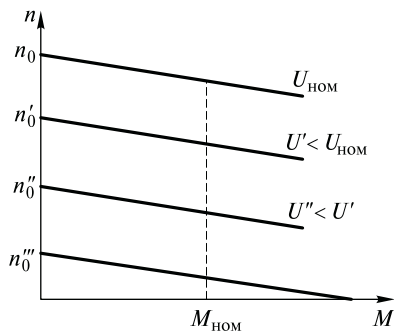


Рис. 7.13. Механическая характеристика двигателя независимого возбуждения

частоту вращения двигателя независимого возбуждения. Данный двигатель имеет наилучшие возможности для регулирования частоты вращения, но для этого требуется регулируемый источник питания.

Механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения (рис. 7.14, кривая 1) такая же, как и у двигателя независимого возбуждения, но идет несколько круче. У двигателя последовательного возбуждения при малых нагрузках ($M \rightarrow 0$) частота вращения резко возрастает и возможен «разнос» двигателя, приводящий к поломке механической части. Поэтому такие режимы должны быть исключены.

Рабочие характеристики двигателей постоянного тока позволяют выбрать наиболее оптимальные зоны работы двигателя. На рис. 7.15 приведены рабочие характеристики двигателя независимого возбуждения. Такие же примерно рабочие характеристики имеет и двигатель параллельного возбуждения.

Анализируя рабочие характеристики, замечаем, что максимум КПД соответствует не номинальной мощности $P_{2ном}$, а несколько меньшей.

Обычно максимум КПД соответствует $(0,65 \dots 0,7) P_{2ном}$. Такой принцип конструирования характерен для всех типов электродвигателей, в том числе и переменного тока.

Двигатели смешанного возбуждения обладают свойствами двигателей последовательного и параллельного возбуждения. Механическая характеристика $n(M)$ у них очень похожа на характеристику двигателя последовательного возбуждения, но двигатели смешанного возбуждения могут работать и при малых нагрузках на валу. Обычно двигатели смешанного и последовательного возбуждения применяются на транспорте, так как обладают большим пусковым моментом.

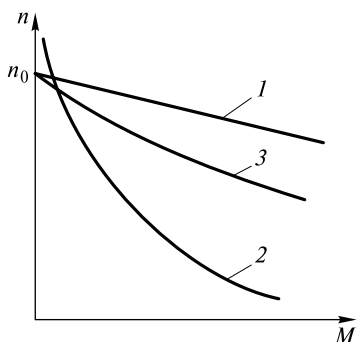


Рис. 7.14. Механические характеристики двигателей параллельного (1), последовательного (2) и смешанного (3) возбуждения

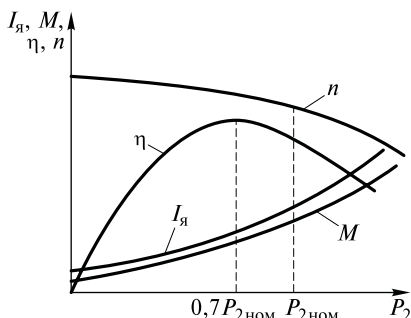


Рис. 7.15. Рабочие характеристики двигателя независимого возбуждения

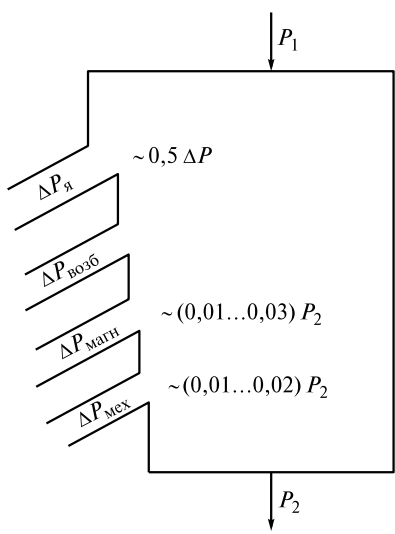


Рис. 7.16. Энергетическая диаграмма двигателя параллельного возбуждения

Потери в электрических машинах. Во время работы машин постоянного тока имеют место потери электрической энергии, вызывающие нагрев частей машины. Рассмотрим процесс распределения потерь с помощью энергетической диаграммы двигателя параллельного возбуждения (рис. 7.16). Двигатель потребляет из сети электрическую мощность P_1 , которая преобразуется в механическую мощность на валу двигателя P_2 . В процессе преобразования происходят потери мощности, которые преобразуются в теплоту.

Основные потери у машин постоянного тока возникают в якоре (потери $\Delta P_я$). Это относится ко всем двигателям и генераторам постоянного тока. У двигателей параллельного возбуждения поте-

ри в якоре составляют примерно половину всех потерь. Эти потери связаны с протеканием тока в обмотках якоря и дополнительных полюсов, а также в щеточных контактах. Потери $\Delta P_{возб}$ имеют место в обмотке возбуждения из-за протекающего тока возбуждения $I_{возб}$. Эти потери обычно составляют от 0,5 % до нескольких процентов от номинальной мощности двигателя $P_{ном}$. Магнитные потери $\Delta P_{маг}$ возникают в магнитной цепи вращающегося якоря и полюсных наконечниках. Они составляют (0,01 ... 0,03) от $P_{ном}$. При вращении якоря в подшипниках и в системе вентиляции машины появляются механические потери $\Delta P_{мех}$, составляющие (0,01 ... 0,02) $P_{ном}$. Общие потери ΔP равны сумме всех потерь, а КПД двигателя

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}.$$

Обычно КПД машин постоянного тока составляет 0,8...0,96, причем меньшие значения η , как правило, у машин малой мощности, у крупных машин КПД выше.

Пуск двигателей и регулирование частоты вращения. При пуске двигателей постоянного тока обычно руководствуются двумя основными требованиями:

пусковой момент двигателя должен быть достаточным для преодоления момента сопротивления нагрузки;

ток в обмотке якоря не должен превышать допустимых значений (обычно $2,5 I_{я.ном}$).

Обеспечить эти требования простым включением двигателя нельзя, поэтому применяют специальные приемы пуска. Если же подключить двигатель, например параллельного возбуждения, непосредственно к сети, то пусковой ток превысит номинальный в 20...25 раз, что приведет к аварии.

Чтобы понять, как можно регулировать частоту вращения двигателей постоянного тока, воспользуемся уже знакомым выражением для частоты вращения $n = \frac{U - R_{я}I_{я}}{C_E \Phi}$.

Частоту вращения двигателя можно регулировать:

изменением напряжения питания двигателя U ;

изменением сопротивления якоря $R_{я}$;

изменением потока индуктора Φ с помощью тока возбуждения.

Первым и третьим методами чаще пользуются для регулирования частоты вращения n , а второй метод обычно применяют при пуске.

Номинальный ряд напряжений и частот вращения двигателей.

Двигатели постоянного тока промышленного назначения изготавливают на напряжения 110, 220, 340 и 440 В. Для небольших двигателей применяют иногда пониженное напряжение 60 В. Крупные двигатели изготавливают на повышенное напряжение 600 или 930 В. Двигатели специального назначения могут иметь другое напряжение.

Частоты вращения у промышленных двигателей составляют следующий ряд: 25, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 750, 1000, 1500, 2000, 2200, 3000, 4000, 5000, 6000, 8000, 10000, 12000, 15000, 18000, 20000, 22000, 30000, 40000, 60000 об/мин.

При выборе двигателя помимо номинальных характеристик необходимо учитывать также условия эксплуатации, способ крепления, условия вентиляции и т.д.

7.5. Асинхронные машины

Общие сведения и назначение. Асинхронные машины являются машинами переменного тока. В основном они применяются в качестве двигателей. Асинхронные двигатели составляют 80 % всего парка электродвигателей. Такое широкое распространение они получили из-за простоты конструкции и хороших эксплуатационных характеристик. Эти двигатели надежны в работе и требуют минимального технического обслуживания. Различают несколько вариантов асинхронных двигателей: трехфазные, двухфазные, однофазные и линейные. Выпускают асинхронные двигатели в широком диапазоне мощностей — от нескольких ватт до нескольких мегаватт.

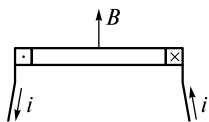


Рис. 7.17. Направление индукции магнитного поля при протекании тока в витке

Основное назначение асинхронных двигателей — привод различных механических устройств, к которым не предъявляются особые требования к регулированию частоты вращения, где требуется осуществлять пуск, остановку, торможение и изменение направления вращения вала.

Если эти двигатели дополнить преобразователями частоты и регуляторами напряжения, то они по своим регулировочным свойствам приближаются к двигателям постоянного тока.

Вращающееся магнитное поле трехфазной обмотки. Как известно, катушка, по которой протекает электрический ток i , создает магнитное поле. Направление индукции магнитного поля может быть определено с помощью правила правого винта (буравчика).

Если ток i изменяется по синусоидальному закону $i = I_m \sin \omega t$, то и индукция B так же будет изменяться по синусоидальному закону, сохраняя направление в пространстве, показанное на рис. 7.17.

Поместим в пространстве три катушки, сдвинутые относительно друг друга на 120° , по которым протекают токи трехфазной цепи i_A, i_B, i_C (рис. 7.18). Эти токи создают в каждой катушке магнитные поля с индукциями B_A, B_B, B_C . Как и катушки, векторы $\vec{B}_A, \vec{B}_B, \vec{B}_C$ сдвинуты в пространстве на 120° . Общее магнитное поле является векторной суммой полей всех трех катушек.

Результирующее магнитное поле характеризуется индукцией B , постоянной по величине, которая перемещается вокруг оси катушек с угловой скоростью ω . Таким образом, в пространстве катушек появляется вращающееся магнитное поле. Это является важным свойством трехфазных электрических цепей.

Принцип действия и устройство асинхронного двигателя. Как и все двигатели, асинхронный двигатель состоит из статора и ротора.

Статор асинхронного двигателя (рис. 7.19, а) содержит пазы, в которые укладывается статорная обмотка. Статор изготавливается из штампованных листов (пластин) электротехнической стали (рис. 7.19, б). Штампованные листы (обычно

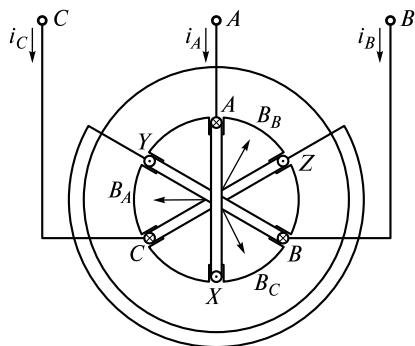


Рис. 7.18. Образование вращающегося магнитного поля

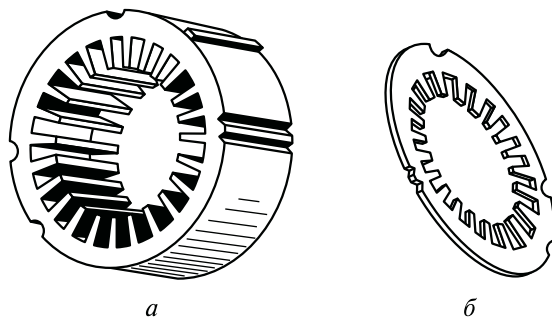


Рис. 7.19. Статор асинхронного двигателя в сборе (а) и пластина статора (б)

толщиной 0,5 мм) изолируют один от другого лаком и собирают в пакет, образуя корпус статора.

Ротор асинхронного (рис. 7.20, а) двигателя также изготавливают из штампованных листов электротехнической стали. В пазы ротора укладывают обмотку ротора. Чаще всего в пазы помещают стержни, закороченные с обеих сторон металлическими кольцами. Такая обмотка называется беличьим колесом (рис. 7.20, б), а ротор с этой обмоткой — короткозамкнутым.

Принцип работы асинхронного двигателя основан на использовании вращающегося магнитного поля. Трехфазная обмотка статора создает в пространстве ротора вращающееся магнитное поле. Магнитное поле пронизывает магнитную систему ротора и наводит в обмотке ротора ЭДС индукции, которая, в свою очередь, создает вихревые токи в роторе I_2 . Эти токи взаимодействуют с магнитным полем статора, появляется электромагнитная сила, и происходит вращение ротора. Для вращения ротора необходимо, чтобы в обмотке ротора наводились вихревые токи. Это возможно, если частота вращения ротора меньше частоты вращения магнитного поля. При одинаковых частотах вращения ротора и магнитного поля статора обмотка ротора не пронизывается переменным магнитным потоком, вихревые токи не образуются.

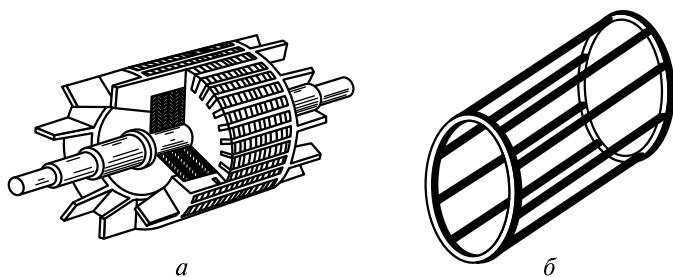


Рис. 7.20. Ротор асинхронного двигателя в сборе (а) и беличье колесо (б)

Электромагнитный момент равен нулю. Чтобы появились вихревые токи, частота вращения ротора должна быть немного меньше частоты вращения поля, т.е. должна отсутствовать синхронность вращения ротора и поля. Именно поэтому двигатели называют асинхронными.

У двигателя с фазным ротором обмотка ротора соединяется с трехфазным сопротивлением, которое используется для пуска. В дальнейшем это сопротивление закорачивается. На валу ротора имеются подшипники. Опорой для подшипника являются подшипниковые щиты, которые крепятся к корпусу статора. Это позволяет ротору свободно вращаться в магнитном поле статора.

Скольжение и частота вращения ротора. Частота вращения магнитного поля статора зависит от исполнения обмотки статора. Если каждая фаза статорной трехфазной обмотки содержит только одну катушку, то магнитных полюсов в такой машине будет в два раза больше, т.е. шесть (по два полюса на каждую электрическую катушку). Обмотка фазы статора может содержать две, три, четыре и более катушек, соединенных последовательно и размещенных на статоре вперемежку с катушками других фаз. В этом случае общее число полюсов будет равно соответственно 12, 18, 24 и т.д. Обычно в трехфазных машинах указывают не общее число полюсов в машине, а число пар полюсов на фазу, обозначаемых p . Таким образом, у 6-полюсной трехфазной обмотки $p = 1$, у 12-полюсной $p = 2$, у 18-полюсной $p = 3$.

Частота вращения магнитного поля статора $n_1 = \frac{60 f_1}{p}$, где f_1 — частота электрического тока статора. Для промышленной частоты $f = 50$ Гц максимальная частота вращения поля будет 3000 мин^{-1} при $p = 1$. Так как частота вращения ротора n_2 меньше, чем n_1 , то частота вращения вала асинхронного двигателя не может превышать 3000 мин^{-1} . Связь числа пар полюсов p с частотой вращения магнитного поля статора n_1 при $f = 50$ Гц:

p	1	2	3	4	5	8	10
$n_1, \text{ мин}^{-1}$	3000	1500	1000	750	600	375	300

Разность частот вращения $n_1 - n_2$ называется скольжением. Обычно скольжение выражают относительно n_1 и обозначают буквой S :

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Скольжение — очень важная характеристика асинхронного двигателя. Кроме разности частот вращения магнитного поля и ротора скольжение связано с мощностью на валу, с пусковым моментом, с частотой вращения двигателя, с ЭДС ротора.

Частота вращения двигателя n_2 может быть выражена через скольжение: $n_2 = n_1(1 - S)$. Обычно скольжение изменяется с нагрузкой. При номинальной нагрузке скольжение у машин разной мощности колеблется в диапазоне $0,02 \dots 0,05$. Поскольку скольжение в номинальном режиме невелико, частота вращения вала двигателя n_2 почти равна частоте вращения поля n_1 .

Пример 1. Найти число пар полюсов асинхронного двигателя, если при номинальной нагрузке частота вращения вала двигателя равна 975 мин^{-1} .

Решение. Так как частота вращения вала двигателя чуть меньше, чем частота вращения магнитного поля n_1 , находим ближайшую большую частоту вращения, пользуясь приведенной выше зависимостью n_1 от p . Такой частотой будет $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$, которой соответствует $p = 3$.

Пример 2. Определить режим работы асинхронного двигателя, у которого $S = 1$.

Решение. По формуле $S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 1$ находим, что $n_2 = 0$. Это режим пуска двигателя, когда ротор ещё неподвижный.

ЭДС обмоток статора и ротора. При подключенной обмотке статора к трехфазной цепи в фазе обмотки появляется ЭДС индукции

$$e_1 = -\frac{\Delta\Psi}{\Delta t}.$$

Действующее значение ЭДС индукции $E_1 = 4,44f w_1 \Phi_m k_1$, где f — частота тока сети; w_1 — число витков обмотки фазы; Φ_m — амплитуда магнитного потока статора; k_1 — обмоточный коэффициент, учитывающий размещение обмотки в нескольких пазах.

Магнитный поток Φ пронизывает и ротор двигателя, который вращается с частотой n_2 . Следовательно, частота вращения потока Φ относительно ротора определяется разностью частот вращения

$$n_1 - n_2, \text{ что соответствует частоте тока ротора } f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60}.$$

Частоту f_2 можно выразить через скольжение $f_2 = f_1 S$. ЭДС, наводимая в роторе, $E_2 = 4,44 f_2 w_2 \Phi_m k_2 = 4,44 f_1 w_2 \Phi_m k_2$, где w_2 — число витков одной фазы ротора; k_2 — обмоточный коэффициент ротора.

Магнитное поле в асинхронном двигателе. Обмотка статора асинхронного двигателя предназначена для создания вращающегося магнитного поля. Картина магнитного поля в асинхронной машине показана на рис. 7.21. Рабочий магнитный поток Φ , замыкаясь по магнитной цепи статора и ротора, пронизывает воздушный зазор z . Вокруг проводников статора и ротора, по которым протекают токи, образуются магнитные потоки рассеяния соответственно статора $\Phi_{\text{рас.ст}}$ и ротора $\Phi_{\text{рас.рот}}$. Эти потоки замыкаются вокруг проводников и не пересекают полностью воздушный зазор между статором и ротором. Эти потоки на эквивалентной схеме двигателя представляются индуктивностями L_1 и L_2 .

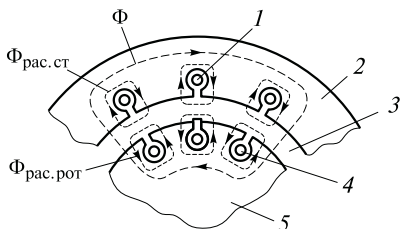


Рис. 7.21. Магнитное поле асинхронной машины:

- 1 — проводник статорной обмотки;
- 2 — статор; 3 — воздушный зазор;
- 4 — проводник обмотки ротора; 5 — ротор

Индуктивность L_1 соответствует магнитному потоку рассеяния статора $\Phi_{\text{рас.ст}}$ и называется индуктивностью обмотки статора, а L_2 соответствует магнитному потоку рассеяния ротора $\Phi_{\text{рас.рот}}$ и называется индуктивностью обмотки ротора. Поток рассеяния образуются не только в пространстве вокруг проводников обмоток, но и в лобовых (фронтальных) частях обмоток.

Кроме индуктивных сопротивлений $X_1 = \omega L_1$ и $X_2 = \omega L_2$ имеют также активные сопротивления обмотки статора R_1 и обмотки ротора R_2 .

Токи статора и ротора. Напишем второй закон Кирхгофа в комплексной форме для обмотки статора с учетом сопротивления R_1 и индуктивности L_1 :

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1.$$

В рабочем режиме двигателя, когда ток статора не превышает номинального, слагаемые $R_1 I_1$ и $X_1 I_1$ малы по сравнению с E_1 , поэтому можно написать $U_1 \approx E_1$.

Обмотка ротора асинхронного двигателя всегда является замкнутой. Индуцированная в обмотке ротора ЭДС E'_2 вызывает ток I_2 , который ограничивается сопротивлением R_2 и индуктивностью L_2 . Для цепи ротора второй закон Кирхгофа:

$$\underline{E}'_2 = R_2 \underline{I}_2 + jX_2 \underline{I}_2.$$

ЭДС ротора E'_2 зависит от частоты вращения ротора, поэтому обычно E'_2 выражают через ЭДС заторможенного (не вращающегося) ротора E_2 , т.е. $E'_2 = S E_2$.

Реактивное сопротивление X_2 обмотки ротора зависит от частоты f_2 электрического тока ротора и определяется по формуле $X_2 = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 S L_2 = S \omega_1 L_2 = S X_2$. Таким образом, уравнение для цепи ротора имеет вид $S E_2 = R_2 I_2 + j S X_2$. Отсюда получаем выражение для модуля тока ротора

$$I_2 = \frac{S E_2}{\sqrt{R_2^2 + (S X_2)^2}},$$

где E_2 и X_2 — постоянные величины, характеризующие заторможенный ротор, когда частота электрического тока f_2 в цепи ротора равна частоте питающей сети, т.е. $f_2 = f_1$.

Эквивалентная схема асинхронного двигателя. В предыдущем подразделе были приведены выражения для цепей статора и ротора. Учитывая, что магнитный поток асинхронной машины остается практически постоянным и не зависит от режима работы, т.е. $\Phi = \text{const}$, можно привести уравнение для обмотки ротора к напряжению сети U_1 . В этом случае

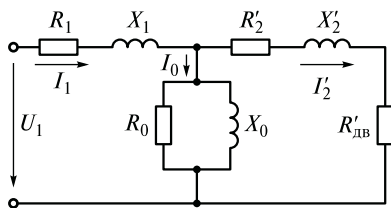


Рис. 7.22. Эквивалентная схема асинхронного двигателя

электрические процессы асинхронного двигателя могут быть представлены эквивалентной схемой (рис. 7.22). Цепь статора содержит активное сопротивление R_1 и реактивное сопротивление рассеяния X_1 обмотки статора, по которым протекает ток I_1 .

Ротор характеризуется приведенными значениями сопротивления обмотки R'_2 и реактивного сопротивления рассеяния X'_2 , по которым протекает приведенный ток ротора I'_2 . Механическая нагрузка на валу двигателя представляется приведенным сопротивлением $R'_{дв}$, которое зависит от скольжения S . Приведение цепи ротора осуществляется с помощью коэффициента трансформации обмоток статора и ротора (величина постоянная и известная из паспортных данных двигателя).

Кроме цепи ротора и статора эквивалентная схема содержит параметры магнитной цепи: R_0 — сопротивление, характеризующее потери в магнитной цепи; X_0 — сопротивление, соответствующее магнитному потоку машины.

Зная параметры эквивалентной схемы (R_1 , X_1 , R'_2 и т.д.), анализ асинхронного двигателя можно свести к рассмотрению обычной электрической цепи (см. рис. 7.22).

Вращающий момент. Электромагнитная сила F , действующая в магнитном поле статора с индукцией B на проводник ротора длиной l с током i_2 , определяется выражением $F = Bli_2$. Все компоненты этой формулы записаны для мгновенных значений. В каждый момент времени индукция и ток распределены вдоль статора по синусоидальному закону. Обычно находят среднюю силу $F_{ср}$ за период, а затем переходят к вращающему моменту: $M_{вр} = F_{ср} \frac{d}{2}$, где d — диаметр ротора.

Значительно проще можно получить выражение для вращающего момента, если воспользоваться следующими рассуждениями. Обмотка статора, подключенная к сети, создает вращающееся магнитное поле, это магнитное поле индуцирует вихревые токи в роторе I_2 , которые протекают по сопротивлению $R'_{дв}$. Согласно схеме (см. рис. 7.22) это электрический эквивалент механической нагрузки двигателя.

Мощность $P_{\text{дв}}$, выделяемая в сопротивлении $R'_{\text{дв}}$ при протекании приведенного тока ротора I'_2 , находят по формуле $P_{\text{дв}} = 3R'_{\text{дв}}(I'_2)^2$.

Коэффициент 3 в формуле соответствует трем фазам, а мощность $P_{\text{дв}}$ содержит кроме мощности на валу P_2 еще и механические потери $\Delta P_{\text{мех}}$, т.е. $P_{\text{дв}} = P_2 + \Delta P_{\text{мех}}$.

Пренебрегая механическими потерями, которые составляют (0,01...0,02) от $P_{2\text{ном}}$, получаем $P_2 \cong P_{\text{дв}} = 3R'_{\text{дв}}(I'_2)^2$, где P_2 — электрическая мощность в роторе, которая поступает из сети и с помощью вращающегося магнитного поля поступает в ротор. Механическая мощность на валу $P_{\text{мех}}$ определяется по формуле: $P_{\text{мех}} = M_2\Omega_2$, где M_2 — момент на валу двигателя; Ω_2 — угловая скорость вращения вала. Механическая и электрическая мощности должны быть равны $3R'_{\text{дв}}(I'_2)^2 = M_2\Omega_2$. Из этого выражения находим

$$M_2 = \frac{3R'_{\text{дв}}(I'_2)^2}{\Omega_2}.$$

Подставляя в полученную формулу выражения для $R'_{\text{дв}}$, I' и Ω_2 , после преобразований получаем достаточно простую формулу для момента на валу двигателя:

$$M_2 = \frac{kE_1^2}{x_2} \frac{1}{\frac{R_2}{Sx_2} + \frac{Sx_2}{R_2}},$$

где k — коэффициент, учитывающий некоторые конструктивные параметры машины, частоту электрической сети. Формула показывает, что механический момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения электрической сети ($U_1 \approx E_1$). Так, при уменьшении напряжения питания на 10 %, механический момент на валу асинхронного двигателя уменьшается на 20 %.

Величина $S_{\text{крит}} = \frac{R_2}{x_2}$ называется критическим скольжением.

Критическое скольжение соответствует максимальному моменту двигателя $M_{\text{max}} = \frac{kE_1^2}{2x_2}$.

У серийных двигателей $S_{\text{крит}} \approx 0,1$, а $M_{\text{max}} \approx (2...3)M_{\text{ном}}$. Если механический момент нагрузки на валу более $M_{\text{макс}}$, двигатель отключается, после чего обычно выходит из строя, если его не отключить.

Подставив в формулу момента $S_{\text{крит}}$ и M_{max} , получаем более простое выражение для момента $M_2 = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{S}{S_{\text{крит}}} + \frac{S}{S_{\text{крит}}}}$.

Полученное выражение позволяет найти зависимость пускового момента от сопротивления обмотки ротора. В режиме пуска $S = 1$. Преобразовав последнюю формулу с учетом выражения для $S_{крит}$, получим

$$M_{пуск} = \frac{2M_{max} R_2}{0,1^2 + 1 x_2} \approx \frac{2M_{max}}{x_2} R_2.$$

Поскольку M_{max} и x_2 неизменны при $U_1 = const$, то пусковой момент зависит от сопротивления обмотки ротора. Чем больше сопротивление, тем больше пусковой момент.

Механическая характеристика. Механической характеристикой двигателя называется зависимость частоты вращения вала от механического момента на валу $n = f(M_2)$. Зависимость $n = f(M_2)$ показана на рис. 7.23. Механическая характеристика является достаточно жесткой в рабочей области, где момент изменяется от 0 до $M_{ном}$. Для значений момента, превышающих $M_{ном}$, механическая характеристика является более крутой, а при значениях $M > M_{max}$ двигатель останавливается, по обмотке статора протекают большие токи, которые вызывают перегрев двигателя. Если двигатель не отключается от сети, это приводит к выходу из строя обмотки статора. В серийных асинхронных двигателях при номинальной нагрузке скольжение изменяется в диапазоне 0,02...0,06. Обычно меньшая граница соответствует более мощным асинхронным двигателям.

При увеличении сопротивления ротора (в двигателе с фазным ротором сопротивление ротора можно регулировать, подключая к нему реостат) зависимость становится более крутой (менее жесткой) (рис. 7.24). Из характеристик видно, что при увеличении сопротивления ротора R_2 , частота вращения ротора уменьшается

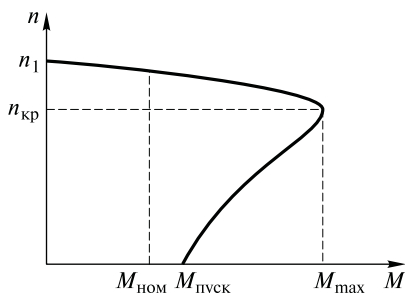


Рис. 7.23. Механическая характеристика асинхронного двигателя

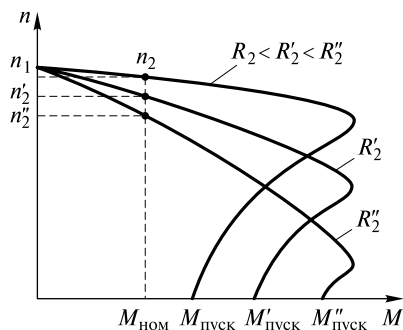


Рис. 7.24. Влияние сопротивления ротора на механическую характеристику

($n_2'' < n_2' < n_2$), а пусковой момент увеличивается ($M_{2\text{пуск}}'' > M_{2\text{пуск}}' > M_{2\text{пуск}}$).

Энергетические соотношения, коэффициент полезного действия.

Асинхронный двигатель преобразует электрическую энергию, потребляемую из трехфазной электрической сети, в механическую энергию вращения приводимого устройства. Процесс преобразования сопровождается потерями энергии. Удобно представить процесс образования потерь в двигателе с помощью энергетической диаграммы асинхронного двигателя (рис. 7.25). На диаграмме условно представлены основные элементы двигателя, где имеют место потери. Индекс 1 соответствует величинам в статоре, индекс 2 — в роторе.

Мощность на входе, потребляемая из сети, $P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi$.

При протекании электрического тока в обмотке статора происходит ее нагрев, что представляется электрическими потерями в статоре $\Delta P_{1\text{эл}}$. Эти потери характеризуются выражением $\Delta P_{1\text{эл}} = 3R_1 I_1^2$. Кроме электрических потерь в статоре имеют место магнитные потери $\Delta P_{1\text{маг}}$. Они возникают из-за перемагничивания сердечника, гистерезиса и вихревых токов.

В воздушный зазор между статором и ротором поступает электромагнитная мощность $P_{\text{эм}}$.

Индуктируемые в роторе вращающим магнитным полем вихревые токи I_2 вызывают электрические потери в обмотке ротора $\Delta P_{2\text{эл}}$. Так же, как и в статоре, возникают магнитные потери $\Delta P_{2\text{маг}}$, которые существенно меньше, чем в статоре. При вращении ротора появляются механические потери во вращающихся частях $\Delta P_{2\text{мех}}$.

Таким образом, на вал двигателя поступает мощность $P_2 = P_1 - \Delta P$, где ΔP — суммарные потери в двигателе, $\Delta P = \Delta P_{1\text{эл}} + \Delta P_{1\text{маг}} + \Delta P_{2\text{эл}} + \Delta P_{2\text{маг}} + \Delta P_{2\text{мех}}$. Коэффициент полезного действия асинхронного двигателя $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}$, КПД серийных двигателей составляет 0,75 ... 0,95. Большее значение диапазона соответствует двигателям большей мощности.

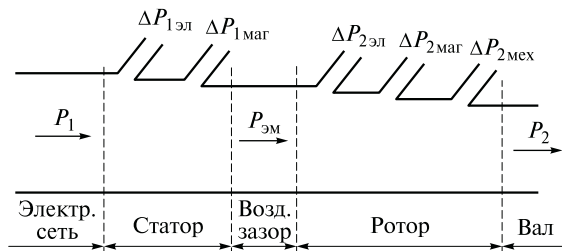


Рис. 7.25. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Рабочие характеристики. Рабочими характеристиками двигателя называются зависимости частоты вращения вала n_2 , электромагнитного момента M_2 , тока статора I_1 , коэффициента мощности $\cos \varphi$ и КПД двигателя η от мощности на валу P_2 . При этом напряжение сети U_1 предполагается неизменным. Примерный вид рабочих характеристик показан на рис. 7.26. Обычно рабочие характеристики приводят в относительных единицах, что позволяет пользоваться ими для двигателей различных мощностей.

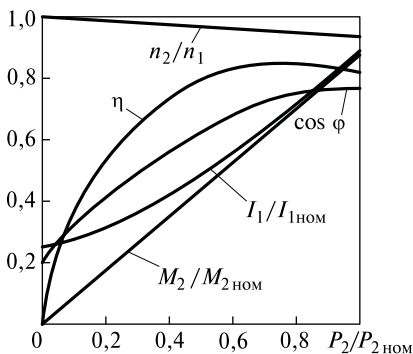


Рис. 7.26. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Из рабочих характеристик можно сделать следующие выводы: коэффициент мощности $\cos \varphi$ очень низок при малых нагрузках, поэтому не рекомендуется использовать асинхронный двигатель в слабонагруженных режимах;

максимальный КПД двигатель имеет при $(0,7 \dots 0,8)P_{2ном}$;

частота вращения ротора убывает по линейному закону при увеличении нагрузки, а электромагнитный момент, напротив, возрастает также по линейному закону.

Пуск асинхронного двигателя. При пуске асинхронного двигателя ротор разгоняется от частоты вращения, равной нулю, до n_2 , при этом скольжение изменяется от 1 до S . Во время пуска необходимо выполнить следующие условия:

электромагнитный момент двигателя M_2 при пуске должен быть больше момента сопротивления нагрузки, т.е. $M_2 > M_c$;

пусковой ток в статоре по возможности должен быть ограничен.

Именно эти два условия и определяют различные способы пуска двигателя.

Если пренебречь током холостого хода I_0 , то ток в статоре I_1 можно найти из эквивалентной схемы (см. рис. 7.22):

$$I_1 \approx \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{S}\right) + (x_1 + x_2')^2}}$$

Так как во время пуска $S = 1$, а по окончании пуска $S = 0,02 \dots 0,06$, то ток в начале пуска значительно больше, чем ток в конце пуска. В серийных двигателях пусковой ток превышает номинальный в $5 \dots 7$ раз. Это значит, что во время пуска электрическая сеть, к которой подключен двигатель, должна иметь дополнительную мощность. Напряжение на других потребителях, под-

ключенных к этой же сети, резко уменьшится, что негативно отразится на их работе и может привести к аварии. Чтобы предотвратить вредное воздействие пуска на сеть, необходимо ограничивать пусковой ток. Это можно делать следующими искусственными приемами:

- уменьшать напряжение обмотки статора U_1 во время пуска;
- увеличивать активное R_1 или реактивное X_1 сопротивления статора, включая последовательно с обмоткой статора на период пуска дополнительные элементы;

- увеличивать сопротивление ротора (для двигателя с фазным ротором).

В соответствии с перечисленными приемами уменьшения пускового тока различают следующие способы пуска асинхронных двигателей:

- прямой пуск (подключение двигателя к сети напрямую);
- пуск переключением обмоток статора (сначала обмотки соединяются звездой, затем треугольником);
- пуск с включением добавочных сопротивлений в цепь статора; автотрансформаторный пуск, позволяющий уменьшить напряжение во время пуска;
- пуск с включением добавочных сопротивлений в цепь ротора (возможен только для двигателей с фазным ротором).

Существуют и другие более сложные способы пуска асинхронных двигателей.

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Производственный процесс часто требует регулирования частоты вращения рабочих механизмов. Для этого применяются различные механические устройства (коробки скоростей, вариаторы), но можно регулировать и частоту вращения самого двигателя. Чтобы понять принцип регулирования, рассмотрим уже знакомое выражение для частоты вращения магнитного поля $n_1 = \frac{60f_1}{p}$.

Частота вращения ротора двигателя n_2 незначительно отличается от n_1 , поэтому способы регулирования n_1 позволяют регулировать и n_2 .

Из последней формулы вытекают два основных способа регулирования частоты вращения двигателя:

- изменением частоты электрической сети f_1 ;
- изменением числа пар полюсов p статорной обмотки.

Технически осуществить указанные способы регулирования частоты вращения двигателя можно:

- с помощью частотного регулирования, реализованного на базе полупроводниковой техники. При таком регулировании скорость двигателя меняется плавно;

- регулирования изменением числа полюсов статорной обмотки. Для этого выполняют на статоре расщепленную обмотку и с по-

мощью частей расщепленной обмотки меняют число пар полюсов. При таком регулировании частота вращения двигателя изменяется дискретно.

Для двигателей с фазным ротором можно подключать дополнительные сопротивления к обмотке ротора, но этот метод имеет много недостатков (дополнительные потери в реостате, малый диапазон регулирования, мягкие характеристики).

Исполнение и частота вращения асинхронных двигателей. Асинхронные двигатели являются наиболее распространенными и выпускаются с учетом следующих особенностей:

крепеж (горизонтальный, вертикальный, другое расположение вала);

предполагаемый район эксплуатации (нормальное, тропическое, северное исполнение);

технологические условия работы (влажность, пылезащитенность, взрывоопасность);

условия вентиляции двигателя (естественная, принудительная).

Стандартизованы также синхронные частоты вращения асинхронных двигателей.

Номинальные значения синхронных частот вращения для промышленной частоты сети 50 Гц: 3000; 1500; 1000; 750; 375; 300; 250; 187,5; 166,6; 150; 125; 100 об/мин.

Номинальные рабочие частоты асинхронных двигателей несколько меньше синхронных из-за наличия скольжения.

7.6. Синхронные машины

Назначение. Синхронные машины, как и все электрические машины, являются обратимыми, т. е. они могут работать в режиме генератора и в режиме двигателя. Конструктивно синхронные генераторы и двигатели отличаются мало, хотя и имеются некоторые различия.

Синхронные генераторы применяются в качестве основных устройств, производящих электрическую энергию на электрических станциях. Трехфазные синхронные генераторы — самые мощные электрические машины. Мощность современных синхронных генераторов достигает 1500 МВ·А.

Синхронные двигатели применяются в устройствах, где требуется постоянная частота вращения. Частота вращения ротора синхронных двигателей не зависит от нагрузки и остается постоянной. Синхронные двигатели применяются на металлургических заводах, в компрессорных и насосных агрегатах, вентиляторах. Синхронные двигатели малой мощности применяются в электрочасах, системах звуко- и видеозаписи, устройствах автоматики и т. д.

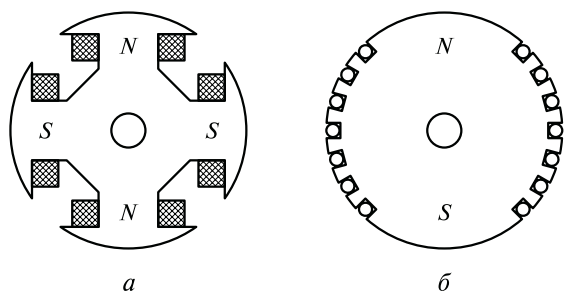


Рис. 7.27. Явнополюсный (а) и неявнополюсный (б) роторы синхронных машин

Важной особенностью синхронных двигателей является их способность работать с отрицательной фазой φ (ток опережает напряжение). Это позволяет увеличить коэффициент мощности $\cos \varphi$ и тем самым поднять пропускную способность электрических сетей и систем.

Устройство и принцип действия. Как все электрические машины, синхронные имеют статор и ротор. Статор синхронной машины содержит трехфазную обмотку и практически не отличается по конструкции от статора асинхронной машины. Ротор представляет собой электромагнит. Различают роторы явнополюсного (рис. 7.27, а) и неявнополюсного (рис. 7.27, б) видов.

По обмотке ротора, который называется еще индуктором, протекает постоянный электрический ток. Для этой цели служат контактные кольца и щетки. Упрощенная схема синхронной машины (рис. 7.28) позволяет понять принцип ее работы.

Обмотка ротора подключается к источнику постоянного тока, который создает магнитное поле возбуждения. Трехфазная обмотка статора подключается к сети электроснабжения или к энергосистеме в зависимости от назначения машины (двигатель или генератор).

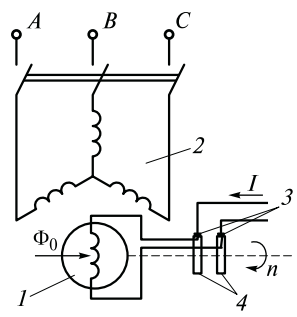


Рис. 7.28. Упрощенная схема синхронной машины:

1 — ротор (индуктор); 2 — статор; 3 — щетки; 4 — кольца

В генераторе ротор вращается с помощью дополнительного устройства (гидротурбины, паровой турбины, дизеля и т.д.) с синхронной частотой вращения $n_2 = n_{\text{синхр}}$. Магнитное поле ротора, вращаясь относительно статора с частотой вращения $n_{\text{синхр}}$, наводит в обмотке статора ЭДС индукции E_0 . Если цепь статора замкнута, в ней возникает ток I_1 , который, в свою очередь, также создает магнитное поле с помощью трех-

фазной обмотки статора. Частота вращения этого поля относительно статора n_1 также будет равна синхронной, т. е. $n_1 = n_{\text{синхр}}$. Поскольку поле ротора первично, оно при вращении опережает поле статора на угол θ . Можно сказать, что поле ротора как бы «ведет» за собой поле статора. Статорная обмотка синхронного генератора, находящегося на электростанции, подключается через трансформаторы к энергосистеме.

В двигателе обмотка статора подключается к сети электроснабжения. Ток статора создает вращающееся с синхронной частотой $n_{\text{синхр}}$ магнитное поле, которое взаимодействует с магнитным полем ротора.

При вращении ротора магнитные полюсы статора и ротора должны быть противоположны (рис. 7.29) и поле статора в этом случае «ведет» поле ротора, которое, в свою очередь, отстает на угол θ . Ротор не может вращаться с частотой, отличной от синхронной, так как в этом случае магнитные полюса статора и ротора не будут синхронизированы. Это означает, что в отдельный момент времени магнитное поле статора будет вращать ротор, в другие моменты — тормозить его. В синхронном двигателе частота вращения ротора равна синхронной, т. е. $n_2 = n_1 = n_{\text{синхр}}$.

Синхронный генератор. Уравнение синхронного генератора, эквивалентная схема. В синхронном генераторе ток ротора (возбуждения) создает магнитное поле с потоком Φ_0 , которое вращается вместе с ротором с синхронной частотой $n_{\text{синхр}}$ относительно статора. Вращающееся магнитное поле ротора пересекает витки статорной обмотки и индуцирует в ней ЭДС E_0 , которую называют ЭДС холостого хода. Если обмотка статора разомкнута (отсутствует нагрузка), то статорный ток I равен нулю.

Если подключить нагрузку, появляется ток статора I , который будет создавать в статоре вращающееся магнитное поле с потоком $\Phi_{\text{р.я}}$. Это магнитное поле пропорционально току статора и совпадает с ним по фазе. Возникающий магнитный поток статора $\Phi_{\text{р.я}}$ называется реакцией якоря. Поток статора $\Phi_{\text{р.я}}$ совпадает по фазе с током, а фаза тока I зависит от вида нагрузки, поэтому фаза магнитного потока $\Phi_{\text{р.я}}$ не является постоянной, а зависит от нагрузки.

Кроме потока реакции якоря $\Phi_{\text{р.я}}$ в обмотке статора при протекании тока появляется поток рассеяния $\Phi_{\text{рас}}$. Его природа аналогична потоку рассеяния в асинхронной машине. Поток $\Phi_{\text{рас}}$ вызывается током статора, пропорционален ему и совпадает с ним по фазе.

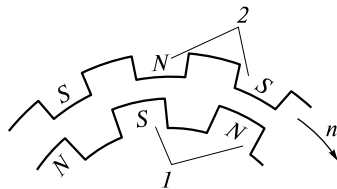


Рис. 7.29. Синхронизация синхронной машины:

1 — магнитные полюсы ротора;
2 — магнитные полюсы статора;
 n — частота вращения поля статора

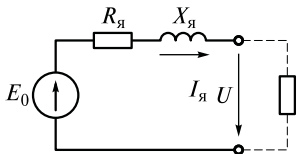


Рис. 7.30. Эквивалентная схема синхронного генератора

дают по фазе, поэтому $\underline{\Phi}_я = \underline{\Phi}_{р.я} + \underline{\Phi}_{рас}$.

Реально в статоре синхронного генератора существует только результирующий поток $\Phi_{рез}$, а остальные составляющие Φ_0 , $\Phi_{р.я}$ и $\Phi_{рас}$ вводятся для удобства анализа электрических процессов в генераторе. Эквивалентом магнитного потока $\Phi_я$ на схеме генератора является индуктивность $L_я$ (или ее реактивное сопротивление $X_я$). Реактивное сопротивление $X_я$ называется синхронным индуктивным сопротивлением, которое характеризует магнитные поля рассеяния и реакции якоря. Кроме $X_я$ существует еще активное сопротивление статорной обмотки $R_я$. Эквивалентная электрическая схема синхронного генератора представлена на рис. 7.30.

Обычно в синхронном генераторе $X_я \gg R_я$. Уравнение состояния генератора для одной фазы имеет вид: $\underline{U} = \underline{E}_0 - jX_я\underline{I}$. В синхронных машинах анализируется одна фаза, так как обычно трехфазная цепь, к которой подключается синхронная машина, симметричная.

Характеристики синхронного генератора. Для синхронного генератора обычно представляют следующие характеристики: характеристика холостого хода $E_0(I_{рот})$; зависимость тока короткого замыкания от тока ротора $I_{к.з}(I_{рот})$; внешняя характеристика генератора $U(I_я)$.

Внешняя характеристика $U(I_я)$ показывает изменение напряжения U на выходе генератора в зависимости от тока статора (якоря) $I_я$. При активной и индуктивной нагрузках напряжение уменьшается с ростом тока, при емкостном характере нагрузки ($\varphi < 0$) напряжение на генераторе даже возрастает (рис. 7.31).

Электромагнитный момент и мощность синхронного генератора. Мощность на выходе трехфазного генератора P_2 вычисляется по формуле мощности для одной фазы, умноженной на три (число фаз): $P_2 = 3UI_я \cos \varphi$.

Механическая мощность P_1 приводного устройства, вращающего генератор, определяется выражением

$$P_1 = M_{эм} \Omega_{синхр},$$

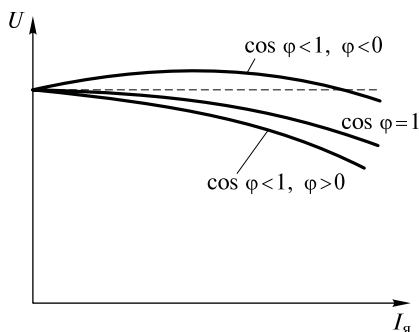


Рис. 7.31. Внешние характеристики синхронного генератора

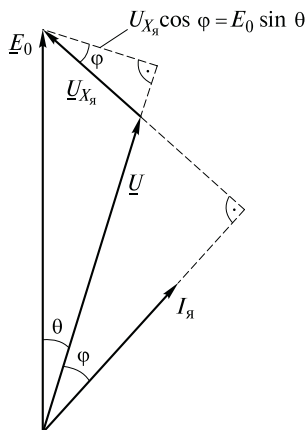


Рис. 7.32. Векторная диаграмма синхронного генератора

где $M_{эм}$ — электромагнитный момент генератора, противодействующий моменту приводного устройства; $\Omega_{синхр}$ — угловая скорость магнитного поля статора, равная синхронной.

Пренебрегая потерями в статоре, можно считать, что $P_1 \approx P_2$, откуда $M_{эм} = \frac{3UI_я}{\Omega_{синхр}} \cos \varphi$.

Ранее отмечалось, что ток ротора создает магнитный поток Φ_0 , который индуцирует в обмотке статора ЭДС холостого хода E_0 . Результирующий магнитный поток связан с напряжением U на выходе генератора. Напряжение U отстает от E_0 на угол рассогласования θ (поток Φ_0 «ведет» за собой поток $\Phi_{рез}$, опережая его на тот же угол θ). Обычно синхронные генераторы работают с $\varphi > 0$ и $\cos \varphi \approx 0,9 \dots 0,95$. На рис. 7.32 представлена векторная диаграмма синхронного генератора. Из прямоугольных треугольников получаем $E_0 \sin \theta = U_{X_я} \cos \varphi = X_я I_я \cos \varphi$. Выразим $I_я \cos \varphi = \frac{E_0}{X_я} \sin \theta$. Подставим полученное выражение в формулу для электромагнитного момента:

$$M_{эм} = \frac{3UI_я}{\Omega_{синхр}} \cos \varphi = 3 \frac{UE_0}{\Omega_{синхр} X_я} \sin \theta = M_{max} \sin \theta,$$

где M_{max} — максимальный электромагнитный момент синхронного генератора; $M_{max} = 3 \frac{UE_0}{\Omega_{синхр} X_я}$. При неизменных U , E_0 этот момент остается постоянным.

С учетом сделанных выше преобразований мощность на выходе генератора

$$P_2 = 3UI_{\text{я}} \cos \varphi = 3 \frac{UE_0}{X_{\text{я}}} \sin \theta = P_{\text{max}} \sin \theta,$$

где P_{max} — максимальная мощность синхронного генератора при постоянных U и E_0 ; $P_{\text{max}} = 3 \frac{UE_0}{X_{\text{я}}}$.

Таким образом, в синхронном генераторе при постоянном напряжении сети U и постоянном возбуждении ($E_0 = \text{const}$) электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$ и мощность P_2 зависят только от угла расфазовки θ . Обычно этот угол не превышает 30° .

Синхронный двигатель. Устройство и пуск. Синхронный двигатель потребляет электрическую энергию из сети и превращает ее в механическую энергию на валу двигателя. Принципиально конструкция синхронного двигателя мало отличается от генератора. Статорная обмотка (якорь) двигателя подключается к сети, а обмотка ротора с помощью колец и щеток присоединяется к источнику постоянного тока (обычно регулируемому выпрямителю). Статорная обмотка создает вращающееся магнитное поле, как в асинхронном двигателе, а ротор за счет протекания постоянного тока по его обмотке ведет себя, как электромагнит. Магнитные поля статора и ротора взаимодействуют, но пусковой момент в синхронном двигателе отсутствует. Электромагнитная сила, образующаяся при взаимодействии магнитных полей статора и ротора, 50 раз в секунду меняет свой знак, и поэтому ротор не может вращаться.

Чтобы устранить этот недостаток синхронных двигателей, на ротор накладывается дополнительная пусковая короткозамкнутая обмотка (как у асинхронного двигателя). Эта обмотка облегченная, поэтому пуск синхронного двигателя проводится при отсутствии механической нагрузки. Обычно пуск выполняют в таком порядке:

отключают обмотку возбуждения ротора от цепи постоянного тока;

закрывают обмотку ротора на резистор, сопротивление которого в 10...15 раз превышает сопротивление самой обмотки. Это позволяет уменьшить риск пробоя обмотки возбуждения при пуске и увеличить пусковой момент;

проводят пуск двигателя при отключенной механической нагрузке (подключают статор к сети);

при достижении двигателем в асинхронном режиме частоты вращения $n_2 \approx 0,95n_{\text{синхр}}$ обмотку возбуждения подключают к цепи постоянного тока;

нагружают двигатель механической нагрузкой.

Синхронные двигатели применяют в устройствах с постоянной частотой вращения (компрессоры, мощные насосы, прокатные станы).

Уравнения синхронного двигателя. Эквивалентная электрическая схема синхронного двигателя (рис. 7.33) такая же, как и у генератора, с той лишь разницей, что электрическая энергия преобразуется в механическую и, следовательно, ток направлен от U к E_0 . Электрическое состояние двигателя описывается уравнением $\underline{U} = jX_{я}\underline{I}_{я} + \underline{E}_0$.

Напряжение сети U создает вращающееся магнитное поле, на которое накладывается поле реакции якоря (из-за протекания $I_{я}$). Результирующее магнитное поле статора $\Phi_{рез}$ взаимодействует с магнитным полем ротора Φ_0 , появляется вращающий момент $M_{эм}$. Поток Φ_0 отстаёт на угол θ от $\Phi_{рез}$ (поток $\Phi_{рез}$ «ведёт» за собой поток ротора Φ_0), напряжение U также опережает E_0 на угол θ .

При постоянном напряжении сети U и постоянном токе возбуждения вращающий момент $M_{эм}$ выражается той же формулой, что и для генератора (изменяется только его направление),

$$M_{эм} = \frac{3UE_0}{\Omega_{синхр}X_{я}} \sin \theta = M_{max} \sin \theta.$$

С ростом нагрузки растёт угол рассогласовывания θ . Максимальный момент у двигателя имеет место при $\theta = 90^\circ$. Но при таком угле двигатель работает неустойчиво. Для обеспечения необходимого запаса устойчивости, синхронные двигатели работают при $\theta \leq 30^\circ$.

Потребляемая двигателем из сети электрическая мощность определяется по той же формуле, что и для генератора,

$$P = 3UI \cos \varphi = \frac{3UE_0}{X_{я}} \sin \theta.$$

Характеристики и рабочие режимы синхронного двигателя. Важной характеристикой синхронного двигателя является механическая характеристика $n(M)$, представленная на рис. 7.34. Из этой характеристики видно, что частота вращения двигателя постоянна, равна $n_{синхр}$ и не зависит от нагрузки M .

Если двигатель работает при постоянной нагрузке и неизменном напряжении сети U , то из приведенного выражения для момента следует, что $E_0 \sin \theta = const$. Величина E_0 зависит только от тока возбуждения (тока ротора). Регулируя ток возбуждения, можно регу-

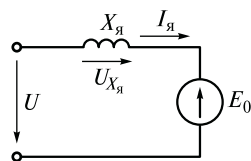


Рис. 7.33. Эквивалентная схема синхронного двигателя

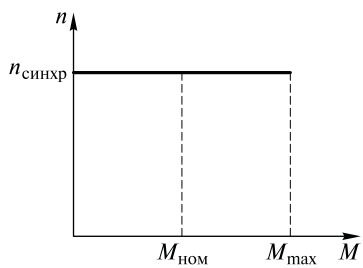


Рис. 7.34. Механическая характеристика синхронного двигателя

лизовать величину E_0 . Можно показать, что изменение величины E_0 приводит к изменению знака фазы тока $I_{\text{я}}$. Так, в режиме перевозбуждения (когда ток $I_2 > I_{\text{ном}}$) ток статора $I_{\text{я}}$ опережает напряжение статора U , что соответствует активно-емкостному режиму. Это обстоятельство используют на практике, поэтому почти все крупные синхронные двигатели работают с отрицательным углом φ , что позволяет компенсировать реактивную мощность, увеличивая общий $\cos\varphi$ системы энергоснабжения.

При этом двигатель вращает механическое устройство с заданной частотой вращения. На рис. 7.35 приведены зависимости тока статора $I_{\text{я}}$ от тока возбуждения I_2 при разных значениях нагрузки. Эти зависимости получили название V-образных характеристик синхронного двигателя. При токах возбуждения $I_2 < I_{2н}$ двигатель представляет собой индуктивную нагрузку с реактивной мощностью Q_L , при $I_2 > I_{2н}$ — емкостную нагрузку с реактивной мощностью Q_C . Оба эти режима разделяет пунктирная линия $\cos\varphi = 1$, которая соответствует номинальному току возбуждения $I_{2\text{ном}}$.

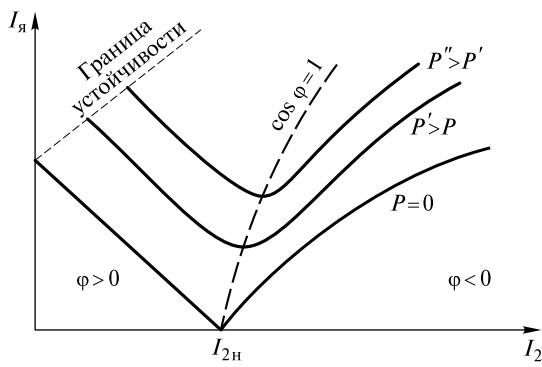


Рис. 7.35. V-образные характеристики синхронного двигателя

Цепь возбуждения синхронных двигателей обычно позволяет превышать ток ротора на 50...60 %.

Коэффициент полезного действия синхронных двигателей тем выше, чем больше мощность двигателя. Как и у всех двигателей, наибольший КПД соответствует мощности, равной $(0,7 \dots 0,8)P_{\text{ном}}$. У крупных двигателей КПД достигает значений 0,91...0,96.

7.7. Однофазные двигатели и двигатели малой мощности

Общие сведения. Кроме обычных двигателей постоянного и переменного тока в промышленности применяют двигатели малой мощности. Диапазон мощностей этих двигателей колеблется от долей ватта до нескольких киловатт. Двигатели малой мощности применяются в схемах автоматического управления, в различных бытовых устройствах (дрели, рубанки, пилы и т.д.), в устройствах, требующих повышенных частот вращения (челноки в текстильном производстве, швейные машины), в приводах механизмов малой мощности.

Двигатели малой мощности условно можно разделить на группы в соответствии с принципом действия: однофазные асинхронные двигатели; конденсаторные двигатели; трехфазные двигатели в однофазном режиме; коллекторные машины переменного тока. Рассмотрим отдельно особенности машин каждой группы.

Однофазные асинхронные двигатели. Такие двигатели питаются от сети однофазного тока. Обмотка статора этих двигателей может быть однофазной, двухфазной и даже трехфазной. Если асинхронный двигатель содержит на статоре лишь однофазную обмотку (рис. 7.36, *а*), то такая обмотка создает только пульсирующее магнитное поле с амплитудой потока Φ . Пульсирующее магнитное поле можно разложить на два вращающихся в противоположных направлениях магнитных поля, с одинаковой частотой вращения $n_{\text{синхр}}$ и одинаковой амплитудой магнитного потока, равной половине Φ , т. е. $\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{1}{2} \Phi$ (рис. 7.36, *б*). Ясно, что пульсирующее

магнитное поле не создает пускового момента, но если искусственно раскрутить ротор, то появится значительный вращающий момент и ротор будет вращаться.

Чтобы создать пусковой момент у однофазного асинхронного двигателя, обычно на статор помещают дополнительную обмотку,

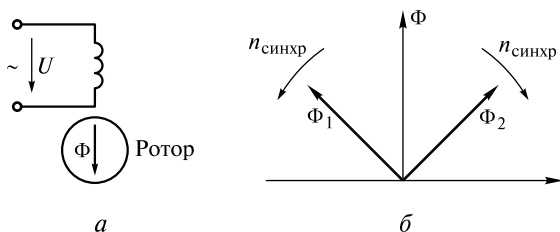


Рис. 7.36. Однофазный двигатель:

а — схема; *б* — разложение пульсирующего магнитного поля

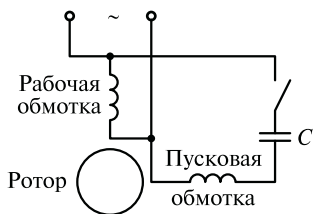


Рис. 7.37. Схема однофазного двигателя с пусковой обмоткой

которая работает только во время пуска (рис. 7.37). Как правило, рабочая обмотка двигателя занимает $\frac{2}{3}$ пазов статора, а $\frac{1}{3}$ пазов приходится на пусковую обмотку. Пусковую обмотку на период пуска замыкают либо на конденсатор C , либо на резистор (чаще на конденсатор). Пусковая обмотка в пространстве смещена на 90° относительно рабочей обмотки, чем и достигается появление пускового момента. После запуска пусковая обмотка отключается с помощью специального устройства (реле времени, реле тока и т. п.).

Однофазные асинхронные двигатели получили широкое распространение в бытовых приборах (холодильники, морозильники, кондиционеры и т. д.). Их мощность обычно не превышает 700 Вт.

Конденсаторные двигатели. Конденсаторными двигателями называют асинхронные двигатели, имеющие две статорные обмотки (рис. 7.38). Каждая из них занимает половину пазов статора и, таким образом, магнитные потоки оказываются смещенными в пространстве на 90° . Одна из обмоток замкнута на конденсатор, что позволяет получить вращающееся магнитное поле и пусковой момент. В отличие от однофазного асинхронного двигателя обе обмотки остаются включенными все время. Иногда в конденсаторных двигателях во время пуска подключают дополнительную пусковую емкость, позволяющую увеличить пусковой момент, а в рабочем режиме — иметь круговое, а не эллиптическое вращающееся магнитное поле.

Обычно из-за дополнительных потерь КПД однофазных и конденсаторных асинхронных двигателей значительно ниже, чем трехфазного. Конденсаторные двигатели находят широкое применение в бытовой технике (стиральные машины, кондиционеры, вентиляторы и т. д.).

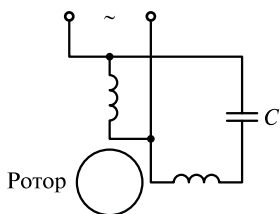


Рис. 7.38. Схема конденсаторного двигателя

Трехфазные асинхронные двигатели в

однофазном режиме. В качестве однофазных двигателей иногда используют трехфазные асинхронные двигатели. Чтобы создать вращающееся магнитное поле, применяют специальные схемы с фазосдвигающими конденсаторами. В зависимости от соединений обмоток статора применяют одну из схем, приведенных на рис. 7.39. Схемы, изображенные на рис. 7.39, *а*, *б* применяют при соединении обмоток двигателя звездой, схему, изоб-

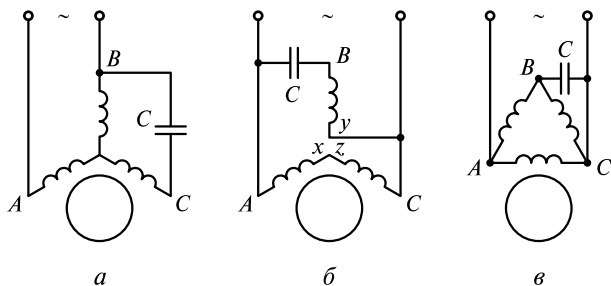


Рис. 7.39. Схемы трехфазных двигателей в однофазном режиме при соединении обмоток звездой (а, б) и треугольником (в)

раженную на рис. 7.39, в — при соединении обмоток двигателя треугольником.

Емкость фазосдвигающего конденсатора C для сети промышленной частоты приближенно может быть найдена по формуле

$$C = \frac{2800 I_{\Phi}}{U}$$

для схем, изображенных на рис. 7.39, а, б, а по формуле

$$C = \frac{4800 I_{\Phi}}{U}$$

— для схемы, изображенной на рис. 7.39, в. В обеих

формулах емкость измеряется в микрофарадах (мкФ), фазные токи — в амперах (А) и напряжение — в вольтах (В).

В однофазном режиме трехфазный двигатель работает с более низким КПД и может развивать только 60...70 % номинальной мощности.

Коллекторные машины переменного тока. Коллекторные машины переменного тока подобны машинам постоянного тока и могут работать как в цепи постоянного, так и в цепи переменного тока, поэтому их называют еще универсальными двигателями. Конструктивно они представляют собой двухщеточные машины постоянного тока последовательного возбуждения. Отличие состоит в том, что статор и ротор этих двигателей изготовлен из шихтованных магнитных материалов. Схема универсального двигателя приведена на рис. 7.40. Обмотка возбуждения состоит из двух расщепленных обмоток, подключенных к обеим щеткам двигателя. Двигатель последовательного возбуждения имеет меньшую индуктивность по сравнению с другими типами двигателей постоянного тока, что позволяет получить приемлемые условия коммутации на переменном токе.

При работе на переменном токе включается лишь часть обмотки возбуждения, при постоянном — вся обмотка.

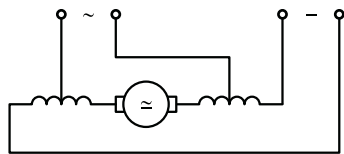


Рис. 7.40. Схема универсального двигателя

Коллекторный двигатель может работать с высокими частотами вращения (до $30\,000\text{ мин}^{-1}$). Регулирование частоты вращения достигается с помощью простых средств.

Коллекторные двигатели используются во многих бытовых машинах (пылесосы, швейные машинки, электродрели), а также в производстве, где требуются высокие частоты вращения (вязальные машины, челночные машины и т. д.).

Контрольные вопросы

1. Какие устройства называются электрическими машинами?
2. Назовите основные конструктивные элементы электрических машин.
3. Объясните принцип действия генератора постоянного тока.
4. Объясните назначение коллектора в электрических машинах.
5. Какова роль щеток в электрических машинах постоянного тока?
6. Напишите выражение для ЭДС якоря генератора постоянного тока.
7. Напишите выражение для электромагнитного момента двигателя.
8. Что такое реакция якоря?
9. Назовите виды электрических машин постоянного тока.
10. Объясните внешние характеристики генераторов постоянного тока различных типов.
11. В чем заключается принцип обратимости?
12. Объясните механические характеристики двигателей независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.
13. Назовите основные виды потерь в двигателях постоянного тока.
14. Каким образом можно регулировать частоту вращения в двигателях постоянного тока?
15. Что такое вращающееся магнитное поле?
16. Объясните принцип действия асинхронного двигателя.
17. Укажите основные части асинхронного двигателя.
18. Как связана синхронная частота вращения с числом пар полюсов?
19. Сколько катушек содержится в фазе двигателя при последовательном их соединении, если номинальная частота вращения двигателя $n_2 = 485\text{ мин}^{-1}$ при $f_1 = 50\text{ Гц}$?
20. Что такое скольжение?
21. Напишите выражения для ЭДС статора и ротора.
22. Напишите выражения для токов статора и ротора.
23. От чего зависит электромагнитный момент двигателя?
24. Что называется механической характеристикой двигателя?
25. Что такое максимальный момент двигателя?
26. Какие виды потерь существуют в асинхронном двигателе?
27. Что называется рабочими характеристиками двигателя?
28. В чем заключаются недостатки прямого пуска?
29. От чего зависит пусковой момент двигателя?
30. Назовите способы пуска асинхронного двигателя.

31. Назовите способы регулирования частоты вращения асинхронного двигателя.
32. Почему не рекомендуется применять слабозагруженные асинхронные двигатели?
33. Объясните принцип работы синхронного двигателя.
34. Из каких основных частей состоит синхронный двигатель?
35. Что называется реакцией якоря синхронного двигателя?
36. Что такое синхронное индуктивное сопротивление?
37. Нарисуйте эквивалентную электрическую схему синхронного двигателя, синхронного генератора.
38. Почему синхронный двигатель не имеет пускового момента?
39. Как осуществляется пуск синхронного двигателя?
40. Напишите основные уравнения синхронного двигателя.
41. Нарисуйте внешнюю характеристику синхронного генератора.
42. Нарисуйте механическую характеристику синхронного двигателя.
43. Объясните V-образные характеристики синхронного двигателя.
44. В каком режиме работы синхронный двигатель может компенсировать реактивную мощность?
45. Объясните принцип работы асинхронного однофазного двигателя.
46. Нарисуйте схему включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную цепь при соединении обмотки статора звездой.
47. Объясните принцип работы конденсаторного двигателя.
48. В чем состоит отличие коллекторного двигателя переменного тока от двигателей постоянного тока?
49. Почему коллекторные двигатели переменного тока широко используются в ручном электроинструменте, бытовой технике?

Темы рефератов

1. Области применения электрических двигателей постоянного тока.
2. Области применения генераторов постоянного тока. Их преимущества и недостатки.
3. Виды потерь в двигателях постоянного тока и пути их снижения.
4. Конструктивные особенности асинхронных двигателей с фазным ротором и область их применения.
5. Установки, связанные с вашей профессией, в которых применяются асинхронные двигатели.
6. Преимущества и недостатки асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока.
7. Устройства мягкого пуска асинхронных двигателей.
8. Установки, в которых предпочтительно применять синхронные генераторы.
9. Способы поддержания напряжения и частоты в синхронном генераторе.

8.1. Общие сведения

Электронными приборами называются активные вакуумные, газоразрядные и полупроводниковые элементы электрических цепей. Наряду с пассивными элементами (резисторами, катушками индуктивности и конденсаторами) они входят в электрические схемы устройств, в которых происходит преобразование электромагнитной энергии и сигналов. Наиболее простым видом преобразования является выпрямление переменного тока, более сложными — инвертирование постоянного тока в переменный, усиление, генерирование и преобразование сигналов сложной формы. Различают вакуумные и полупроводниковые электронные приборы.

К электровакуумным приборам относятся электронные лампы (диоды, триоды, тетроды, пентоды и др.), вакуумные фотоэлементы и фотоумножители, электронно-лучевые трубки осциллографов, телевизоров, мониторов ЭВМ, сверхвысокочастотные генераторы (клистроны, магнетроны, митроны и др.). В электровакуумных приборах электрический ток создается направленным движением электронов. Электроны чаще всего испускаются (эмитируются) нагретыми термоэлектродными катодами и за счет напряжения между анодом и катодом движутся к аноду. Кроме анода и катода между ними в зависимости от назначения располагаются другие электроды (сетки и экраны), регулирующие интенсивность и скорость потока электронов. К электронным приборам относятся также газоразрядные приборы: газотроны, тиратроны, игнитроны, ртутные выпрямители и т.д. В них физические процессы протекают в газовой среде, а электрический ток образуется движением не только катодных электронов, но и движением электронов и положительных ионов, образующихся вследствие ионизации инертных газов или паров ртути.

В полупроводниковых приборах электрические токи текут в твердом теле — полупроводниках. Поэтому их часто называют твердотельными электронными приборами. К ним относятся полупроводниковые диоды, триоды (транзисторы), тиристоры, светодиоды, фоторезисторы, фототранзисторы.

Полупроводниковые электронные приборы наиболее часто используются в современных электронных устройствах.

8.2. Полупроводники: основные понятия, типы электропроводности

Полупроводники — широкий класс материалов, которые по своей электропроводности занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. При комнатной температуре удельное сопротивление проводников составляет $10^{-8} \dots 10^{-5}$ Ом·м, полупроводников — $10^{-6} \dots 10^8$ Ом·м, диэлектриков — $10^7 \dots 10^{17}$ Ом·м.

Наиболее широкое распространение получили полупроводниковые элементы германий и кремний, расположенные в четвертой группе периодической таблицы Менделеева, а также ряд соединений — арсенид галлия, окись цинка и т. д.

При температуре $T=0$ К в чистом полупроводнике отсутствуют носители электрического заряда. При повышении температуры в полупроводнике появляются носители электрических зарядов двух знаков.

Процесс образования носителей заряда под воздействием температуры называется термогенерацией носителей. Обратный процесс называется рекомбинацией носителей. В количественном отношении носители заряда в полупроводнике взаимно компенсируют друг друга. Электропроводность полупроводника, обусловленная образованием носителей заряда под действием температуры, называется собственной.

На электропроводность полупроводников сильное влияние оказывают примеси.

Электропроводность полупроводника, обусловленная носителями электрического заряда отрицательного знака, т. е. свободными электронами, носит название электропроводности *n*-типа, а полупроводник, реализующий электропроводность *n*-типа, называется полупроводником *n*-типа. Примесь, которая обуславливает электропроводность *n*-типа, называется донорной (отдающей).

Электропроводность полупроводника, обусловленная носителями электрического заряда положительного знака, т. е. свободными дырками, носит название электропроводности *p*-типа, а полупроводник, реализующий электропроводность *p*-типа, называется полупроводником *p*-типа. Примесь, которая обуславливает электропроводность *p*-типа, называется акцепторной (принимающей).

Носители электрического заряда, образующиеся в результате добавления примеси в полупроводник, количественно преобладают над носителями заряда, получаемыми в результате процесса термогенерации, поэтому электроны в *n*-полупроводнике и дырки в *p*-полупроводнике носят название основных носителей электрического заряда. В свою очередь, электроны в *p*-полупроводнике и дырки в *n*-полупроводнике носят название неосновных носителей электрического заряда.

8.3. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом, имеющим два вывода. В качестве выпрямляющего электрического перехода используется электронно-дырочный $p-n$ -переход, разделяющий p - и n -области кристалла полупроводника (рис. 8.1, *а*).

К p - и n -областям кристалла привариваются или припаиваются металлические выводы, и вся система заключается в металлический, металлокерамический, стеклянный или пластмассовый корпус.

По конструктивному выполнению различают точечные (рис. 8.1, *б*) и плоскостные (рис. 8.1, *в*) диоды. Условное обозначение полупроводникового диода на электрических схемах показано на рис. 8.1, *г*.

Если к выводам диода приложить прямое напряжение, как это показано на рис. 8.1, *г*, то создаваемая им напряженность электрического поля будет противоположна направлению напряженности объемного заряда и в область базы (по мере возрастания напряжения U) будет вводиться (инжектировать) все большее количество дырок, являющихся не основными для n -области базы носителями заряда, которые и образуют прямой ток диода I .

Если к выводам диода приложить обратное напряжение $-U$, то создаваемая им напряженность электрического поля, совпадая по направлению с напряженностью объемного заряда, повышает потенциальный барьер и препятствует переходу основных носителей заряда в соседнюю область. Однако суммарная напряженность электрических полей способствует извлечению (экстракции) неосновных носителей заряда, которые и образуют обратный ток $p-n$ -перехода. Число неосновных носителей заряда значительно изменяется при изменении температуры, возрастая с ее повыше-

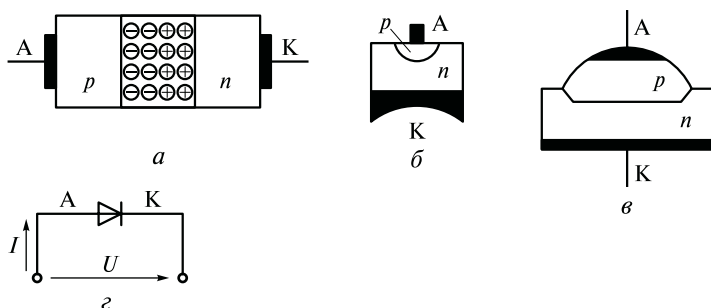


Рис. 8.1. Электронно-дырочный $p-n$ -переход (*а*), точечный (*б*) и плоскостной (*в*) диоды, условные обозначения диодов на схемах (*г*):

А — анод; К — катод

нием. Поэтому обратный ток, образованный за счет неосновных носителей, называют тепловым током (I_0).

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода показана на рис. 8.2.

При определенном значении напряжения $U_{обр}$ начинается лавинообразный процесс нарастания тока $I_{обр}$, соответствующий электрическому пробое $p-n$ -перехода (отрезок AB на рис. 8.2). Если в этот момент ток не ограничить, электрический пробой переходит в тепловой (участок ВАХ после точки B). Такая последовательность лавинообразного процесса нарастания тока $I_{обр}$ характерна для кремниевых диодов. Для германиевых диодов с увеличением обратного напряжения тепловой пробой $p-n$ -перехода наступает практически одновременно с началом лавинообразного процесса нарастания тока $I_{обр}$. Электрический пробой обратим, т.е. после уменьшения напряжения $U_{обр}$ работа диода соответствует пологому участку AO обратной ветви ВАХ. Тепловой пробой необратим, так как разрушает $p-n$ -переход.

Прямой ток диода также зависит от температуры окружающей среды, возрастая с ее повышением, хотя и в значительно меньшей степени, чем обратный ток. Характер изменения прямой ветви ВАХ при изменении температуры показан на рис. 8.2.

Наиболее широко применяется на практике выпрямительный диод, условное графическое обозначение которого приведено на рис. 8.3, *a*.

Выпрямительный диод представляет собой электронный ключ, управляемый приложенным к нему напряжением. При прямом напряжении ключ замкнут, при обратном — разомкнут. Однако в обоих случаях этот ключ не является идеальным. При подаче прямого напряжения $U_{пр}$ ключ обладает небольшим сопротивлением. Поэтому за счет падения напряжения $U_{пр}$ на открытом диоде выпрямленное напряжение, снимаемое с нагрузочного устройства, несколько ниже входного напряжения ($U_{пр}$ не превышает у германиевых диодов 0,5 В, а у кремниевых 1,5 В).

Основными параметрами выпрямительных диодов являются:

$I_{пр,ср\ max}$ — максимальное (за период входного напряжения) значение среднего прямого тока диода;

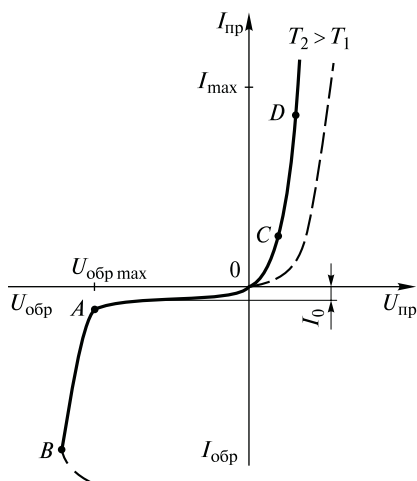


Рис. 8.2. Вольт-амперная характеристика диода

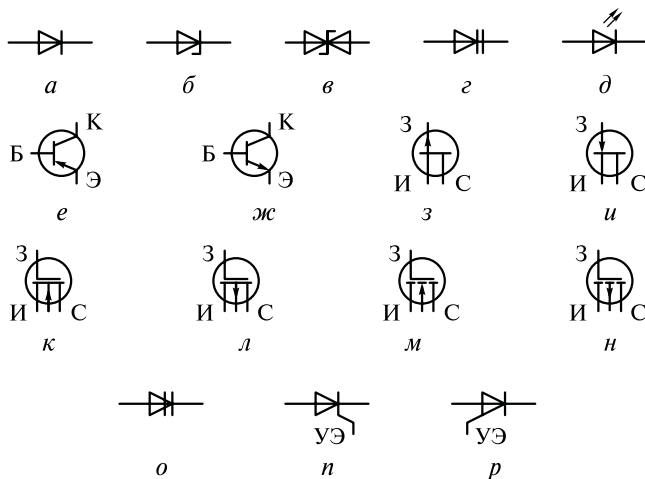


Рис. 8.3. Условные графические обозначения полупроводниковых приборов:

а — выпрямительный и импульсный диоды; *б* — симметричный стабилитрон; *в* — варикап; *г* — излучающий диод; *д* — биполярный транзистор *p-n-p*-типа; *е* — биполярный транзистор *n-p-n*-типа; *ж* — полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом с *n*-каналом; *и* — полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом с *p*-каналом; *к* — МДП-транзистор с встроенным *n*-каналом; *л* — полевой транзистор с встроенным *p*-каналом; *м* — МДП-транзистор с индуцированным *n*-каналом; *н* — МДП-транзистор с индуцированным *p*-каналом; *о* — динистор; *п, р* — триностор с управлением соответственно по катоду и аноду; Б — база; К — коллектор; Э — эмиттер; З — затвор; И — исток; С — сток; УЭ — управляющий электрод

$U_{\text{обр.доп}}$ — допустимое наибольшее значение постоянного обратного напряжения диода;

f_{max} — максимально допустимая частота входного напряжения;

$U_{\text{пр}}$ — значение прямого падения напряжения на диоде при заданном прямом токе.

Выпрямительные диоды классифицируют также по мощности и частоте.

У маломощных диодов $I_{\text{пр.ср max}} \leq 0,3 \text{ А}$; у диодов средней мощности $0,3 \text{ А} < I_{\text{пр.ср max}} \leq 10 \text{ А}$; у диодов большой мощности $I_{\text{пр.ср max}} > 10 \text{ А}$.

У низкочастотных диодов $f_{\text{max}} < 10^3 \text{ Гц}$, а у высокочастотных — $f_{\text{max}} > 10^3 \text{ Гц}$.

В качестве выпрямительных применяются также диоды, выполненные на выпрямляющем переходе металл — полупроводник (диоды Шотки), имеющие меньшее, чем у диодов с *p-n*-переходом, напряжение $U_{\text{пр}}$ и большую f_{max} .

Стабилитрон и стабистор применяются в нелинейных цепях постоянного тока для стабилизации напряжения. Отличие стабилитрона от стабистора заключается в используемой ветви ВАХ для

стабилизации напряжения. Как видно из рис. 8.2, ВАХ диода имеет участки AB и CD , на которых значительному изменению тока соответствует незначительное изменение напряжения при сравнительно линейной их зависимости. Для стабилизации высокого напряжения ($> 3 \text{ В}$) используют обратную ветвь (участок AB) ВАХ. Применяемые для этой цели диоды называют стабилитронами. Для стабилизации небольших значений напряжений ($< 1 \text{ В}$ — например, в интегральных схемах) используют прямую ветвь (участок CD) ВАХ, а применяемые в этом случае диоды называют стабилсторами. Условное обозначение стабилитрона и стабилстора показано на рис. 8.3, б.

Стабилитроны и стабилсторы изготавливают, как правило, из кремния. Различают низко- и высоковольтные стабилитроны с напряжением стабилизации от 3 до 400 В.

К основным параметрам стабилитрона относятся:

$U_{\text{ст}}$ — напряжение стабилизации при заданном токе;

$R_{\text{диф}}$ — дифференциальное сопротивление при заданном токе;

$I_{\text{ст min}}$ — минимально допустимый ток стабилизации;

$I_{\text{ст max}}$ — максимально допустимый ток стабилизации;

P_{max} — максимально допустимая рассеиваемая мощность;

α — температурный коэффициент напряжения (ТКН) стаби-

лизации $\alpha = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{U_{\text{ст}} \Delta T}$, где $\Delta U_{\text{ст}}$ — отклонение напряжения $U_{\text{ст}}$ от но-

минального значения при изменении температуры в интервале ΔT .

В схемах двухполярной стабилизации напряжения применяется симметричный стабилитрон, условное графическое обозначение которого показано на рис. 8.3, в.

Маркировка полупроводниковых диодов, разработанных после 1964 г., предусматривает шесть символов. Первый символ — буква (для общего применения) или цифра (для специального назначения), указывающая исходный полупроводниковый материал, из которого изготовлен диод: Г (1) — германий, К (2) — кремний, А (3) — арсенид галлия. Второй символ — буква, обозначающая подкласс диода: Д — выпрямительные, высокочастотные (универсальные) и импульсные диоды; В — варикапы; С — стабилитроны и стабилсторы; Л — светодиоды. Третий символ — цифра, указывающая назначение диода (у стабилитронов — мощность рассеяния): 3 — переключательный, 4 — универсальный и т.д. Четвертый и пятый символы — двузначное число, указывающее порядковый номер разработки (у стабилитронов — номинальное напряжение стабилизации). Шестой символ — буква, обозначающая параметрическую группу прибора (у стабилитронов — последовательность разработки). Примеры маркировки диодов: ГД412А — германиевый (Г), диод (Д), универсальный (4), номер разработки (12), группа (А); КС19,6 В — кремниевый (К), стаби-

литрон (С), мощность рассеяния не более 0,3 Вт (1), номинальное напряжение стабилизации 9,6 В (9,6), третья разработка (В).

Для полупроводниковых диодов с малыми габаритными размерами корпуса используется цветная маркировка в виде меток, наносимых на корпус прибора.

8.4. Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор — полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими $p-n$ -переходами и тремя выводами. Таким образом, в биполярном транзисторе используются одновременно два типа носителей зарядов — электроны и дырки (отсюда и название — биполярный).

Биполярный транзистор содержит два $p-n$ -перехода, образованных тремя областями с чередующимися типами проводимости. В зависимости от порядка чередования этих областей различают транзисторы $p-n-p$ и $n-p-n$ -типа. На рис. 8.3, *е, ж* показаны условные графические обозначения биполярного транзистора.

Работа биполярного транзистора основана на взаимодействии двух $p-n$ -переходов.

Рассмотрим принцип работы биполярного транзистора на примере транзистора $n-p-n$ -типа (рис. 8.4), для которого концентрация основных носителей в n -области существенно выше, чем в p -области. У такого транзистора n -область, которая инжектирует электроны в соседнюю p -область, (левую n -область) называют эмиттером, правую n -область, которая экстрактирует находящиеся в соседней p -области электроны, называют коллектором, а среднюю область — базой. Соответственно примыкающий к эмиттеру $p-n$ -переход называют эмиттерным, а примыкающий к коллектору — коллекторным. Металлические выводы, привариваемые или припаиваемые к полупроводниковым областям, называют соответственно эмиттерным, коллекторным и базовым выводами.

В зависимости от напряжений, приложенных к переходам биполярного транзистора, существует четыре режима его работы:

активный (рис. 8.5, *а*) — на эмиттерный переход подано прямое напряжение, на коллекторный — обратное. Этот режим соответствует максимальному значению коэффициента передачи тока эмиттера и обеспечивает минимальное искажение усиленного сигнала;

инверсный (рис. 8.5, *б* — на эмиттерный переход подано об-

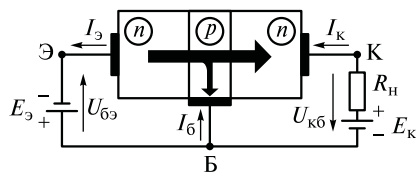


Рис. 8.4. Распределение токов в $n-p-n$ -транзисторе

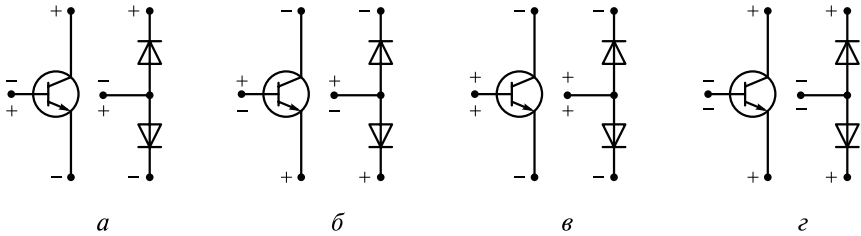


Рис. 8.5. Режимы работы биполярного транзистора:
а — активный; *б* — инверсный; *в* — насыщения; *г* — отсечки

ратное напряжение, на коллекторный — прямое. Этот режим приводит к значительному уменьшению коэффициента передачи тока эмиттера по сравнению с работой в нормальном режиме и поэтому на практике применяется редко;

насыщения (рис. 8.5, *в*) — оба перехода находятся под прямым напряжением. Выходной ток в этом случае не зависит от входного и определяется только параметрами нагрузки. Из-за малого напряжения между выводами коллектора и эмиттера режим насыщения используется для замыкания цепей передачи сигнала;

отсечки (рис. 8.5, *г*) — оба перехода находятся под обратными напряжениями. Так как выходной ток транзистора в режиме отсечки практически равен нулю, этот режим используется для замыкания цепей передачи сигналов.

Основными параметрами, характеризующими транзистор как активный нелинейный четырехполюсник (при любой схеме включения), являются:

$$\text{коэффициент усиления по току } K_I = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}};$$

$$\text{коэффициент усиления по напряжению } K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}};$$

$$\text{коэффициент усиления по мощности } K_P = K_I K_U = \frac{\Delta P_{\text{ВЫХ}}}{\Delta P_{\text{ВХ}}};$$

$$\text{входное сопротивление } R_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{\text{ВХ}}};$$

$$\text{выходное сопротивление } R_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВЫХ}}}.$$

Параметры транзистора, рассчитанные для каждой из схем его включения, представлены в табл. 8.1. В ней под величиной $R_{\text{вх.б}}$ следует понимать входное сопротивление транзистора для схемы с ОБ.

Анализ данных, приведенных в табл. 8.1, свидетельствует об универсальности схемы с ОЭ, обеспечивающей усиление транзи-

стора как по току, так и по напряжению. Этим объясняется широкое применение указанной схемы включения транзистора.

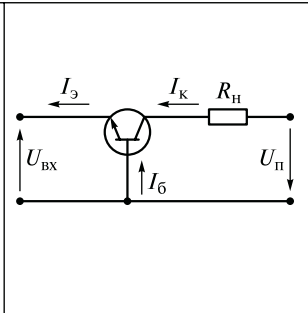
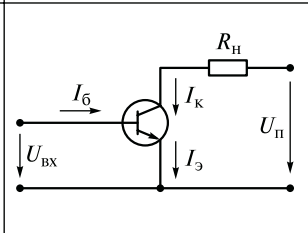
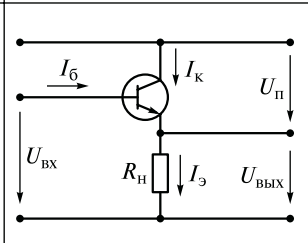
Высокие значения β обуславливают также усилительное свойство транзистора по току, заключающееся в возможности малыми входными токами (током базы) управлять существенно большими токами (током коллектора) в выходной (нагрузочной) цепи.

Каждой схеме включения транзистора соответствуют свои статические характеристики, представляющие собой функциональную зависимость токов через транзистор от приложенных напряжений. Из-за нелинейного характера указанных зависимостей их представляют обычно в графической форме.

Транзистор как четырехполюсник характеризуется входной и выходной статическими ВАХ, показывающими соответственно зависимость входного тока от входного напряжения (при посто-

Таблица 8.1

Схемы включения транзисторов

Схема включения	Основные параметры
<p>Общая база (ОБ)</p> 	$R_{BX} = R_{BX.6} = \frac{U_{\text{эб}}}{I_3};$ $K_I = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_3} = h_{216} = \alpha < 1;$ $K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}} = \frac{\Delta I_K R_H}{\Delta I_3 R_{BX.6}} = \frac{R_H}{R_{BX.6}} h_{216} \gg 1$
<p>Общий эмиттер (ОЭ)</p> 	$K_I = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_6} = h_{213} = \beta \gg 1;$ $K_U = \frac{\Delta I_K R_H}{\Delta I_6 R_{BX.6}} = h_{213} \frac{R_H}{R_{BX.6}} \gg 1;$ $R_{BX} = R_{BX.6}(\beta + 1)$
<p>Общий коллектор (ОК)</p> 	$K_I = \frac{\Delta I_3}{\Delta I_6} = h_{213} + 1 \gg 1;$ $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} - U_{\text{бэ}};$ $K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}} < 1;$ $R_{\text{ВХ}} = R_H(\beta + 1)$

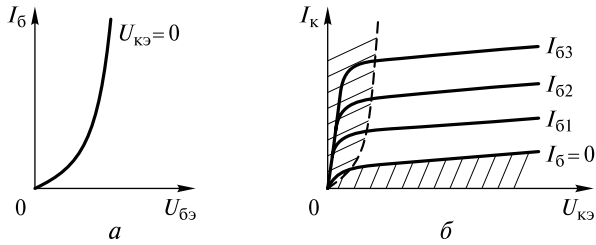


Рис. 8.6. Входные (а) и выходные (б) статические характеристики $n-p-n$ -транзистора, включенного по схеме с ОЭ

янном значении выходного напряжения транзистора) и выходного тока от выходного напряжения (при постоянном входном токе транзистора). Статические входные и выходные ВАХ биполярного транзистора $n-p-n$ -типа для схемы включения с ОЭ приведены на рис. 8.6. Статические характеристики используются для расчета нелинейных цепей, содержащих транзистор.

Выпускаемые промышленностью дискретные биполярные транзисторы классифицируют обычно по двум параметрам: по мощности и частотным свойствам.

По мощности они подразделяются на маломощные ($P_{\text{вых}} < 3$ Вт), средней мощности ($0,3 \text{ Вт} < P_{\text{вых}} < 1,5$ Вт) и мощные ($P_{\text{вых}} > 1,5$ Вт). По частотным свойствам — на низкочастотные ($f_a < 0,3$ МГц), средней частоты ($0,3 \text{ МГц} < f_a < 3$ МГц), высокой частоты ($3 \text{ МГц} < f_a < 30$ МГц) и сверхвысокой частоты ($f_a > 30$ МГц), где f_a — предельная частота усиления транзистора по току в схеме ОБ, при которой модуль коэффициента передачи эмиттерного тока $|\alpha|$ уменьшается в $\sqrt{2}$ раз относительно значения, измеренного на низкой частоте.

8.5. Полевые транзисторы

Полевой транзистор в отличие от биполярного иногда называют униполярным транзистором, так как его работа основана на использовании только одного типа носителей — либо электронов, либо дырок. Проводящий слой, в котором создается рабочий ток полевого транзистора, называют каналом.

Полевой транзистор — полупроводниковый усилительный прибор, которым управляет не ток (как в биполярном транзисторе), а электрическое поле (отсюда и название — полевой), осуществляющее изменение площади поперечного сечения проводящего канала. При этом изменяется выходной ток транзистора. Каналы могут быть приповерхностными (транзисторы с изолированным затвором) и объемными (транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом).

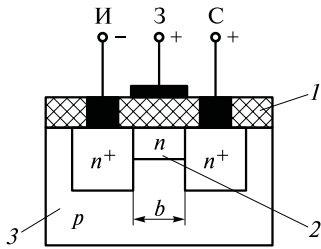


Рис. 8.7. Структура МДП-транзистора:

1 — диэлектрик; 2 — канал;
3 — подложка

Металлический электрод, создающий эффект поля, называют затвором (3), два других электрода — истоком (И) и стоком (С). Исток и сток в принципе обратимы. Истоком служит тот из них, из которого при соответствующей полярности напряжения между истоком и стоком в канал поступают основные носители заряда, а стоком — тот электрод, через который эти носители уходят из канала во внешнюю цепь. В зависимости от того, какой из выводов является общим для входа и выхода, различают три схемы включения полевого транзистора: с общим истоком (ОИ), с общим затвором (ОЗ) и общим стоком (ОС). Наибольшее распространение на практике нашла схема с ОИ.

Структура МДП-транзистора с каналом n -типа показана на рис. 8.7. Металлический затвор изолирован от полупроводниковой подложки слоем диэлектрика (отсюда эквивалентное название МДП-транзистора — полевой транзистор с изолированным затвором).

Входное сопротивление $R_{вх}$ полевого транзистора очень велико (несколько мегаом), поскольку значение тока затвора I_3 очень мало.

Условные обозначения полевых транзисторов приведены на рис. 8.3, з...н.

Основными преимуществами полевого транзистора являются его высокое входное сопротивление по постоянному току и большая технологичность. Последнее обуславливает широкое применение полевых транзисторов при разработке цифровых интегральных схем.

Дискретные полевые транзисторы, выпускаемые промышленностью, классифицируют по мощности и частоте аналогично биполярным.

Для маркировки транзисторов с 1972 г. применяют шестисимвольное буквенно-цифровое обозначение. При этом каждый символ несет следующую информацию о транзисторе. Первый символ — буква или цифра, указывающая, как и в случае маркировки диодов, исходный полупроводниковый материал. Второй символ — буква, обозначающая класс прибора: П — полевые, Т — биполярные транзисторы. Третий символ — цифра (от 1 до 9), определяющая энергетическую и частотную характеристики биполярного и полевого транзисторов, указывается в соответствии с табл. 8.2.

Четвертый и пятый символы — цифры (от 01 до 99), указывающие порядковый номер разработки прибора. Шестой символ —

Частотная и энергетическая характеристики транзистора, определяемые третьим символом маркировки

Мощность рассеяния, Вт	Рабочая частота, МГц		
	Менее 3	3...30	Более 30
Менее 0,3	1	2	3
0,3...1,5	4	5	6
Более 1,5	7	8	9

буква, обозначающая параметрическую группу приборов (деление по группам осуществляют по каким-либо параметрам прибора: коэффициенту передачи тока, обратному напряжению и др.). Например, маркировка КТ905А означает: кремниевый биполярный транзистор; мощность рассеяния более 1,5 Вт; рабочая частота более 30 МГц; пятая разработка; относится по своим параметрам к группе А.

Разработана семисимвольная маркировка полупроводниковых приборов, которая отличается от существующей трехзначным номером разработки, соответствующим четвертому, пятому и шестому символам маркировки.

8.6. Тиристоры

Тиристор — полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, имеющий три (или более) выпрямляющих перехода, который может переключаться из закрытого состояния в открытое, и наоборот. Различают диодные (неуправляемые) и триодные (управляемые) тиристоры. Диодный тиристор называют динистором, а триодный — тринистором.

Динистор, условное обозначение которого приведено на рис. 8.3, *о*, представляет собой двухполюсную четырехслойную $p-n-p-n$ -структуру. Электрод, обеспечивающий электрическую связь с внешней n -областью, называется катодом, а с внешней p -областью — анодом. С учетом знаков приложенного к структуре внешнего напряжения переходы 1 и 3 (рис. 8.8) смещены в прямом направлении, а все напряжение падает на переходе 2, который работает в режиме коллектора. Рассматриваемую структуру динистора можно представить состоящей из двух транзисторов $p_1-n_1-p_2$ и $n_2-p_2-n_1$, у которых области n_1 и p_2 условно разделены. Переход 1 представляет собой эмиттерный переход пер-

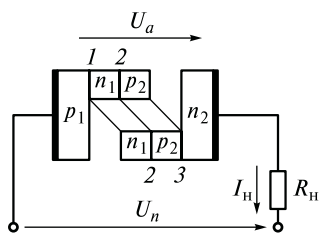


Рис. 8.8. Схема включения динистора:
1, 2, 3 — переходы

вого транзистора, через который дырки инжектируют из p_1 -области в область n_1 , выполняющую роль базы для этого транзистора. Пройдя базу и коллекторный переход 2, инжектированные дырки появляются в коллекторе p_2 первого транзистора, который в то же время служит базой второго транзистора.

Описанные процессы определяют ВАХ динистора, показанную на рис. 8.9, на прямой ветви которой можно выделить две устойчивые зоны: область III с

малыми значениями тока I_n при больших значениях напряжения U_a и область отпирания I с большими токами I_n при малых напряжениях U_a .

Точки A и B соответствуют выполнению условия $\alpha_{\Sigma} = 1$ и называются соответственно точками включения и удержания динистора, а соответствующие им токи называются током включения ($I_{вкл}$) и током удержания ($I_{уд}$). Между точками A и B лежит область II, в которой динистор обладает отрицательным дифференциальным сопротивлением. В соответствии со вторым законом Кирхгофа для схемы, представленной на рис. 8.9, имеем $U_n = U_a + R_n I$.

Решением этого уравнения будет точка пересечения линии нагрузки R_n и ВАХ динистора (рабочая точка). Если напряжение U_a на динисторе достигает значения напряжения включения $U_{вкл}$, рабочая точка скачкообразно переходит из состояния A в A'. При

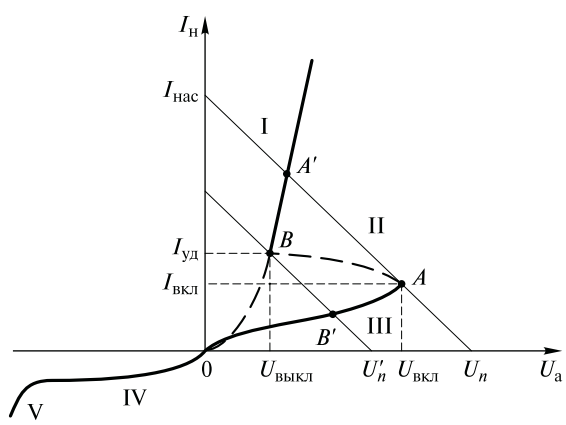


Рис. 8.9. Вольт-амперные характеристики динистора и нагрузочного резистора:

I — открытое состояние; II — область отрицательного сопротивления; III — область закрытого состояния; IV — область обратного смещения; V — область пробоя

уменьшении напряжения рабочая точка из B скачкообразно переходит в B' .

Обратная ветвь ВАХ динистора может быть разделена на две области: IV (область обратного смещения) и V (область пробоя структуры).

Таким образом, управление током I_n динистора возможно только за счет изменения величины и направления напряжения внешнего источника, приложенного между анодом и катодом прибора.

Тринистор представляет собой четырехслойную полупроводниковую структуру, в которой одна из базовых областей сделана управляющей (рис. 8.10). В зависимости от того, база какого условного транзистора сделана управляющей, различают тринисторы с анодным и катодным управлением.

Базовый вывод дает возможность управлять током близлежащего эмиттера. Для этого на управляющий электрод (УЭ) необходимо подать напряжение такой полярности, которая обеспечит отпирание соответствующего эмиттерного перехода. В этом случае процессы отпирания и запираания тиристора, т. е. управление его током I_n , осуществляют не за счет изменения приложенного между анодом и катодом напряжения внешнего источника (как у динистора), а за счет изменения напряжения на управляющем электроде, который является, как видно из рис. 8.10, входным электродом включенного в электрическую цепь тринистора. На рис. 8.11 приведены ВАХ тринистора, а на рис. 8.3, n , p — его условные

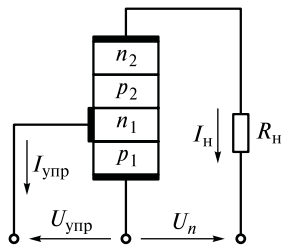


Рис. 8.10. Схема включения тринистора

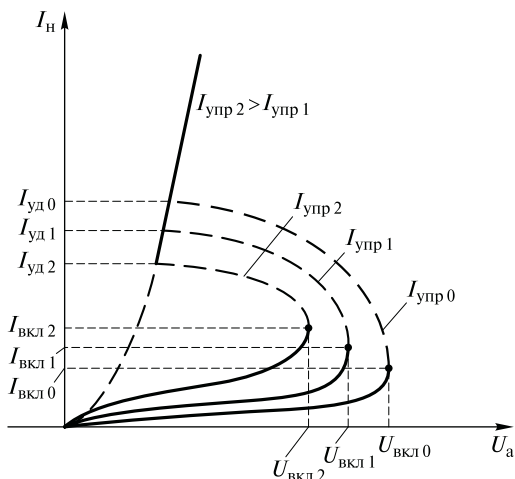


Рис. 8.11. Вольт-амперные характеристики тринистора

обозначения. Как видно из рис. 8.11, с возрастанием $U_{упр}$ (следовательно, $I_{упр}$) уменьшается напряжение включения тринистора и при достаточно большом значении $I_{упр}$ вид прямой ветви ВАХ тринистора будет аналогичен виду прямой ветви ВАХ диода.

8.7. Полупроводниковые приборы как элементы интегральных микросхем

Интегральную микросхему (ИС) или сборку можно получить либо в пластине твердого материала, либо на ее поверхности. В первом случае в теле полупроводникового материала создают слои резисторов, структуры транзисторов, диодов и конденсаторов, несущие заданные электронные функции. Такие ИС называются полупроводниковыми. На рис. 8.12 показаны электрическая схема и профиль структуры полупроводниковой ИС.

Во втором случае все элементы интегральной схемы (кроме активных) наносят на диэлектрическую пластину (подложку) в виде поликристаллических или аморфных слоев (пленок), выполняющих заданные функции пассивных элементов. Полученную ИС при необходимости помещают в корпус с внешними выводами. Активные элементы (диоды и транзисторы) навешивают на пленочную схему, в результате чего получают смешанную (пленочно-дискретную) ИС, которую называют гибридной. Электрическая схема и профиль структуры гибридной ИС показаны на рис. 8.13.

Наиболее распространены на практике и перспективны полупроводниковые ИС, так как они позволяют создавать надежные и достаточно сложные в функциональном отношении электронные устройства малых размеров при незначительной их стоимости.

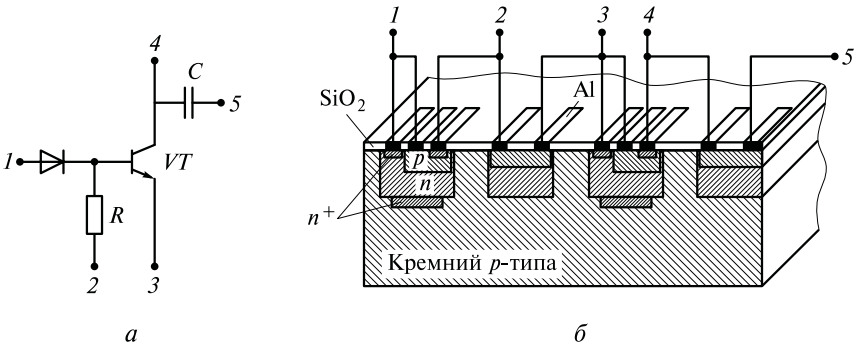


Рис. 8.12. Электрическая схема (а) и профиль структуры (б) полупроводниковой ИС

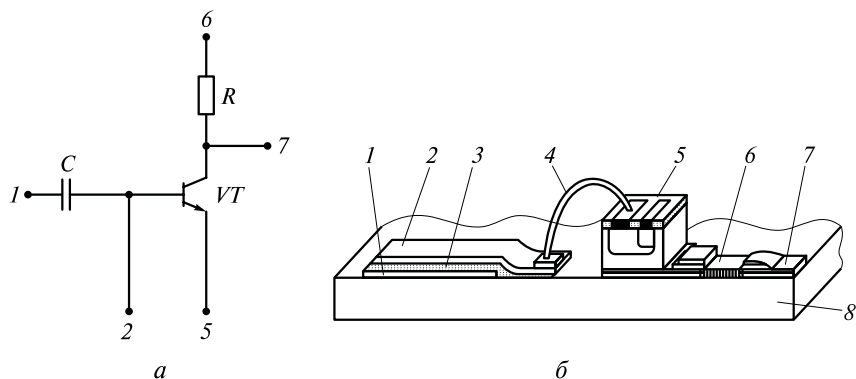


Рис. 8.13. Электрическая схема (а) и профиль структуры (б) гибридной ИС:

1 — нижняя обкладка конденсатора; 2 — верхняя обкладка конденсатора; 3 — слой диэлектрика; 4 — соединительная шина; 5 — транзистор с контактами; 6 — резистор с контактами; 7 — контактная площадка; 8 — диэлектрическая подложка

Характерной особенностью полупроводниковой ИС является отсутствие среди ее элементов катушки индуктивности и тем более трансформатора. Это объясняется тем, что до сих пор не удалось использовать в твердом теле какие-либо физические явления, эквивалентные электромагнитной индукции. Поэтому при разработке ИС стараются реализовать необходимую функцию без использования индуктивностей или применяют навесные индуктивные элементы.

Различают два класса полупроводниковых ИС — биполярные ИС и МДП ИС. Основным элементом биполярных ИС — $n-p-n$ -транзистор, а МДП ИС — МДП-транзистор с индуцированным каналом. Все остальные элементы схемы (диоды, резисторы и конденсаторы) изготавливают на базе основного элемента и одновременно с ним.

Функциональную сложность ИС принято характеризовать степенью интеграции, т. е. числом элементов (чаще всего транзисторов), входящих в состав интегральной схемы. Для количественной оценки степени интеграции используют условный коэффициент $K = \lg N$, где N — число элементов, входящих в ИС. При $K \leq 1$ (т. е. $N \leq 10$), схему называют простой ИС; $1 < K \leq 2$ — средней ИС (СИС); $2 < K \leq 3$ — большой ИС (БИС); $K > 3$ (т. е. $N > 1000$) — сверхбольшой ИС (СБИС).

Применение ИС вместо дискретных элементов в качестве элементной базы электронных устройств дает значительные преимущества по надежности, габаритным размерам, стоимости и другим показателям. Это связано с тем, что при использовании ИС отпадает необходимость в многочисленных паяных соединениях —

основном источнике ненадежности, резко сокращаются габаритные размеры и масса электронных устройств (благодаря отсутствию корпусов и внешних выводов у каждого элемента ИС), существенно снижается их стоимость за счет исключения множества сборочных и монтажных операций.

8.8. Индикаторные приборы

Индикаторными приборами называют приборы, предназначенные для визуального представления информации. Важность таких приборов трудно переоценить, так как до 80 % информации воспринимается человеком через органы зрения.

Рассмотрим индикаторные приборы, предназначенные для преобразования электрических сигналов в графические образы. В основу действия таких приборов положены различные физические явления и процессы, наибольшее распространение среди которых получили электролюминесценция, процессы в газовом разряде, светоизлучающие процессы в полупроводнике, оптические процессы в жидких кристаллах. Электролюминесценция и процессы, связанные с электрическим разрядом в газах, нашли применение в индикаторных электровакуумных приборах (ЭВП).

Явление свечения некоторых материалов при бомбардировке направленным пучком электронов используется в ЭВП, называемых электронно-лучевыми трубками (ЭЛТ).

Электронно-лучевые трубки подразделяют на трубки с электростатическим и магнитным управлением. В первых для управления пучком электронов применяют электрическое поле, а во вторых — магнитное.

Электронно-лучевые трубки с магнитным управлением получили широкое распространение в качестве устройств отображения информации и, в частности, в качестве индикаторных устройств дисплеев ЭВМ.

Электронно-лучевые трубки с электростатическим управлением обеспечивают более высокие частотные свойства, поэтому их широко используют в качестве индикаторов электронных осциллографов.

Конструкция ЭЛТ с электростатическим управлением схематически показана на рис. 8.14. Она представляет собой вакуумную стеклянную колбу, в узкой части которой расположены электронный прожектор (ЭП) и отклоняющая система (ОС). В торцовой части колбы находится экран (Э), покрытый специальным составом — люминофором, способным светиться при бомбардировке электронным пучком. Электронный прожектор состоит из подогреваемого нитью накала (Н) катода (К), модулятора (М) и двух анодов (A_1 и A_2).

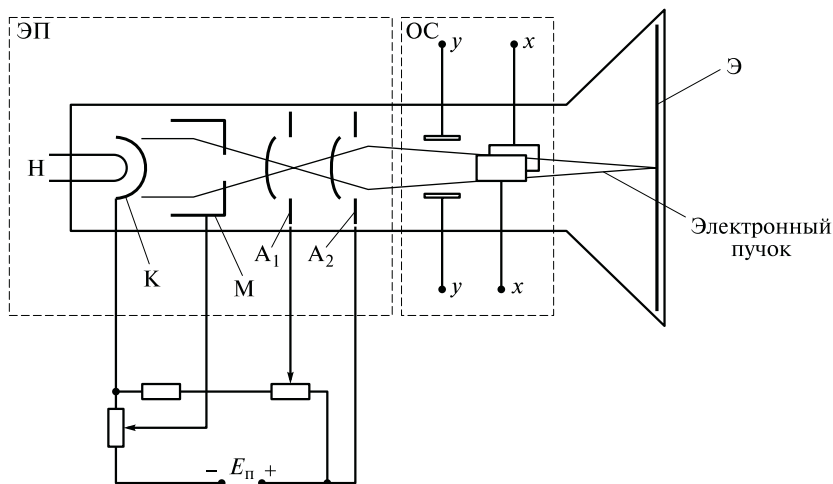


Рис. 8.14. Электронно-лучевая трубка с электростатическим управлением

Электроны, покинувшие катод, образуют электронное облако, которое под действием поля анодов движется в сторону экрана, формируя электронный пучок. Этот пучок проходит модулятор, выполненный в виде полого цилиндра с отверстием в донной части. К модулятору прикладывается отрицательное относительно катода напряжение в несколько десятков вольт. Это напряжение создает тормозящее поле, предварительно фокусирующее электронный пучок и изменяющее яркость свечения экрана. Для получения требуемой энергии (скорости) электронного пучка на аноды подается положительное относительно катода напряжение: на анод A_1 — несколько сотен вольт, а на анод A_2 — несколько тысяч вольт. Значение напряжения для анода A_2 выбирают из условия установки фокуса второй электростатической линзы в плоскости экрана.

Отклоняющая система ЭЛТ состоит из двух пар взаимно перпендикулярных пластин, расположенных симметрично относительно оси колбы. Напряжение, прикладываемое к пластинам, искривляет траекторию электронного пучка, вызывая тем самым отклонение светового пятна на экране.

Разработаны низковольтные индикаторные приборы, рабочее напряжение которых лежит в пределах от единиц до десятков вольт. Это вакуумные накаливаемые и люминесцентные, полупроводниковые и жидкокристаллические индикаторы. Конструкция таких индикаторов позволяет синтезировать из небольшого числа элементов (светоизлучающих сегментов) большое число цифр и букв, что по сравнению с газоразрядными индикаторами делает их более универсальными.

Низковольтные индикаторы по принципу действия классифицируют на активные (основаны на преобразовании энергии электрического тока в световой поток) и пассивные (основаны на модуляции внешнего светового потока под действием электрического поля). К первому классу относятся вакуумные накаливаемые, полупроводниковые и вакуумные люминесцентные индикаторы, ко второму — жидкокристаллические индикаторы.

Вакуумный накаливаемый индикатор представляет собой электровакуумный прибор, внутри которого расположены элементы излучения в виде нитей накаливания.

Из всех низковольтных приборов вакуумные накаливаемые индикаторы обладают самой высокой яркостью свечения, что позволяет эксплуатировать их в любых условиях внешнего освещения вплоть до прямого солнечного света. Цвет свечения индикатора соломенно-желтый. Внутреннее расположение нитей дает возможность отображать арабские цифры от 0 до 9, а также многие буквы русского и латинского алфавитов.

Полупроводниковый индикатор выполняют на основе светоизлучающих диодов. Используя различный исходный материал, можно получить светоизлучающие диоды с различным цветом свечения — от красного до зеленого. Светодиодные индикаторы изготавливают бескорпусными либо в металлическом, металлокерамическом или пластмассовом корпусе. При этом во всех конструкциях принимают специальные меры для визуального увеличения размеров индикатора: используют фокусирующие и диффузионные линзы, прозрачные пластмассовые корпуса, создают многократные отражения от внутренних поверхностей излучающего диода и т. д. Диаметр светового пятна индикатора составляет 1,5...4,0 мм.

Светоизлучающие диоды применяют автономно в виде семи — десяти сегментных знаков синтезирующих индикаторов либо набирают в матричные и мозаичные панели одного или различных цветов. В зависимости от размера символа в каждом сегменте может использоваться либо один, либо несколько последовательно включенных светодиодов. Высота символа в индикаторе колеблется от 2,5 до 25 мм.

Для составления многозарядных индикаторов однозарядные индикаторы объединяют в группы, содержащие от 2 до 12 приборов. Такие индикаторы широко применяют в микрокалькуляторах.

Наиболее универсальными являются матричные полупроводниковые индикаторы, позволяющие отображать арабские цифры от 0 до 9, римские цифры, буквы русского и латинского алфавитов, различные знаки и символы. Такие индикаторы представляют собой матрицы (панели), содержащие, например, 7×5 или 8×5 светоизлучающих светодиодов, соединенных таким образом,

что для высвечивания конкретной световой точки необходимо подать напряжение на выводы соответствующих строки и столбца.

Электрические параметры полупроводниковых индикаторов определяются как их конструкцией, так и типом исходного полупроводникового материала. Рабочее напряжение одного светодиода лежит в пределах от 1,5 до 2,5 В, а ток — от 3 до 20 мА.

Жидкокристаллический индикатор (ЖКИ) по своей природе пассивен, т.е. требует внешнего освещения, и работает за счет изменения оптической плотности жидкого кристалла. По способу использования внешнего освещения ЖКИ подразделяют на индикаторы, работающие на просвет и на отражение.

Конструктивно ЖКИ состоят из двух параллельно расположенных стеклянных пластин, на внутренних поверхностях которых нанесены пленочные электроды (рис. 8.15). Межэлектродное пространство заполнено жидкокристаллическим веществом. Один из электродов выполняется в виде рисунка отображаемого знака, а второй является общим. У ЖКИ, работающего на просвет, оба электрода прозрачны, а у ЖКИ, работающего на отражение, внутренний общий электрод имеет зеркальную поверхность. В зависимости от свойств используемых жидких кристаллов возможно получение одноцветных темных изображений на светлом фоне или светлых изображений на темном фоне. Возможно также получение цветных изображений. В настоящее время промышленностью выпускаются одноразрядные и многоразрядные цифровые, а также шкальные жидкокристаллические индикаторы. Индикаторы питаются переменным током, не содержащим постоянной составляющей, напряжением от 3 до 24 В. Ток потребления составляет десятки микроампер.

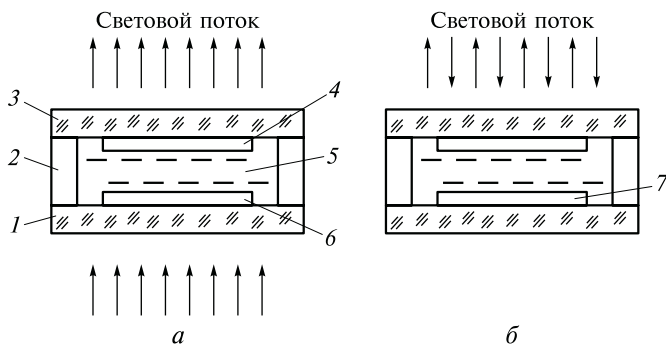


Рис. 8.15. Жидкокристаллические индикаторы, работающие на просвет (а) и отражение (б):

1, 3 — стеклянные пластины; 2 — клеевое соединение; 4 — передний прозрачный электрод; 5 — жидкокристаллическое вещество; 6 — задний прозрачный электрод; 7 — задний отражающий электрод

Основными преимуществами жидкокристаллических индикаторов являются сверхмалое потребление энергии, хорошие яркость и контрастность изображения при сильном внешнем освещении, согласованность по уровням напряжения с КМОП-интегральными схемами, простота конструкции и высокая долговечность. К недостаткам относятся малый интервал рабочих температур и большая инерционность.

8.9. Фотоэлектрические приборы.

Понятие об оптоэлектронных приборах

Фотоэлектрическими называют электронные приборы, преобразующие энергию излучения в электрическую энергию. Такие приборы могут строиться на фотоэффекте как в вакууме или газе, так и в полупроводнике. Наибольшее распространение получили фотоэлектрические приборы, принцип действия которых основан на внутреннем фотоэффекте. Суть его заключается в увеличении под действием внешнего света концентрации свободных носителей заряда, а следовательно, и электропроводности полупроводниковых материалов. Получаемая таким образом электропроводность называется фотопроводимостью. Она сочетается с собственной проводимостью полупроводникового материала. Фотопроводимость зависит от интенсивности и спектрального состава внешнего светового потока.

Внутренний фотоэффект может быть реализован в различных типах полупроводниковых приборов — фоторезисторах, фотодиодах и фототранзисторах.

Фоторезистор — полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого изменяется в зависимости от интенсивности и спектрального состава внешнего излучения. На рис. 8.16 показаны условное обозначение и типовые ВАХ фоторезистора для нескольких значений светового потока Φ . При отсутствии внешнего светового потока ($\Phi = 0$) сопротивление фоторезистора велико и определяется собственной электропроводностью полупроводникового материала. Ток, обусловленный собственной электропроводностью, называется тем-

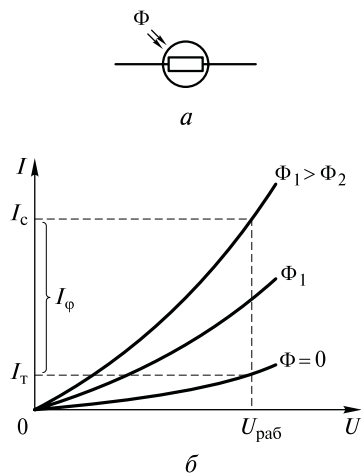


Рис. 8.16. Условное обозначение (а) и типовые ВАХ (б) фоторезистора

новым (I_T). Под действием светового потока сопротивление фоторезистора уменьшается. В этом случае ток называется световым (I_C). Разность между световым и темновым токами составляет фототок I_Φ . Конструктивно фоторезисторы выполняют в металлическом или пластмассовом корпусе с прозрачным окном, под которым расположен полупроводниковый материал.

Фотодиод по структуре аналогичен обычному полупроводниковому диоду. Отличие состоит в том, что его корпус снабжен дополнительной линзой, создающей внешний световой поток, направленный, как правило, перпендикулярно плоскости $p-n$ -перехода (рис. 8.17, а). Прибор может работать в режимах фотопреобразователя и фотогенератора (рис. 8.17, б).

В режиме фотопреобразователя в цепь фотодиода включают внешний источник питания (рис. 8.17, в), обеспечивающий обратное смещение $p-n$ -перехода. Если переход не освещен, то создается обратный темновой ток. При освещении перехода к темновому току добавляется фототок, значение которого не зависит от приложенного напряжения и пропорционально интенсивности светового потока Φ (см. рис. 8.17, б).

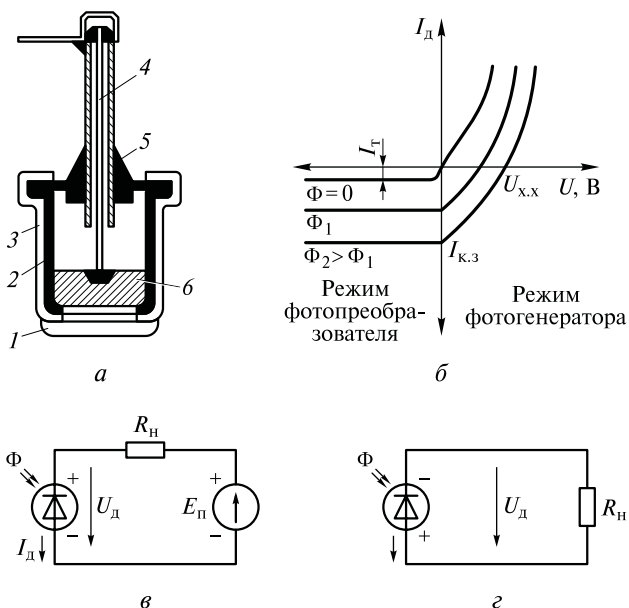


Рис. 8.17. Фотодиод:

а — конструкция; б — вольт-амперная характеристика; в — схема включения для фотопреобразовательного режима работы; г — схема включения для фотогенераторного режима работы; 1 — стеклянная линза; 2 — кристаллодержатель; 3 — корпус; 4 — внутренний вывод; 5 — герметизация корпуса; 6 — кристалл с $p-n$ -переходом

В режиме фотогенератора фотодиод сам является источником фотоЭДС (рис. 8.17, *з*), значение которой пропорционально интенсивности светового потока. Типовое значение фотоЭДС $E = U_x$ кремниевого фотодиода составляет 0,50...0,55 В, а значение тока короткого замыкания $I_{к.з}$ при среднем солнечном освещении равно 20...25 мА/см².

Структура фототранзистора аналогична структуре биполярного транзистора (рис. 8.18, *а*). Он обладает более высокой чувствительностью, чем фотодиод.

Световой поток воздействует перпендикулярно плоскости эмиттерного $p-n$ -перехода, генерируя в базе пары носителей заряда. Неосновные для базы носители заряда притягиваются коллекторным переходом, увеличивая коллекторный ток. Однако этот ток является только частью тока коллектора, так как уход из базы неосновных носителей создает в ней нескомпенсированный объемный заряд основных носителей. Этот заряд снижает потенциальный барьер эмиттерного перехода. В результате происходит увеличение количества носителей заряда, инжектируемых эмиттером в область базы, а следовательно, и увеличение коллекторного тока. Таким образом, в фототранзисторе происходит усиление фототока, что и объясняет большую чувствительность его по сравнению с фотодиодом.

Из рассмотренного принципа работы фототранзистора следует, что вывод базы является необязательным (рис. 8.18, *б*). Вольт-амперные характеристики фототранзистора, используемого без вывода базы, аналогичны характеристикам биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Отличие состоит в том, что управляющим параметром является не ток базы, а световой поток Φ (рис. 8.18, *в*).

Оптоэлектронный прибор содержит одновременно источник и приемник световой энергии. Для оптопары как входным, так и

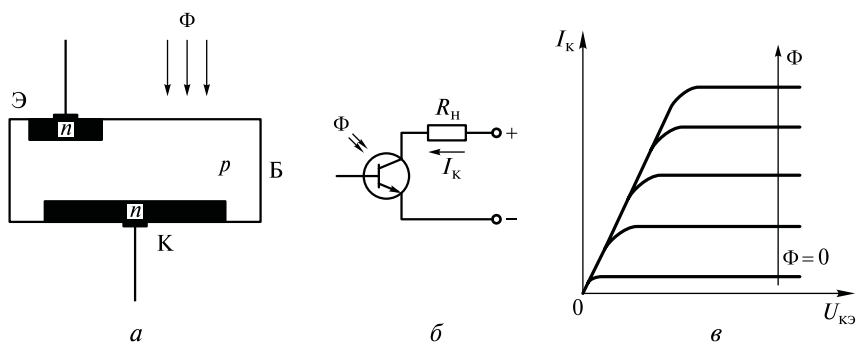


Рис. 8.18. Фототранзистор:

а — структура; *б* — схема включения; *в* — семейство выходных характеристик

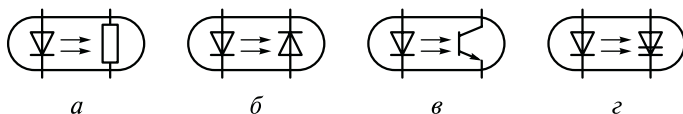


Рис. 8.19. Условные обозначения резистивной (а), диодной (б), транзисторной с биполярным транзистором (в) и тиристорной (г) оптопар

выходным параметром является электрический сигнал, причем гальваническая связь между входной и выходной цепями отсутствует. В качестве излучателя оптопары могут быть использованы инфракрасный излучающий диод, светоизлучающий диод, люминесцентный излучатель или полупроводниковый лазер. Наибольшее распространение в настоящее время получил инфракрасный излучающий диод, что объясняется простотой его структуры, управления и высокоим КПД. В качестве приемника оптопары находят применение фотоэлектрические приборы (фоторезистор, фотодиод, фототранзистор и др.). Условные обозначения оптопар, включающих различные приемники, приведены на рис. 8.19.

Для усиления и согласования выходного сигнала оптопары стандартным уровнем напряжения, используемым для передачи и преобразования цифровых сигналов, служат оптоэлектронные микросхемы. В них применяются, как правило, диодная оптопара (как обладающая максимальным быстродействием) и импульсный усилитель.

8.10. Выпрямители

Выпрямителями называются устройства, преобразующие переменное напряжение в постоянное.

В промышленности и в быту используются выпрямительные устройства большой мощности (электрический транспорт, электрохимия, электросварка и т.д.) и малой мощности (питание радиоэлектронных устройств, вторичные источники питания бытовых электроприборов). В выпрямительные устройства кроме выпрямителя обычно входят трансформатор, сглаживающий фильтр и стабилизатор.

С помощью трансформатора напряжение питающей сети повышается или понижается до необходимой для нагрузки величины. Одновременно с помощью трансформатора осуществляется гальваническая развязка нагрузки от сети, что повышает безопасность эксплуатации выпрямителя. Выпрямитель преобразует переменное напряжение в однонаправленное пульсирующее напряжение. Оно сглаживается фильтром. Стабилизатор обеспечивает постоянство напряжения на нагрузке при изменениях напряжения сети.

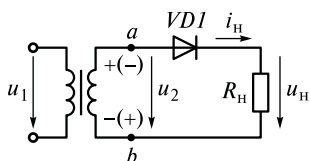


Рис. 8.20. Схема выпрямительного устройства с однополупериодным выпрямителем

Выпрямители по схеме подразделяются на однополупериодные, двухполупериодные, однофазные, трехфазные и многофазные.

Однофазный однополупериодный выпрямитель является простейшим выпрямителем. На рис. 8.20 показана схема выпрямительного устройства с однополупериодным выпрямителем без фильтра и стабилизатора.

В положительный полупериод питающего напряжения потенциал точки *a* больше потенциала точки *b*. Поэтому диод *VDI* открыт, практически все напряжение u_2 приложено к нагрузке R_H , и через нее течет ток $i_H = \frac{u_H}{R_H} \cong \frac{u_2}{R_H}$. В отрицательный полупериод потенциал точки *a* меньше потенциала точки *b*, диод *VDI* закрыт, ток нагрузки $i_H = 0$ (рис. 8.21).

Значение выпрямленного напряжения U_0 на нагрузке и его тока I_0 в таком выпрямителе

$$U_0 = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0,45U_2; \quad I_0 = \frac{U_0}{R_H},$$

где U_{2m} и U_2 — амплитуда и действующее значение напряжения u_2 .

Как видно из рис. 8.21, однополупериодный выпрямитель питает источник лишь в течение половины периода T . В другую половину периода источник не используется.

Двухполупериодные выпрямители свободны от такого недостатка. Двухполупериодные выпрямители обычно выполняются по двум схемам: с трансформатором со средней точкой (рис. 8.22, *a*) и мостовой (рис. 8.22, *б*).

В схеме, изображенной на рис. 8.22, *a*, в положительный полупериод u_2 напряжение на нагрузку подается через диод *VD1* (*VD2* при этом закрыт). В отрицательный полупериод u_2 диод *VD1* закрыт, а напряжение на нагрузку подается через диод *VD2*. Графики напряжения тока и нагрузки приведены на рис. 8.23.

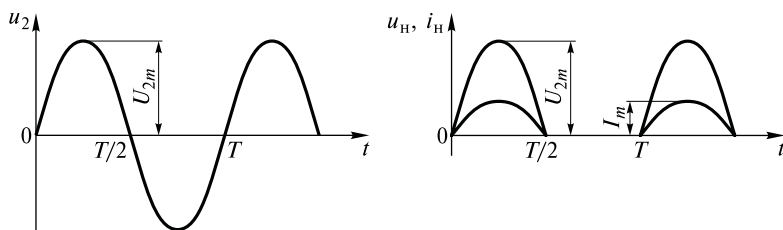


Рис. 8.21. Графики тока и напряжения однополупериодного выпрямителя

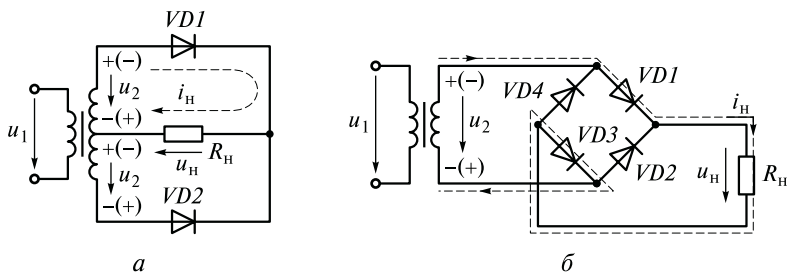


Рис. 8.22. Двухполупериодные выпрямители, выполненные по схеме с трансформатором со средней точкой (а) и по мостовой схеме (б)

Значение выпрямленного напряжения нагрузки U_0 и тока I_0 у двухполупериодного выпрямителя в два раза больше, чем у однополупериодного:

$$U_0 = \frac{2U_{2m}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0,9U_2; \quad I_0 = \frac{U_0}{R_2} = \frac{2U_{2m}}{\pi R_0} = \frac{2I_{2m}}{\pi},$$

где I_{2m} — максимальное значение тока в нагрузке, $I_{2m} = \frac{U_{2m}}{R_н}$.

Мгновенные значения напряжения и тока в нагрузке двухполупериодного мостового выпрямителя имеет такие же графики (см. рис. 8.23). В положительный полупериод напряжения u_2 открыты нечетные диоды $VD1$ и $VD3$, а в отрицательный — четные диоды $VD2$ и $VD4$. Напряжение нагрузки и однополупериодного, и двухполупериодного выпрямителя пульсирует от 0 до U_{2m} .

Схема трехфазного выпрямителя и график напряжения его нагрузки изображены на рис. 8.24.

В любой момент времени открыт один из диодов и напряжение на нагрузке пульсирует в интервале от $0,5U_m$ до U_m . Трехфазный выпрямитель состоит из трех однополупериодных выпрямителей, питающих общую нагрузку. График его напряжения на этой нагрузке получится, если изобразить три сдвинутых на $1/3$ периода T графика однополупериодного выпрямителя.

Трехфазный мостовой выпрямитель, или выпрямитель по схеме Ларионова, состоит из трех двухполупериодных выпрямителей, подключенных к каждой фазе и питающих общую нагрузку (рис. 8.25, а).

График напряжения на нагрузке такого выпрямителя получается совмещением графиков

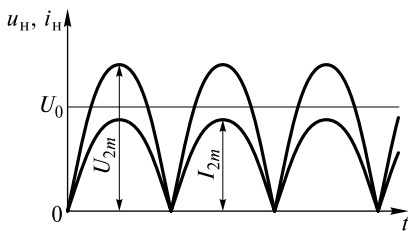


Рис. 8.23. Графики напряжения и тока нагрузки двухполупериодного выпрямителя

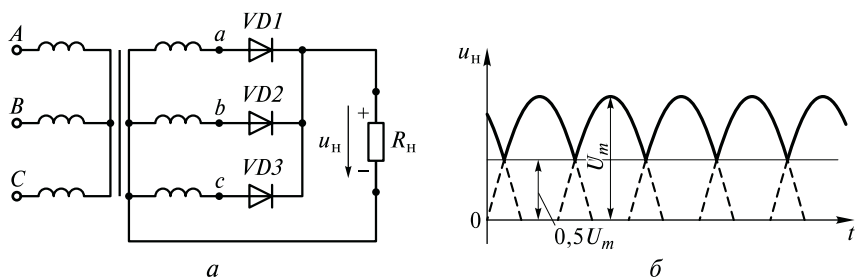


Рис. 8.24. Схема трехфазного выпрямителя (а) и график напряжения его нагрузки (б)

трех двухполупериодных выпрямителей, смещенных относительно друг друга на $1/3$ периода, или шести графиков однополупериодного выпрямителя, сдвинутых на $1/6$ периода T .

Как видно из графика пульсации напряжения на нагрузке у мостового трехфазного выпрямителя происходят еще в меньшем интервале от $\frac{\sqrt{3}}{2} U_m$ до U_m . В каждый момент времени открыты только два диода (рис. 8.25, б). С увеличением числа фаз и диодов пульсации выпрямленного напряжения уменьшаются, а их частота увеличивается. Для сглаживания высокочастотных пульсаций нужны фильтры с меньшими индуктивностями и емкостями, а следовательно, и меньшими размерами и массой.

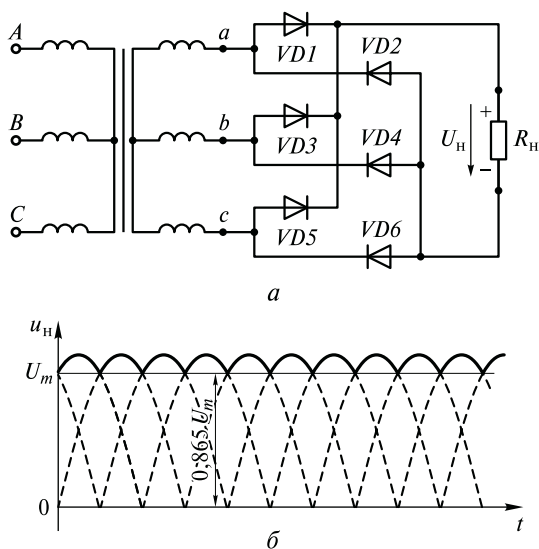


Рис. 8.25. Схема трехфазного мостового выпрямителя (а) и график напряжения его нагрузки (б)

Фильтры выпрямителей представляют собой фильтры низких частот, пропускающие токи и напряжения низких частот и ослабляющие токи и напряжения высоких частот. В простейшем случае сглаживающий фильтр может содержать только один элемент: либо конденсатор, включенный параллельно с нагрузкой, либо дроссель, включенный последовательно с нагрузкой. Качество

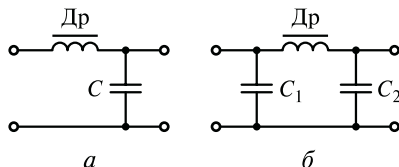


Рис. 8.26. Схемы Г-образного (а) и П-образного (б) сглаживающих фильтров нижних частот

работы фильтра оценивается коэффициентом сглаживания $k_c = \frac{q_1}{q_2}$, где q_1 и q_2 — коэффициенты пульсации на входе и выходе фильтра. Коэффициент пульсаций $q = \frac{U_{mn}}{U_0}$, где U_{mn} — амплитуда пульсаций, а U_0 — среднее значение пульсирующего напряжения.

Для увеличения коэффициента сглаживания применяются Г-образные и П-образные фильтры нижних частот (рис. 8.2, б).

8.11. Стабилизаторы постоянного напряжения

Напряжение питающей сети непостоянно. При одновременном подключении к сети многих потребителей оно уменьшается и становится ниже номинального (220 В), если потребителей мало, то напряжение может быть больше номинального. Включение и выключение мощных потребителей вызывает скачок напряжения в сторону понижения и повышения. Все эти изменения питающего напряжения неблагоприятно отражаются на работе электроприборов и электроустановок, ухудшая их характеристики или выводя их из строя.

Для поддержания напряжения на нагрузке с заданной точностью при изменении сопротивления самой нагрузки и изменении напряжения сети в определенных пределах служат стабилизаторы напряжения.

Стабилизаторы характеризуются коэффициентом стабилизации напряжения

$$k_{стU} = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх.ном}}{\Delta U_{вых} / U_{вых.ном}},$$

где $\Delta U_{вх} = U_{вх\ max} - U_{вх\ min}$; $\Delta U_{вых} = U_{вых\ max} - U_{вых\ min}$; $U_{вх.ном}$, $U_{вых.ном}$ — номинальные напряжения на входе и выходе стабилизатора; $U_{вх\ max}$, $U_{вх\ min}$ — максимальное и минимальное напряжения на входе;

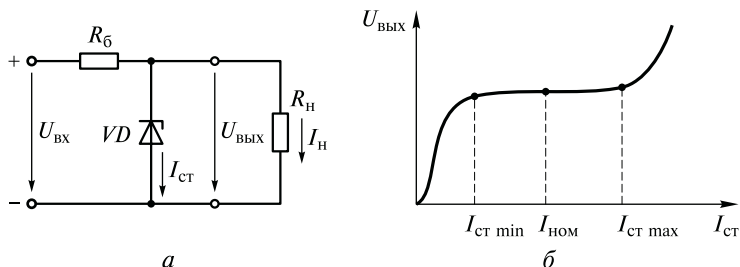


Рис. 8.27. Схема параметрического стабилизатора (а) и его характеристика (б)

$U_{\text{ВЫХ max}}$, $U_{\text{ВЫХ min}}$ — максимальное и минимальное напряжения на выходе стабилизатора.

Простейший (параметрический) стабилизатор постоянного напряжения показан на рис. 8.27, а, его характеристика — на рис. 8.27, б.

Стабилизирующим элементом стабилизатора является кремниевый стабилитрон VD . Балластное сопротивление $R_б$ ограничивает ток стабилитрона.

Такой стабилизатор называется параметрическим. Для удовлетворительной стабилизации необходимо, чтобы ток нагрузки $I_Н$ был меньше номинального тока $I_{\text{НОМ}}$ стабилитрона не менее, чем в 10 раз. При этом коэффициент стабилизации находится в пределах 20 ... 50.

8.12. Инверторы

Инверторами называются устройства, преобразующие постоянный ток в переменный.

Инвертор, передающий энергию от источника постоянного тока потребителю, который не потребляет энергию других источников переменного тока, называется автономным, или независимым.

Инвертор, отдающий энергию в сеть переменного тока, называется зависимым, или ведомым сетью.

В автономном инверторе частота выходного переменного напряжения определяется частотой переменного напряжения в цепи управления, а в зависимом инверторе напряжение и частота тока задаются сетью переменного тока.

Автономный инвертор содержит трансформатор, переключающие приборы, цепи управления режимом переключения, а также вспомогательные устройства.

В качестве переключающих приборов в инверторах применяют тиристоры, транзисторы, фототранзисторы и др.

Принципиальная электрическая схема инвертора на тиристорах показана на рис. 8.28. Импульсы на управляющие электроды тиристорov подаются поочередно от схемы управления. Между анодом и катодом тиристорov $VS1$ и $VS2$ приложено постоянное (прямое) напряжение U_0 . При отсутствии управляющих импульсов тиристоры закрыты.

Пусть в момент времени $t = t_0$ на управляющий электрод тиристора $VS1$ подается положительное (отпирающее) напряжение. Под действием этого напряжения тиристор $VS1$ открывается, а тиристор $VS2$ продолжает оставаться закрытым. Ток от источника постоянного напряжения замыкается через левую половину обмотки w_2 и открытый тиристор $VS1$. Одновременно через правую половину обмотки w_2 проходит ток заряда конденсатора i_C . В обмотках трансформатора w_2 наводится ЭДС одного направления, поэтому напряжение на конденсаторе $u_C = 2e_2$. Когда в момент времени $t = t_1$ на управляющий электрод тиристора $VS2$ подается положительное напряжение, то он открывается. Конденсатор C разряжается, и его ток замыкается сразу через два тиристора $VS1$ и $VS2$. Ток в тиристоре $VS1$ уменьшится до нуля и $VS1$ при отсутствии отпирающего сигнала на управляющем электроде закрывается, а $VS2$ продолжает оставаться открытым. Направление токов в обмотках w_2 и конденсаторе изменится на противоположное. Конденсатор перезаряжается, и напряжение меняет полярность (полярность указана в скобках, см. рис. 8.28). При последующем открывании тиристора $VS1$ конденсатор C обеспечивает коммутацию тока из цепи $VS2$ в цепь $VS1$. Зависимости $i_C(t)$ и $u_C(t)$ показаны на рис. 8.29.

Изменение тока в обмотках трансформатора происходит с частотой следования положительных импульсов, подаваемых на управляющие электроды тиристорov. Напряжение на нагрузке по форме повторяет напряжение на конденсаторе. Если между нагрузкой и инвертором включить фильтр нижних частот, то можно получить на нагрузке практически синусоидальное напряжение.

Процесс инвертирования можно рассматривать как явление, обратное выпрямлению.

В двухполупериодном выпрямителе с выводом нулевой (средней) точки вторичной обмотки трансформатора положительным полюсом выходного постоянного напряжения является общая точка

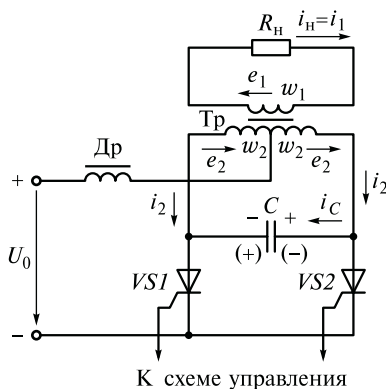


Рис. 8.28. Принципиальная схема инвертора на тиристорах

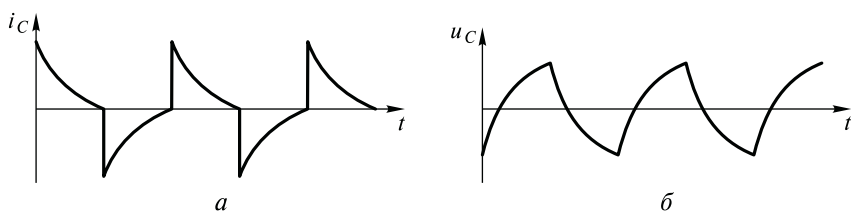


Рис. 8.29. Графики напряжения (а) и тока (б) в конденсаторе инвертора

катодов диодов, а отрицательным — средняя точка вторичной обмотки трансформатора (см. рис. 8.22). Нагрузка присоединяется между положительным и отрицательным полюсом, и ток в нагрузке направлен от положительного полюса к отрицательному, а ток во вторичных обмотках трансформатора проходит в период действия положительной полуволны переменной ЭДС в фазах вторичной обмотки трансформатора. Такое направление ЭДС и тока соответствует передаче этими обмотками энергии в нагрузку, включенную в цепь постоянного тока. В первичной обмотке трансформатора ток и ЭДС направлены навстречу друг другу, что означает потребление этой обмоткой энергии из сети переменного тока.

При инвертировании в сетевой обмотке ток и ЭДС имеют одинаковое направление, что означает передачу энергии в сеть переменного тока. Для выполнения этого условия вентили должны пропускать ток преимущественно при отрицательной переменной ЭДС во вторичной обмотке трансформатора. Эта обмотка, которая в схеме выпрямителя являлась вторичной, в схеме инвертора в связи с изменением направления потока энергии становится первичной. Такое направление тока через диоды обеспечивается присоединением положительного полюса источника постоянного напряжения U_0 к нулевой точке трансформатора и отрицательного полюса к общей точке катодов.

В зависимом инверторе схема управления переключает тиристоры таким образом, что частота инвертированного напряжения совпадает с частотой сети.

8.13. Электронные усилители

Усилителем называется устройство, предназначенное для повышения напряжения, тока или мощности входного сигнала. В линейном усилителе входной сигнал усиливается без искажения его формы.

Повышение мощности сигнала на выходе усилителя достигается преобразованием энергии источника питания постоянного тока в энергию усиливаемого сигнала.

Такое преобразование энергии осуществляется с помощью активных компонентов — транзисторов или электронных ламп. Соответственно усилители подразделяются на полупроводниковые и ламповые. В настоящее время применяются в основном полупроводниковые усилители в интегральном исполнении.

В общем случае электронные усилители являются многокаскадными устройствами. Отдельные каскады связаны между собой цепями, по которым передается усиливаемый сигнал. Каскады выполняют по схеме с общим эмиттером и общим истоком, с общим коллектором и общим стоком, с общей базой и общим затвором — повторителями тока.

Каскады с общим эмиттером и общим истоком называются усилительными каскадами, с общим коллектором и общим стоком — повторителями напряжения, с общей базой и общим затвором — повторителями тока.

Схема любого каскада состоит из источника питания, транзистора и цепей смещения, обеспечивающих режим транзистора по постоянному току (режим покоя).

Принципиальная электрическая схема усилительного каскада на биполярном транзисторе показана на рис. 8.30. В этой схеме транзистор включен в цепь источника питания последовательно резисторами R_K и R_3 . Режим покоя усилителя задается входным делителем R_1 , R_2 совместно с резисторами R_K и R_3 . Кроме того, резисторами R_1 , R_2 , R_3 стабилизируют коллекторный ток покоя при изменении окружающих условий.

Стабилизация будет тем лучше, чем меньше сопротивления R_1 и R_2 и чем больше R_3 .

Резистор R_3 создает сильную отрицательную обратную связь, препятствующую изменению коллекторного тока покоя. Однако стабилизирующее действие R_3 на ток I_K проявляется и при усилении переменного сигнала, что приводит к снижению коэффициента усиления. В усилителях переменного тока это нежелательное явление исключают, шунтируя резистор R_3 конденсатором большой емкости C_3 так, чтобы его реактивное сопротивление на частоте переменного сигнала было ничтожным по сравнению с R_3 . Конденсаторы C_1 и C_2 являются разделительными. Они разделяют по постоянному току соответственно цепь источника сигнала (C_1) и выход усилителя (C_2).

Принцип усиления переменного сигнала и определение рабочей точки в усилительном каскаде ил-

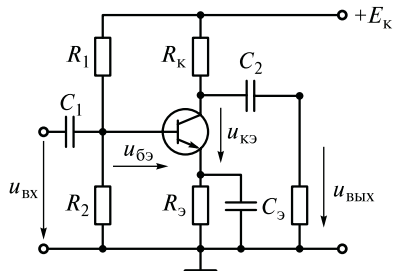


Рис. 8.30. Принципиальная электрическая схема усилительного каскада на биполярном транзисторе

люстрирует рис. 8.31. На рисунке приведено семейство выходных характеристик транзистора $I_K = f(U_{KЭ}, I_6)$. В отсутствие входного сигнала устанавливается режим покоя. Постоянный ток коллектора примерно равен току эмиттера. Это позволяет определить напряжение между коллектором и эмиттером U_K в режиме покоя, как $U_{KЭ} = E_K - I_K(R_K + R_Э)$. Функция $U_{KЭ} = f(I_K)$ описывает нагрузочную прямую каскада для постоянного тока. Она проходит через точку C , в которой $U_{KЭ} = 0$ и $I_K = \frac{E_K}{R_K + R_Э}$, а также точку B , в

которой $I_K = 0$ и $U_{KЭ} = E_K$. Точки пересечения нагрузочной прямой с характеристиками семейства $I_K(U_{KЭ}, I_6)$ соответствуют режиму покоя транзистора. Если с помощью $R_1, R_2, R_Э$ задан ток базы I_{6A} , то, построив выходную характеристику $I_K(U_{KЭ})$ для $I_{6A} = I_{63}$, — получим точку пересечения A , которая и является рабочей точкой в режиме покоя. Проекция точки A на ось ординат дает значение тока I_{KA} , а на ось абсцисс (точка F) — значение напряжения U_K в режиме покоя.

Под действием переменного входного сигнала ток базы изменяется от I_{65} до I_{61} .

Мгновенное значение переменной составляющей тока коллектора связано с переменными значениями тока базы соотношением $i_K = \beta i_6$. Эти изменения сказываются как в цепи R_K , так и

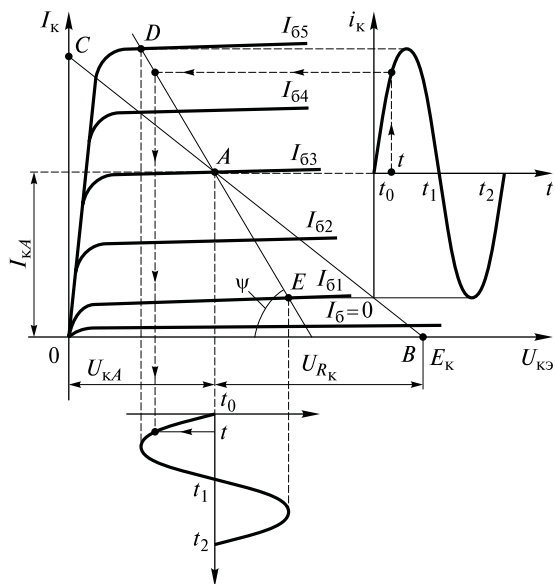


Рис. 8.31. Построение переменной составляющей коллекторного напряжения $u_K(t)$ в усилительном каскаде

в цепи R_H . Это означает, что эквивалентной нагрузкой каскада является параллельное соединение резисторов R_K и R_H , т.е.

$$R_{KH} = \frac{R_K R_H}{R_K + R_H}.$$

Линия нагрузки по переменному у току проходит через точку A под большим углом ψ . Эта линия пересекает ВАХ для максимального тока в точке D , а для минимального тока — в точке E . На рис. 8.31 приведено построение $i_K(t)$. Переменная составляющая коллекторного напряжения $u_K(t) = i_K(t)R_K$ является выходным сигналом усилителя. Сопоставляя кривые тока $i_K(t)$ и напряжения $u_K(t)$, можно отметить, что i_K и u_K имеют противоположные фазы (знаки). В то же время нетрудно установить, что сигнал $i_K(t)$ совпадает по фазе с входным сигналом $u_{вх}(t)$.

Таким образом, усилительный каскад с общим эмиттером инвертирует фазу входного сигнала.

Важную роль играют обратные связи в усилителях. Применяют способ введения отрицательной обратной связи в усилительный каскад с общим коллектором, когда нагрузку включают через разделительный конденсатор большой емкости в цепь эмиттера, как показано на рис. 8.32. При таком включении нагрузка напряжение обратной связи оказывается равным выходному напряжению $u_{вых}$, поэтому такая связь называется стопроцентной отрицательной обратной связью по напряжению.

Коэффициент усиления напряжения в каскаде не превышает единицы, т.е. $k_{U_{o.c}} = \frac{k_U}{1 + k_U} < 1$.

Напряжение на выходе усилителя как бы повторяет форму входного сигнала, отсюда рассматриваемый каскад получил еще одно название эмиттерного повторителя.

Эмиттерный повторитель имеет высокое входное и низкое выходное сопротивления, поэтому действует, как трансформатор сопротивлений, и широко применяется для согласования усилительных каскадов с низкоомной нагрузкой.

Многокаскадные усилители представляют собой последовательное соединение однотипных усилительных каскадов.

Наиболее просты усилители с емкостной связью (рис. 8.33). В них сигнал с коллектора предыдущего каскада передается на базу последующего через разделительный

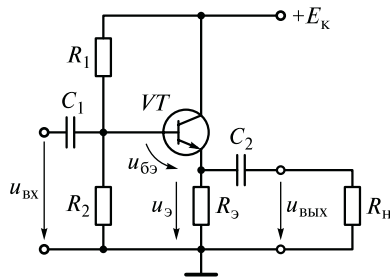


Рис. 8.32. Эмиттерный повторитель

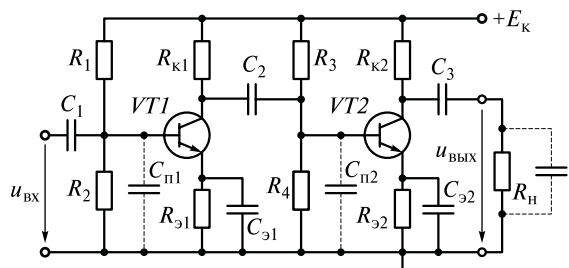


Рис. 8.33. Двухкаскадный усилитель

конденсатор, чем достигается независимость режимов покоя отдельных усилительных каскадов. Емкости $C_{п1}$ и $C_{п2}$ являются паразитными входными емкостями. В зависимости от параметров разделительных цепей эти усилители способны усиливать сигналы в широком диапазоне частот при относительном постоянстве коэффициента усиления напряжения в пределах полосы пропускания.

В усилителях в интегральном исполнении применяют непосредственную связь между каскадами. Такие усилители могут усиливать медленно изменяющиеся сигналы и даже сигналы постоянного тока и поэтому получили название усилителей постоянного тока.

Современные усилители постоянного тока усиливают сигналы в очень широком спектре частот и относятся к разряду широкополосных усилителей. Типичная зависимость коэффициента усиления от частоты в усилителе с непосредственной связью показана на рис. 8.34. Как видно из графика, верхняя граничная частота полосы пропускания $f_в$ определяется частотой, на которой коэффициент усиления вследствие шунтирующего действия паразитных емкостей транзисторов и нагрузки уменьшается в $\sqrt{2}$ раз. Недостатком усилителей с непосредственными связями является изменение выходного напряжения режима покоя (дрейф нуля) вследствие нестабильности напряжения питания, температуры и других факторов. Эффективным способом уменьшения дрейфа

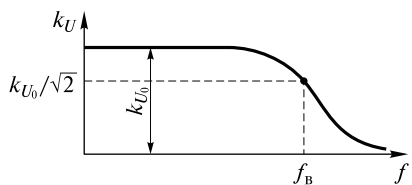


Рис. 8.34. Зависимость коэффициента усиления с непосредственной связью от частоты

нуля в таких усилителях является применение дифференциальных усилительных каскадов.

Дифференциальный усилительный каскад (рис. 8.35) представляет собой симметричную двухтранзисторную схему с объединенными эмиттерами, имеющую два входа и предназначенную для усиления только разности двух входных сигналов.

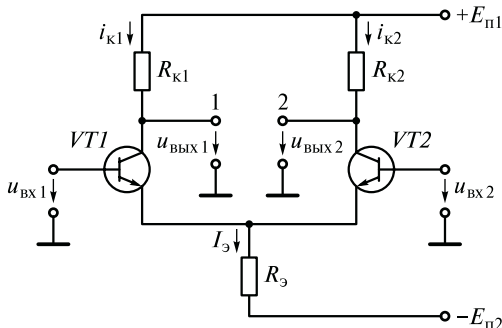


Рис. 8.35. Дифференциальный усилительный каскад

Выходной сигнал можно снимать либо с коллектора одного из транзисторов ($u_{\text{ВЫХ1}}$, $u_{\text{ВЫХ2}}$), либо в виде разности напряжений между коллекторами обоих транзисторов $u_{\text{ВЫХ1}} - u_{\text{ВЫХ2}}$.

При симметричном выходе (между коллекторами) схема позволяет в значительной степени уменьшить дрейф нуля выходного сигнала.

Дифференциальные усилители применяются в измерительных схемах, а также в качестве основного звена в операционных усилителях.

8.14. Операционные усилители

Операционным называют усилитель, выполненный в виде интегральной микросхемы.

Идеальным операционным усилителем будем называть усилитель постоянного тока (рис. 8.36) с дифференциальным входом и одним выходом, имеющий бесконечно большой коэффициент усиления напряжения (на схеме обозначено « ∞ »), бесконечно большое входное сопротивление и нулевое выходное сопротивление, т.е. $k_U = \infty$, $R_{\text{ВХ}} = \infty$, $R_{\text{ВЫХ}} = 0$.

Интегральные операционные усилители являются универсальными, выполняющими не только математические операции, но и генерирующими, усиливающими и преобразующими сигналы.

Результирующие характеристики устройства определяются только параметрами компонентов цепи внешней обратной связи.

В операционном усилителе в качестве входного используется дифференциаль-

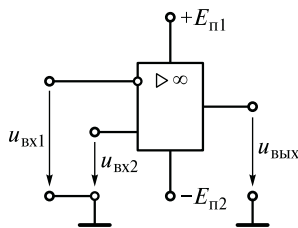


Рис. 8.36. Операционный усилитель постоянного тока

ный усилительный каскад, применение которого повышает стабильность выходного потенциала усилителя, а также расширяет его возможности благодаря наличию двух входов.

В зависимости от того, находится ли входной сигнал в противофазе или в фазе с выходным сигналом, различают инвертирующий (Вх.1 обозначен знаком инверсии \circ) и неинвертирующий (Вх.2) входы (рис. 8.36).

Для питания операционного усилителя обычно используют два разнополярных источника $+E_{п1}$ и $-E_{п2}$, позволяющие получить выходной потенциал, равный в состоянии покоя нулю.

В операционном усилителе внешние цепи обратной связи могут быть подключены к различным точкам микросхемы, в результате этого можно собирать самые разнообразные устройства на базе одного и того же усилителя.

Так как операционные усилители выполняют на базе дифференциальных усилительных каскадов, то они характеризуются теми же параметрами, что и дифференциальные усилители.

Одним из основных параметров операционного усилителя является дифференциальный коэффициент усиления напряжения k_U . Как правило, он очень высок и достигает нескольких миллионов.

Операционные усилители обладают весьма высоким входным сопротивлением (несколько сотен килоом) и низким выходным сопротивлением $R_{вых}$ (от нескольких десятков до нескольких сотен Ом).

Для построения линейных усилителей применяют операционные усилители с отрицательной обратной связью. В зависимости от того, на какой из входов подается напряжение входного сигнала, различают неинвертирующий и инвертирующий усилители.

В неинвертирующем усилителе (рис. 8.37, а) фазы сигналов на входе и выходе одинаковы. Входное напряжение подается на неинвертирующий вход, а с выхода усилителя через резистивный делитель R_1 , R_2 на инвертирующий вход подается напряжение отрицательной обратной связи. Обычно выполняется условие $R_2 \gg R_{вых}$ и $R_1 \leq R_{вх}$.

При построении инвертирующего усилителя (рис. 8.37, б) входной сигнал и сигнал обратной связи подаются одновременно на инвертирующий вход, а другой вход обычно заземлен. Если пренебречь входным током операционного усилителя, то входной ток i_1 и ток обратной связи i_2 в указанном усилителе связаны формулой, т. е. $i_1 = -i_2$. Так как коэффициент усиления интегрального операционного усилителя очень велик, то дифференциальный сигнал на его входе $u_{вх.д}$ очень мал.

Полученные выводы позволяют построить схему усилителя, осуществляющего суммирование входных напряжений. Для этого

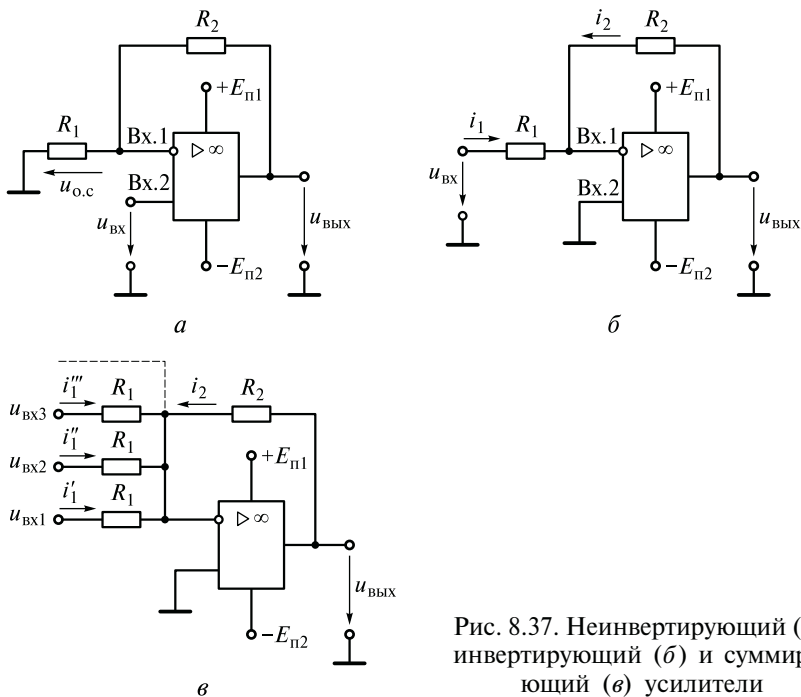


Рис. 8.37. Неинвертирующий (а), инвертирующий (б) и суммирующий (в) усилители

несколько входных сигналов (например, три) через одинаковые резисторы R_1 одновременно подаются на инвертирующий вход усилителя (рис. 8.37, в).

Операционный усилитель, включенный в цепь с тремя входами, выполняет алгебраическую операцию сложения напряжения и поэтому называется сумматором. Если R_1 или R_2 заменить конденсатором, то можно получить дифференцирующий или интегрирующий операционный усилитель.

8.15. Электронные генераторы

Генераторами называют автоколебательные (самовозбуждающиеся) системы, в которых энергия источника питания (постоянного тока) преобразуется в энергию переменного сигнала нужной формы.

В усилителе с положительной обратной связью сигнал обратной связи «помогает» входному сигналу, поэтому существенно возрастает коэффициент усиления напряжения.

Если абсолютное значение (модуль) произведения коэффициента усиления напряжения усилителя без обратной связи k_U на коэффициент передачи напряжения в цепи обратной связи γ_U ста-

нет больше единицы ($|k_U \gamma_U| > 1$), то усилитель с обратной связью самовозбуждается.

Если это условие выполняется на одной частоте, то усилитель становится генератором синусоидальных (гармонических) колебаний или близких к ним. Если же оно справедливо для широкого диапазона частот, то генерируются колебания сложной формы, часто близкие к прямоугольным.

В генераторе синусоидального напряжения усилитель с коэффициентом усиления k_U охвачен положительной обратной связью с коэффициентом передачи γ_U . На рис. 8.38, а цепь обратной связи показана четырехполюсником, включенным между выходом и входом усилителя. Выходной сигнал $u_{\text{вых}}$ через цепь обратной связи передается на вход в виде напряжения обратной связи $u_{\text{о.с}}$. Усилитель выполняется либо на транзисторах, либо на электронных лампах. Наибольшее применение в современной электронной аппаратуре получили транзисторные генераторы. На рис. 8.38, б показан транзисторный LC-генератор.

В схеме RC-генератора с нулевым сдвигом фазы (рис. 8.38, в) усилитель выполнен на двух транзисторах VT1 и VT2. На основе

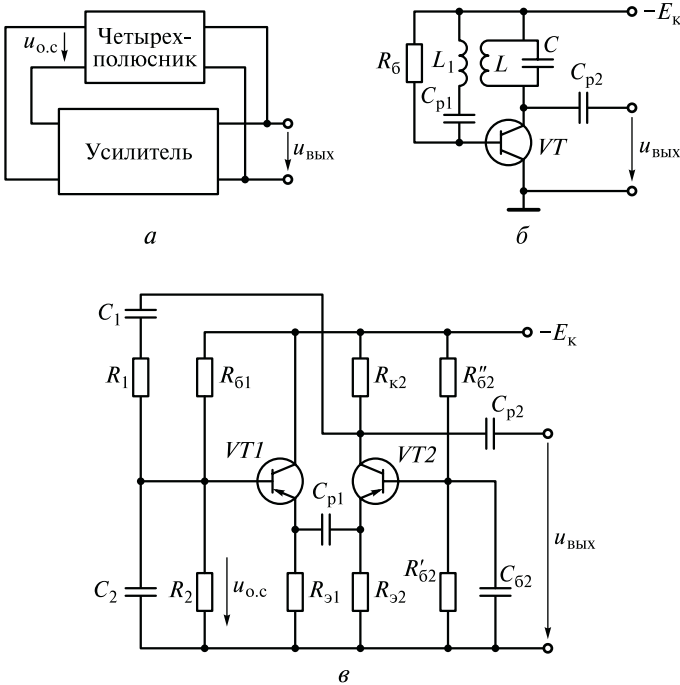


Рис. 8.38. Структурная схема электронного генератора (а), LC-генератор (б) и RC-генератор (в)

транзистора $VT1$ создан эмиттерный повторитель, а на основе транзистора $VT2$ — усилительный каскад с общей базой. Потенциал базы транзистора $VT2$ задается делителем R''_{62} , R'_{62} и поддерживается постоянным с помощью конденсатора C_{62} . Каскад с общей базой не инвертирует фазы входного сигнала.

В практических схемах такого типа обычно $R_1 = R_2 = R$; $C_1 = C_2 = C$ и для этих значений $\omega_0 = \frac{1}{RC}$; $\gamma_{U_6} = \frac{1}{3}$, а коэффициент усиления k_U должен быть больше трех.

8.16. Мультивибраторы

В рассмотренных генераторах синусоидального напряжения транзисторы работают в усилительном режиме. В отличие от них в генераторах импульсов транзисторы работают в ключевом режиме.

Мультивибраторы — импульсные генераторы с положительной обратной связью, в которых усилительные элементы (транзисторы, операционные усилители) работают в ключевом режиме.

Мультивибраторы не имеют ни одного состояния устойчивого равновесия, поэтому относятся к классу автоколебательных генераторов и выполняются на дискретных транзисторах, интегральных логических элементах и на операционных усилителях.

На рис. 8.39, *а* приведена схема мультивибратора на операционном усилителе. С помощью делителя напряжения R_2 , R_1 осуществляется положительная обратная связь с выхода $OУ$ на неинвертирующий вход ($V_{х.2}$), а RC -контур в цепи инвертирующего входа является времязадающим элементом. Операционный усилитель работает в ключевом режиме и выполняет роль схемы сравнения.

На рис. 8.39, *б* показана передаточная характеристика $OУ$ — зависимость выходного напряжения $u_{\text{вых}}$ от напряжения между входами $u_{\text{вх}}$ (разности $u_{\text{вх1}} - u_{\text{вх2}}$). Напряжение на входах $u_{\text{вх1}}$ и $u_{\text{вх2}}$ сравниваются между собой и, когда $u_{\text{вх1}} = u_{\text{вх2}}$, т.е. $u_{\text{вх}} = 0$, происходит переключение операционного усилителя в состояние, характеризующее либо высоким выходным напряжением $U_{\text{м}}^+$ (состояние положительного насыщения), либо низким выходным напряжением $U_{\text{м}}^-$ (состояние отрицательного насыщения).

Временные диаграммы выходного напряжения $u_{\text{вых}}$ и напряжения на конденсаторе u_C , иллюстрирующие принцип функционирования мультивибратора, показаны на рис. 8.39, *в*. В момент времени $t=0$ напряжение на конденсаторе сравнивается с пороговым напряжением $U_{\text{пор}} = \gamma U_{\text{м}}^-$ и происходит быстрое переключение $OУ$ из состояния отрицательного насыщения в состояние положительного насыщения, а выходное напряжение скачком изменяется от $U_{\text{м}}^-$ до $U_{\text{м}}^+$. При этом напряжение $u_{\text{вх2}}$ устанавливается равным $U_{\text{пор1}} = \gamma U_{\text{м}}^+$ и конденсатор начнет заряжаться с постоянной време-

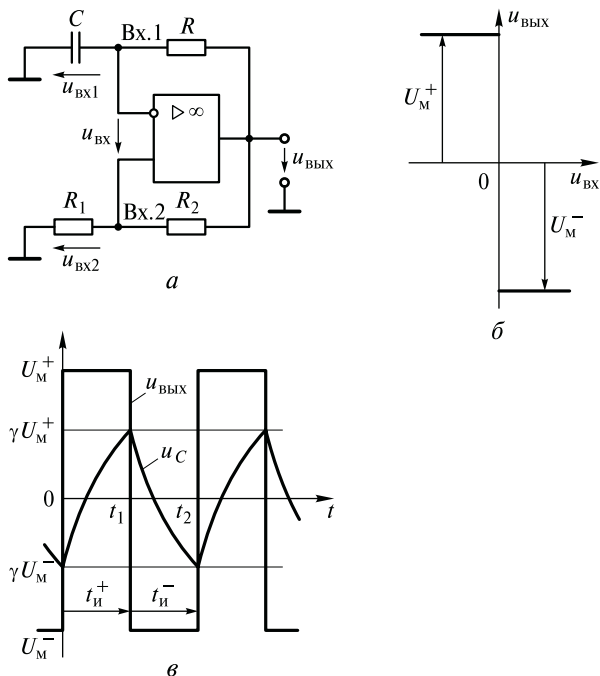


Рис. 8.39. Схема мультивибратора на ОУ (а), передаточная характеристика ОУ (б), временные диаграммы мультивибратора (в)

ни $\tau = RC$. В момент времени $t = t_1$ напряжение u_C становится равным $U_{\text{пор1}}$ и ОУ скачком переключается от U_M^+ до U_M^- . При этом напряжение на выходе устанавливается равным U_M^- , а на неинвертирующем входе $U_{\text{пор2}} = \gamma U_M^-$. После этого конденсатор начнет разряжаться с постоянной времени $\tau = RC$. В момент времени $t = t_2$ напряжение u_C равно $U_{\text{пор2}}$ и происходит переключение ОУ.

Период колебания выходного напряжения $T = t_{\text{и}}^+ + t_{\text{и}}^-$. При одинаковых значениях U_M^- и U_M^+ $t_{\text{и}}^+ = t_{\text{и}}^-$ мультивибратор считается симметричным.

Через параметры элементов схемы период колебания определяется по формуле $T = 2RC \ln \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right)$.

8.17. Логические элементы

Логическими элементами называют электронные устройства, выполняющие простейшие логические операции.

Логические функции и логические операции над ними составляют предмет алгебры логики, или булевой алгебры. В основе ал-

гебры логики лежат логические величины, которые обозначают латинскими буквами A, B, C, D и т.д. Логическая величина характеризует два взаимоисключающих понятия: «есть» и «нет», «черное» и «нечерное», «включено» и «выключено» и т.п. Если одно из значений логической величины обозначено через A , то второе обозначают через \bar{A} (т.е. «не A »).

Для операций с логическими величинами удобно применять двоичный код, полагая $A = 1, \bar{A} = 0$ или, наоборот, $A = 0, \bar{A} = 1$. В двоичной системе исчисления одна и та же схема может выполнять как логические, так и арифметические операции. Если понятие «не A » обозначить особой буквой, например B , то связь между B и A будет иметь вид: $B = \bar{A}$.

Это простейшая логическая функция, которую называют отрицанием, инверсией или функцией НЕ. Схему, обеспечивающую такую функцию, называют инвертором, или схемой НЕ. Условное обозначение схемы НЕ показано на рис. 8.40, *а*. Функция инверсии характеризуется кружком на выходной стороне прямоугольника. Функция отрицания является функцией одной переменной. Приведем примеры логических функций двух переменных.

Пример. Логическое сложение, или функция ИЛИ: $C = A + B$. Эта функция определяется следующим образом: $C = 1$, если $A = 1$ или $B = 1$, либо одновременно и $A = 1$, и $B = 1$. Обозначение схемы ИЛИ показано на рис. 8.40, *б*.

Логическое умножение, или функция И: $C = A \cdot B$. Эта функция определяется следующим образом: $C = 1$, только если одновременно и $A = 1$, и $B = 1$. Обозначение схемы И показано на рис. 8.40, *в*.

Сочетание функции ИЛИ с инверсной выражается комбинацией ИЛИ—НЕ (рис. 8.40, *г*): $C = \bar{A} + \bar{B}$. Аналогично сочетание И с инверсией выражается комбинацией И—НЕ: $C = \overline{A \cdot B}$ (рис. 8.40, *д*).

Функции ИЛИ—НЕ и И—НЕ — самые распространенные, так как на их основе можно реализовать любую другую логическую функцию. Количество переменных, а значит, и количество входов у соответствующих схем может быть равно трем, четырем и более.

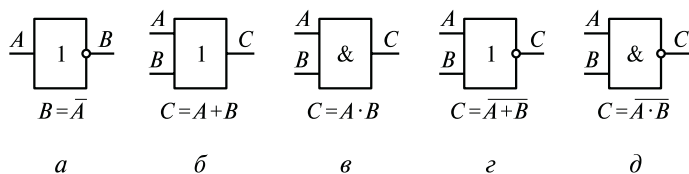


Рис. 8.40. Логические элементы для выполнения простейших логических операций:

а — НЕ; *б* — ИЛИ; *в* — И; *г* — ИЛИ—НЕ; *д* — И—НЕ

В логических элементах логические нули и единицы обычно представлены различными значениями напряжения: напряжением (или уровнем нуля) U^0 и напряжением (или уровнем единицы) U^1 . Если уровень единицы больше уровня нуля, то говорят, что схема работает в положительной логике, в противном случае ($U^1 < U^0$) она работает в отрицательной логике. Никакой принципиальной разницы между положительной и отрицательной логиками нет. Более того, одна и та же схема может работать и в одной, и в другой логике.

Разность уровней единицы и нуля называют логическим перепадом: $U_{\text{л}} = U^1 - U^0$.

Естественно, логический перепад должен быть достаточно большим, чтобы единицы и нули четко отличались друг от друга и чтобы случайные помехи не «превращали» один уровень в другой.

Инверторы могут быть выполнены на основе транзисторных ключей с общим эмиттером и общим истоком. В зависимости от входного сигнала транзистор может находиться либо в открытом состоянии (выходное напряжение U_0 мало, а ток максимален), либо в закрытом состоянии (выходное напряжение велико U_3 , а ток минимален). Напряжение U_0 соответствует уровню логического нуля U^0 , оно появляется на выходе, когда на входе действует отпирающий сигнал (уровень логической единицы U^1). Напряжение U_3 соответствует уровню логической единицы U^1 , оно устанавливается на выходе, когда на входе действует запирающий сигнал (уровень логического нуля).

Схемы ИЛИ и И могут быть выполнены на резисторах (резисторная логика), на диодах (диодная логика), на транзисторах (транзисторная логика). Чаще всего эти схемы применяются в сочетании с инвертором, и тогда они реализуют функции ИЛИ—НЕ, И—НЕ. Наиболее широкое применение получила схема И—НЕ типа ТТЛ-транзистора транзисторного логического элемента.

В логических схемах выходная величина определяется только входными сигналами на данный момент времени и не зависит от предыстории во входных цепях. Поэтому можно сказать, что логические схемы не обладают свойством запоминать предыдущие состояния.

Однако, комбинируя логические схемы ИЛИ—НЕ или И—НЕ, можно создать устройства, обладающие памятью. Такими устройствами являются двухстабильные ячейки — триггеры.

Триггерами называют электронные устройства, обладающие двумя состояниями устойчивого равновесия и способные скачкообразно переключаться из одного состояния в другое каждый раз, когда входной (управляющий) сигнал превосходит определенный уровень, называемый порогом срабатывания.

Триггеры можно разбить на два класса: симметричные и несимметричные. Симметричные триггеры применяются в качестве

элементов памяти и делителей частоты на 2. На их основе строятся регистры сдвига и счетчики в цифровых ЭВМ. Несимметричные триггеры как пороговые устройства применяются в преобразователях непрерывных сигналов в дискретный (цифровой) код, в различителях амплитуды сигнала в качестве разрядного устройства в генераторах импульсов.

Симметричные триггеры сравнительно просто компонуются из двух логических схем ИЛИ—НЕ и И—НЕ, которые соединяются определенным образом: выход одной логической схемы соединяется со входом другой, а выход другой — с входом первой. Другими словами, логические схемы соединяются перекрестными связями.

На рис. 8.41, *а* показана логическая структура симметричного триггера, выполненного на двух одинаковых транзисторных схемах ИЛИ—НЕ на два входа. На схеме выход C_1 соединен с входом A_2 , а выход C_2 — с входом A_1 (перекрестно). Оставшиеся два входа B_1 и B_2 служат для управления работой триггера. Принципиальная электрическая схема триггера показана на рис. 8.41, *б*. Собственно триггер как двухстабильная ячейка выполнен на транзисторах $VT1$ и $VT3$, т. е. на этих транзисторах создана схема с положительной обратной связью: выход (коллектор) транзистора $VT1$ соединен с входом (базой) транзистора $VT3$, а выход транзистора $VT3$ — с входом транзистора $VT1$. Схема триггера симметрична по своей конфигурации. Триггер имеет два состояния устойчивого равновесия, в которых он может находиться неограниченно долго: $VT1$ — закрыт, $VT3$ — открыт; $VT1$ — открыт, $VT3$ — закрыт. Таким образом, симметричному триггеру свойственна электрическая (в смысле режимная) асимметрия.

Симметричный триггер наиболее часто применяют в качестве элемента памяти. В этом триггере выходной потенциал может принимать два существенно различных друг от друга значения, каждое из которых соответствует логической единице или логическо-

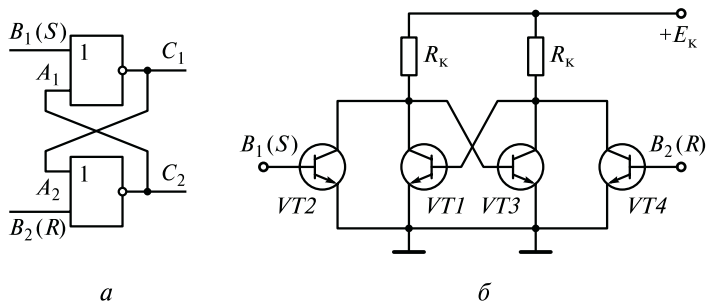


Рис. 8.41. Логическая структура (*а*) и принципиальная электрическая схема (*б*) триггера

му нулю. Установленное в триггере состояние (или, по-другому, записанная информация) сохраняется до тех пор, пока под действием входного сигнала не произойдет его переключения. Триггер переключается из одного состояния в другое с помощью вспомогательных (управляющих) транзисторов $VT2$ и $VT4$.

Управляющими входами являются входы B_1 (S -вход) и B_2 (R -вход). Такое управление работой триггера называется раздельным.

8.18. Большие интегральные микросхемы и микропроцессоры

Большой интегральной микросхемой называется многомерное полупроводниковое изделие, содержащее большое число одно-родных ячеек, соединенных в сложную функциональную схему со степенью интеграции $2 < k \leq 3$.

Выпускаемые в настоящее время БИС содержат более 10 тыс. логических элементов.

Все БИС можно разбить на три класса: функциональные блоки — счетчики, регистры, стековые накопители, арифметико-логические устройства (АЛУ); запоминающие устройства (ЗУ); микропроцессоры.

Первые БИС были выполнены на основе МДП-структур. В настоящее время в элементную базу БИС входят также биполярные структуры.

Мы рассмотрим более подробно микропроцессоры — устройства, получившие самое широкое применение в различных отраслях промышленности.

Микропроцессором называется цифровая интегральная схема (одна или несколько) высокой степени интеграции, являющаяся функционально законченным изделием, в состав которой входят, как минимум, основные узлы процессора: арифметическое и логическое устройство, дешифратор команд и устройство управления.

Микропроцессор служит для логической обработки, хранения и преобразования данных. В настоящее время для разработки систем управления сложными устройствами — станками, летательными аппаратами, автомобилями, измерительными приборами — нет необходимости выбирать дискретный транзистор и интегральную схему малой степени интеграции, а можно сразу применить универсальное по своим возможностям полупроводниковое устройство управления — микропроцессор.

В так называемый микропроцессорный комплект могут входить до сотни микросхем (оперативная и постоянная память, устройства прерывания, прямого доступа к памяти; контроллеры клавиатуры электронно-лучевой трубки; программируемые таймеры и т. п.).

Разработано большое количество микропроцессорных комплектов. Например, микропроцессорный комплект серии К580 выполнен по технологии n -канальных МОП-транзисторов, включает в себя три процессорных и десять вспомогательных интегральных схем. Его параметры следующие: время выполнения команды — 2 мкс; число команд — 78; максимальная емкость адресуемой памяти — 64 Кбайт; потребляемая мощность — не более 1,5 Вт. Микропроцессорный комплект серии К583 выполнен по технологии дополняющих МОП-структур (КМОП), включает три процессорных и восемь вспомогательных микросхем. Характеризуется следующими параметрами: время выполнения команды — не более 0,75 мкс; разрядность — 16; потребляемая мощность — не более 1 мВт.

Контрольные вопросы

1. Какие виды пробоя $p-n$ -перехода существуют и в чем их отличие?
2. В чем заключается принцип действия биполярного транзистора?
3. Какой из схем включения биполярного транзистора отдается предпочтение и почему?
4. Поясните статические характеристики транзистора.
5. В чем различие принципа действия полевого транзистора с $p-n$ -переходом МДП-транзистором?
6. Каким преимуществом обладает тринистор по сравнению динистором?
7. Чем отличаются полупроводниковые интегральные схемы от гибридных?
8. Поясните принцип действия ЭЛТ с электростатическим управлением.
9. На каких физических свойствах и явлениях основан принцип действия различных индикаторных приборов?
10. Что такое активные и пассивные индикаторы?
11. Какие существуют разновидности конструкций полупроводниковых индикаторов?
12. Как устроена осциллографическая электронно-лучевая трубка с электростатическим управлением?
13. Объясните принцип действия полупроводникового диода.
14. Как выглядит ВАХ диода?
15. Какими параметрами характеризуются кремниевые стабилизаторы?
16. Нарисуйте простейшую схему стабилизации постоянного напряжения.
17. Как устроен биполярный транзистор?
18. Какие режимы работы различают у транзисторов?
19. Нарисуйте ВАХ транзистора в схеме с общей базой.
20. Как изображаются входные и выходные характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером?

21. Укажите основные разновидности полевых транзисторов.
22. Объясните принцип действия полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом.
23. Какими параметрами характеризуются полевые транзисторы?
24. Как устроен МДП-транзистор?
25. Объясните принцип действия тиристорного инвертора постоянного тока.
26. Что такое инверторы, ведомые сетью?
27. Объясните назначение всех компонентов в схемах усилительных каскадов с общим эмиттером и общим коллектором.
28. Какие виды межкаскадной связи могут быть использованы в электронных усилителях и каковы их характерные особенности?
29. Какими основными параметрами характеризуется операционный усилитель?
30. С какой целью используется отрицательная обратная связь в операционных усилителях?
31. Чем отличаются схемы инвертирующего и неинвертирующего усилителя, выполненные на базе ОУ?
32. Что такое ключевой режим работы транзисторов?
33. Объясните принцип действия мультивибратора на ОУ.
34. Перечислите основные логические функции.
35. Что такое триггер?

Темы рефератов

1. Полупроводниковые диоды.
2. Биполярные транзисторы.
3. Операционные усилители.
4. Гибридные интегральные схемы.
5. Полупроводниковые интегральные схемы.
6. Выпрямители и инверторы.

9.1. Назначение и классификация электрических аппаратов

В электрических системах, в которых происходит производство, транспортирование и распределение электроэнергии, а также в электрических цепях, где эта электроэнергия потребляется, необходимо осуществлять различные коммутации (подсоединения), проводить управление технологическим процессом, т. е. включать и выключать оборудование. Кроме различных коммутаций необходимо защищать электрические цепи и приемники от аварийных ситуаций.

Для осуществления перечисленных функций на практике служат электрические аппараты — устройства, позволяющие включать, выключать, переключать электрическое и технологическое оборудование, осуществлять контроль, управление и защиту этого оборудования. По назначению электрические аппараты подразделяются на следующие группы:

- коммутирующие аппараты распределительных устройств, передающих линий и генерирующих установок;

- аппараты управления режимом работы различных электрических устройств;

- реле и регуляторы, выполняющие функцию защиты и управления работой электрооборудования;

- датчики регулирования и контроля, создающие электрические сигналы, соответствующие различным технологическим процессам.

Большинство электрических аппаратов содержат в конструкции однотипные элементы, обусловленные включением и выключением электрооборудования. Это следующие элементы: электрические контакты; устройства отключения, предусматривающие устранение электрической дуги; приводные устройства.

Рассмотрим некоторые особенности работы указанных элементов.

9.2. Основные элементы и особенности работы электрических аппаратов

Электрические контакты. Различные соединения частей электрооборудования, подключения и отключения его от системы электроснабжения осуществляются с помощью электрических контак-

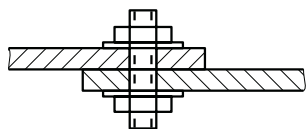


Рис. 9.1. Неподвижные контакты

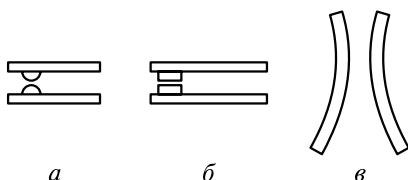


Рис. 9.2. Подвижные контакты:
а — точечные; б — плоские; в — скользящие

тов. Различают следующие виды электрических контактов: неподвижные и подвижные. Неподвижные (рис. 9.1) применяются при жестком креплении токопроводящих частей. Подвижные контакты подразделяются на точечные (рис. 9.2, а), плоские (рис. 9.2, б) и скользящие (рис. 9.2, в). В точечных и плоских контактах детали замыкаются и размыкаются в точках первоначального соприкосновения. В скользящих контактах во время коммутации происходит перемещение соприкасаемых деталей относительно друг друга.

В месте соприкосновения любых типов контактов возникает сопротивление, которое называется переходным сопротивлением контакта. Так как соприкасаемые поверхности контактов не идеально ровные, то при замыкании возникают бугорки и впадинки в месте контакта (рис. 9.3). Линии тока в месте контакта будут искривляться и стремиться к бугоркам, сопротивление электрическому току возрастает, что и объясняет появление переходного сопротивления контакта.

Чтобы обеспечить надежное соединение контактов, их нужно прижать с определенным усилием. Чем больше усилие, тем больше площадь соприкосновения контактов и, следовательно, меньше переходное сопротивление контакта. Необходимое усилие в месте контакта создается с помощью пружинных устройств или с помощью электромагнитной силы. Переходное сопротивление контакта зависит от площади соприкосновения, материала контактов, силы сжатия контактов. Переходное сопротивление контакта может возрастать в десятки и сотни раз вследствие окисления контактных поверхностей или их деформации. Контакты изготавливаются из материалов, хорошо проводящих электрический ток (медь, металлокерамические соединения). В ряде случаев контакты покрывают серебром, золотом для придания устойчивости окислению. Для повышения износоустойчивости добавляют вольфрам или используют металлокерамику.

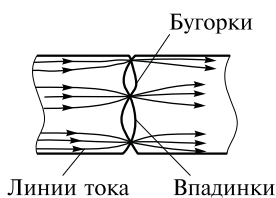


Рис. 9.3. Контактное сопротивление

Электрическая дуга и устройства отключения. Отключение электрической цепи, по

которой протекал ток, происходит не мгновенно и сопровождается появлением электрической дуги. Электрическая дуга, если ее вовремя не погасить, может разрушить контакты и привести к более серьезной аварии. Появление электрической дуги в электрических цепях было открыто русским ученым В. В. Петровым и в настоящее время дуга широко используется в технике при сварке металлов. Но в электрических цепях появление дуги относится к вредным факторам, так как температура в дуге может достигать 10 000... 12 000 °С (температура поверхности Солнца 6000 °С).

Упрощенно появление электрической дуги можно объяснить следующим образом. Во время отключения происходит значительное уменьшение площади контакта. Ток, протекая через оставшиеся бугорки контакта, сильно их разогревает. В результате воздушное пространство вблизи контактов начинает ионизироваться и, следовательно, становится проводящим. Ток начинает проходить через ионизированную воздушную (или другую газообразную среду), и развивается дуга, если ее вовремя не прервать. Частицы материала контактов могут появляться в ионизированном пространстве.

Факторы, влияющие на образование дуги: температура контактов; напряжение отключаемой цепи; материал контактов и окружающая его среда; расстояние между контактами (длина дуги); время отключения; род тока; тип нагрузки.

Наиболее опасным для возникновения дуги являются цепи постоянного тока. Отключать цепи переменного тока легче, так как имеются моменты времени, когда ток равен нулю. Дуга возникает обычно при отключении электрических цепей электроприемников, содержащих индуктивность (трансформаторы, электрические машины, электромагниты и т.д.). Другим важным фактором, влияющим на образование дуги, является величина напряжения. Чем больше напряжение сети, тем сложнее отключить такую цепь и тем быстрее образуется электрическая дуга. При низких напряжениях дуга почти не образуется.

Чтобы предотвратить появление электрической дуги, необходимо выполнить следующие требования:

- отключение электрической цепи должно проводиться быстро; длина дуги должна быть как можно больше, для чего дугу выдувают в специальную дугогасительную камеру, где она гаснет;

- температура контактов не должна превышать заданных значений (может использоваться дополнительное охлаждение контактов);

- отключение должно проводиться в благоприятной среде (масло, вакуум).

Часто аппараты конструируются на основе только нескольких указанных требований, которых бывает достаточно для устранения дуги в конкретном аппарате.

Приводные устройства аппаратов. Электрические аппараты осуществляют коммутацию с помощью автоматического или ручного (неавтоматического) включения и выключения.

Неавтоматические аппараты содержат механическое устройство, позволяющее включать и выключать аппарат, т. е. замыкать и размыкать контакты. К таким аппаратам относятся рубильники, переключатели, низковольтные выключатели, разъединители и т. д. Эти аппараты позволяют замыкать и размыкать цепь при ручном воздействии.

Автоматические аппараты содержат приводные устройства, позволяющие замыкать и размыкать контакты. В большинстве случаев эти устройства представляют собой электромагнит или пневматический привод, с помощью которых происходит включение, удержание и отключение контактов. К автоматическим аппаратам относятся контакторы, высоковольтные выключатели, пускатели, реле и др.

9.3. Коммутирующие аппараты распределительных устройств и передающих линий

Коммутирующие аппараты распределительных устройств и передающих линий устанавливаются на стороне высокого напряжения. К ним относятся разъединители, выключатели, предохранители.

Разъединители. *Разъединитель* — простейший выключатель высокого напряжения, позволяющий отключать, включать и переключать участки высоковольтной цепи под напряжением, но при отсутствии тока. Это простой аппарат, не имеющий устройств для гашения дуги. Для включения разъединителей применяют как ручное, так и автоматическое управление. Разъединитель не может отключать электроустановки при коротких замыканиях и нагрузке.

Выключатель нагрузки — разъединитель, снабженный дугогасительным устройством. Выключатель нагрузки позволяет размыкать электрические цепи, по которым протекает номинальный ток. Последовательно с выключателем нагрузки обычно включаются плавкие предохранители для защиты от короткого замыкания.

Выключатели высокого напряжения. Эти устройства должны отключать установки под нагрузкой и при коротких замыканиях. Выключатель высокого напряжения является сложным аппаратом и характеризуется электродинамической (по отношению к электромагнитным силам) и термической стойкостью. Важной характеристикой выключателя является номинальная мощность отключения и номинальный ток отключения выключателя. В промыш-

ленности широко применяются масляные, воздушные и вакуумные выключатели.

В масляных выключателях (рис. 9.4) для предупреждения возникновения дуги и ее гашения при размыкании контакты помещены в бак с минеральным маслом.

В воздушных выключателях имеется компрессор, позволяющий иметь мощную воздушную струю, которая и гасит возникающую электрическую дугу при отключении выключателя.

В вакуумных выключателях размыкание контактов происходит в вакуумной камере. В вакууме нет газа, следовательно, нет ионизации, поэтому условия образования дуги затруднены.

После отключения электрической цепи выключатель находится под напряжением. Для ремонта и профилактического обслуживания выключателя обычно последовательно с ним с двух сторон устанавливают разъединители.

Предохранители. Электрические сети и электроустановки нуждаются в защите. Все электроустановки, электрические сети, системы электроснабжения имеют защитные устройства. Простейшим защитным аппаратом в электрической цепи является плавкий предохранитель. Предохранитель автоматически отключает электрическую цепь при перегрузке или при коротком замыкании.

Наиболее употребительными являются трубчатые предохранители (рис. 9.5) и пробочные предохранители (рис. 9.6). Трубчатый предохранитель состоит из корпуса 5, плавкой вставки 4 в виде тонкой проволоки или пластины, контактов 1, 8. Плавкие вставки изготавливаются из сплавов, содержащих свинец, олово, медь и

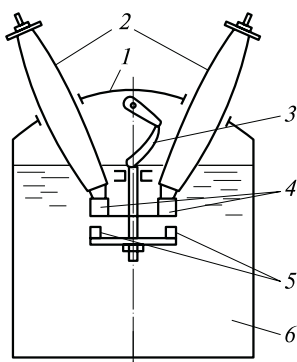


Рис. 9.4. Выключатель масляный:

1 — бак; 2 — изоляторы; 3 — рычажный механизм; 4 — неподвижные контакты; 5 — подвижные контакты; 6 — масло

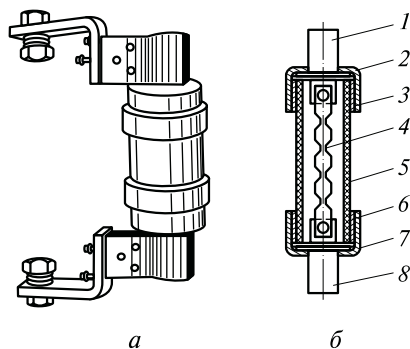


Рис. 9.5. Трубчатый предохранитель:

а — внешний вид; б — конструкция; 1, 8 — контакты; 2, 7 — латунные колпаки; 3, 6 — латунные колпаки; 4 — плавкая вставка; 5 — корпус

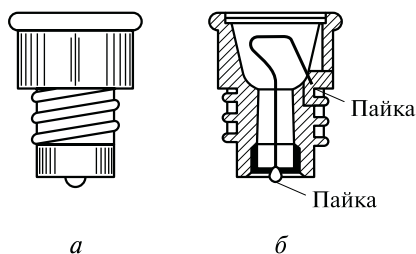


Рис. 9.6. Пробочный предохранитель:

a — внешний вид; *б* — разрез

другие элементы. Они имеют малое электрическое сопротивление и способны продолжительное время работать при номинальном токе вставки $I_{вст}$. Действие предохранителя основывается на том, что они включаются последовательно в электрическую цепь и если ток в цепи превышает ток вставки $I > I_{вст}$, то легкоплавкая вставка перегорает и цепь отключается. Обычно ток вставки выбирается несколько

больше, чем номинальный ток установки $I_{вст} = (1,15 \dots 1,6) I_{ном}$.

Трубчатые предохранители изготавливают на токи 15...1000 А. Большинство этих предохранителей снабжается дугогасительными средствами внутри корпуса (обычно это кварцевый песок, фибра и т.д.).

Пробковые предохранители применяются для защиты бытовых приборов, осветительных установок и небольших электродвигателей. Корпус пробочного предохранителя связан с током. Чем больше ток цепи, тем короче фарфоровый корпус предохранителя. В патрон на 6 А нельзя вставить предохранитель на 15 А.

9.4. Аппараты управления режимом работы различных электротехнических устройств

К аппаратам управления режимами работы электротехнических устройств относят аппараты ручного управления, контакторы, устройства защиты, пускатели, автоматы.

Аппараты ручного управления. К таким аппаратам относятся рубильники, пакетные, поворотные и перекидные выключатели, различные командоаппараты, переключатели. Все эти аппараты предназначены для включения, отключения и переключения электрических цепей при ручном управлении.

Выключатели и переключатели применяются для включения и отключения бытовых приборов, осветительных и маломощных электрических цепей переменного и постоянного тока. Обычно ток таких аппаратов не превышает 15 А. Они выполняются одно- и двухполюсными в пластмассовом или защищенном металлическом корпусе. Способны отключать цепь при номинальной нагрузке, для чего имеются специальные пружины для быстрого отключения. Это предотвращает появление дуги. По конструкции выключатели могут быть поворотными, перекидными, и кнопочными.

Рис. 9.7. Пакетный выключатель:

1 — валик с рукояткой; 2 — крышка камеры; 3 — шпилька; 4 — скоба; 5 — профильное отверстие; 6 — изоляция; 7 — подвижные контакты; 8 — неподвижные контакты

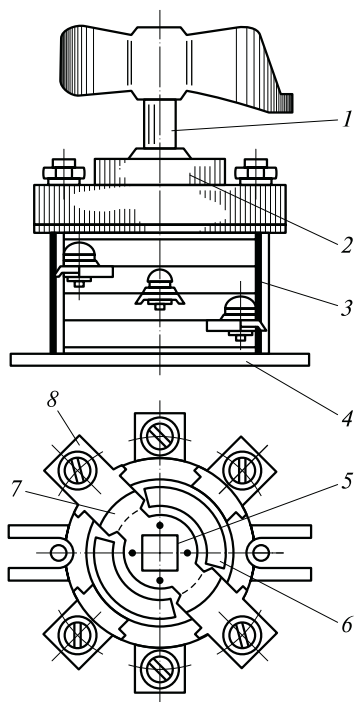
Пакетные выключатели и переключатели предназначены для коммутации в цепях постоянного и переменного тока при номинальных токах до 100 А. Их используют для пуска небольших двигателей, для включения и выключения различных электроустановок.

Пакетные выключатели состоят из отдельных колец — пакетов, внутри которых находится контактная система с неподвижным и подвижным контактом (рис. 9.7). Каждый пакет содержит одну пару контактов или один полюс. Комбинируя количество пакетов, можно собрать пакетный выключатель с любым количеством полюсов. Пакетные выключатели содержат закрытую камеру и искрогасительные шайбы, а также пружину, позволяющую производить быстрое отключение цепи. Это позволяет исключить появление дуги при отключении.

Контакторы. Контакторами называются электромагнитные выключатели, предназначенные для включения и выключения силовых электрических цепей. Они используются для управления работой электродвигателей и других электропотребителей. Контактор имеет мощные контакты, дугогасительное устройство, что позволяет ему включать и отключать силовые цепи под нагрузкой, а также отключать их в аварийных режимах при коротком замыкании. Контакторы применяются в цепях постоянного и переменного тока, в цепях постоянного тока — одно- и двухполюсные, в цепях переменного тока — двух-, трех- и четырехполюсные.

На рис. 9.8 показана конструкция контактора постоянного тока с дугогасительной камерой и магнитным дутьем.

Контактор состоит из неподвижного 3 и подвижного 5 силовых контактов, электромагнита с магнитным сердечником 1 и обмоткой 2, якоря 7, дугогасительной камеры 4, устройства для магнитного дутья. Дугогасительное устройство показано на рис. 9.9 и представляет собой дугогасительную камеру 1, которая жестко связана с сердечником 3, ферромагнитными пластинами 2, образующими магнитную систему. Эта магнитная система под воздей-



ствием тока витка 4 создает магнитное поле в пространстве, где находятся силовые контакты. Обычно контакторы содержат еще одну или несколько пар дополнительных контактов.

Работа контактора происходит следующим образом (см. рис. 9.8): при замыкании цепи обмотки 2 якорь 7 притягивается к сердечнику 1 и контакты 3 и 5 замыкаются. С помощью дополнительных контактов, не показанных на рисунке, цепь катушки 2 остается замкнутой и контактор остается включенным. При отключении управляющей цепи с обмоткой 2 пружина 6 действует на якорь 7 и контакты 3 и 5 размыкаются. При размыкании контактов 3...5 между ними возникает дуга. Дуга представляет собой ионизированное пространство, через которое продолжает протекать ток I . Магнитное поле, созданное ферромагнитными пластинами 2 и сердечником 3 (см. рис. 9.9), воздействует на ток дуги, а значит, и на дугу, и выдувает ее в дугогасительную камеру, где она и гаснет.

Дополнительные контакты контактора позволяют реализовать автоматический режим работы электроустановки и упростить управление режимом его работы.

Устройства защиты. Виды защиты. Все электрические цепи и устройства должны быть защищены. Самой простой защитой являются плавкие предохранители, но они не позволяют автоматизировать работу электроустановки и, кроме того, предохранитель — это аппарат одноразового пользования, что не очень удобно, поэтому на практике применяют и другие защитные устройства.

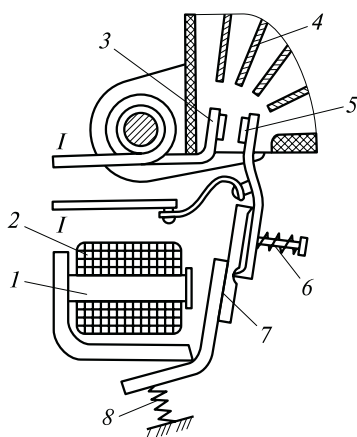


Рис. 9.8. Контактор:

1 — магнитный сердечник; 2 — обмотка катушки; 3 — неподвижный контакт; 4 — дугогасительная камера; 5 — подвижный контакт; 6 — пружина; 7 — якорь; 8 — пружина

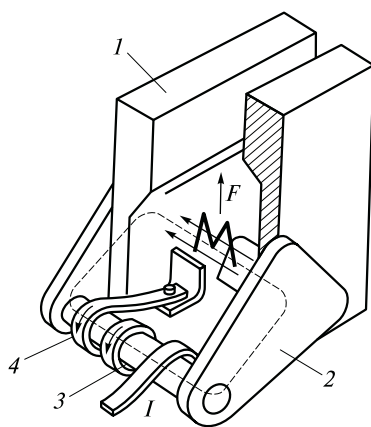


Рис. 9.9. Дугогасительное устройство:

1 — дугогасительная камера; 2 — ферромагнитная пластина; 3 — сердечник; 4 — обмотка ферромагнитного стержня (виток)

Основными защитными устройствами являются: тепловая защита; защита максимального тока; защита от повышенного и пониженного тока; защита от повышенного и пониженного напряжения сети; дифференциальная защита и т.д. Принципиально можно защищать электрические цепи от многих факторов.

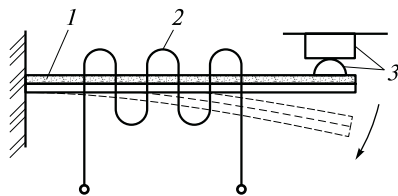


Рис. 9.10. Тепловое реле:

1 — биметаллическая пластинка; 2 — обмотка; 3 — контакты

Тепловая защита электроустановок.

Предназначена для защиты электроустановок от перегрузки по току. При возрастании тока резко возрастает нагрев всех элементов электрической цепи (пропорционально квадрату тока), что может привести к выходу из строя электрооборудования и даже пожару. Для защиты от перегрузок обычно применяют тепловое реле. Схема простейшего теплового реле приведена на рис. 9.10. Основным элементом теплового реле является биметаллическая пластинка 1, на которую намотана обмотка 2. Биметаллическая пластинка состоит из спая двух разнородных металлов и при нагревании пластинка изгибается, что приводит к размыканию контакта 3. После охлаждения пластинка возвращается в исходное положение и реле опять готово к работе. При номинальном токе пластинка не деформируется, но стоит только току превысить номинальное значение, происходит изгиб пластины.

Защита максимального тока. В тех случаях, когда надо защищать электроустановки от токов короткого замыкания применяют защиту максимального тока. Это устройство быстродействующее и обычно реализуется на базе электромагнитного реле, хотя есть и электронные варианты. Конструкция электромагнитного реле тока приведена на рис. 9.11. Реле содержит магнитопровод (сердечник) 5, на который намотаны обмотки 3, 6. В воздушном зазоре сердечника имеется якорь 4 в виде лепестка, находящийся на одной оси с пружиной 7 и контактным мостиком 2.

При протекании в обмотках 3, 6 тока якорь-лепесток 4 старается повернуться к полюсам сердечника 5, но удерживается противодействующей пружиной 4. Если ток превышает контролируемое значение, то лепесток поворачивается и контактный мостик замыкает неподвижные контакты. В систему управления электроустановки посылается сигнал о превышении тока. После снижения тока до нормы якорь возвращается в исходное положение.

Контролируемое значение тока можно регулировать с помощью регулировочного устройства 1. Время срабатывания реле максимального тока при коротком замыкании обычно не превышает 0,02 с.

Защита от перенапряжения и понижения напряжения. Для защиты электрической сети и электроустановки от перенапряжения

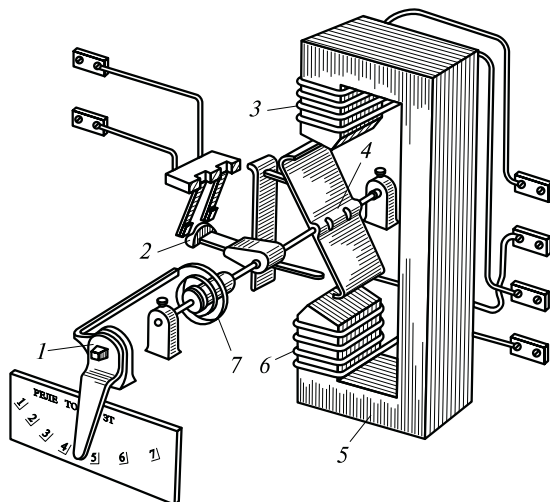


Рис. 9.11. Реле максимального тока:

1 — регулировочное устройство; 2 — контактный мостик; 3, 6 — обмотки; 4 — якорь; 5 — магнитопровод (сердечник); 7 — пружина

(повышенного напряжения) применяют защитные реле напряжения. Обычно применяют электромагнитные или электронные реле. Конструктивно электромагнитные реле мало отличается от токового реле. В реле напряжения обмотка сердечника подключается к контролируемому напряжению и в отличие от токового реле содержит большее количество витков. В основном принцип работы тот же самый.

Понижение напряжения сети можно контролировать с помощью обычного электромагнитного реле. При пониженном напряжении якорь электромагнита отпускается и контакты реле размыкаются.

Дифференциальная защита. Для защиты электрических цепей от утечек тока при повреждении изоляции обычно применяют дифференциальные реле. Их настраивают на ток утечки, обычно 30, 45 или 100 мА. Конструктивно дифференциальные реле представляют собой электромагнитное реле с двумя обмотками для однофазных цепей и постоянного тока или с тремя обмотками для трехфазных цепей. Суммарная намагничивающаяся сила от всех обмоток в нормальном режиме равна нулю. При возникновении токов утечки появляется намагничивающаяся сила и реле срабатывает.

Автоматические воздушные выключатели (автоматы). При нарушении нормального режима работы электроустановок (перегрузки, короткие замыкания, снижение или повышение напряжения) необходимо электроустановки отключать от сети. Для этой цели

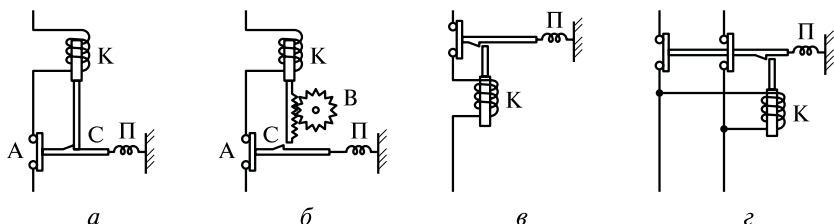


Рис. 9.12. Расцепители автоматов:

а — максимального тока; *б* — с выдержкой времени; *в* — минимального тока; *г* — пониженного напряжения

служат автоматические воздушные выключатели (автоматы). Автоматы позволяют обеспечить более высокую точность защиты по сравнению с предохранителями и многократность действия.

Автоматы снабжены хорошими силовыми контактами и дугогасящими устройствами. В зависимости от назначения автоматы содержат различные типы расцепителей (один или несколько). На рис. 9.12 представлены несколько типов расцепителей: максимального тока (см. рис. 9.12, *а*); с выдержкой времени (см. рис. 9.12, *б*); минимального тока (см. рис. 9.12, *в*); пониженного напряжения (см. рис. 9.12, *г*). После срабатывания расцепителя, который удерживается защелкой, пружина П с помощью сердечника С размыкает контакты. Автоматы бывают одно-, двух-, трех- и четырехполюсными и изготавливаются на токи короткого замыкания от 6 до 5000 А.

Пускатели. Магнитные пускатели представляют собой аппараты, в которые входят как составные части контакторы и тепловые реле. Магнитные пускатели широко используются для управления асинхронными двигателями. Пускатели делятся на неререверсивные и реверсивные. Реверсивные пускатели позволяют осуществлять запуск асинхронного двигателя в обоих направлениях и содержат два контактора. На рис. 9.13 показана схема неререверсивного пускателя переменного тока. Управление пускателя осуществляется с помощью двух кнопок *S2*—пуск, *S1*—стоп, которые находятся вне корпуса пускателя. После замыкания кнопки *S2* цепь катушки контактора *KM* оказывается под напряжением фаз *A* и *C* через нормально замкнутые контакты тепловых реле *KK1* и *KK2*. Контактор *KM* срабатывает, силовые контакты замыкаются и

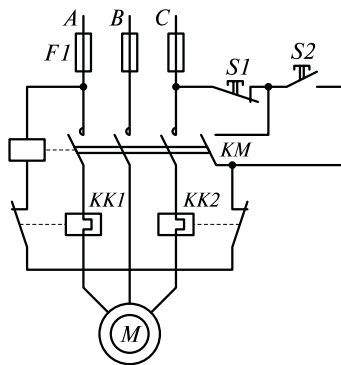


Рис. 9.13. Схема неререверсивного пускателя

асинхронный двигатель M запускается. При этом кнопка $S2$ блокируется нормально разомкнутым контактом контактора KM и ее можно отпустить. При нажатии кнопки $S1$ (стоп) цепь катушки контактора размыкается и якорь контактора не притягивается к магнитному сердечнику, силовые контакты размыкаются, двигатель M останавливается.

В случае механической перегрузки двигателя возрастает ток статора. Когда ток статора превышает номинальный ток тепловых реле $KK1$ (или $KK2$), нормально замкнутые контакты реле размыкаются и двигатель останавливается. Чтобы запустить двигатель, необходимо сначала выяснить причину отключения и устранить ее, а затем с помощью кнопки $S1$ снова запустить двигатель.

Тепловые реле не защищают цепь от короткого замыкания, поэтому последовательно с двигателем включаются плавкие предохранители $F1$.

9.5. Реле

Реле — это коммутационный аппарат относительно небольшой мощности, который реагирует на заданную физическую величину (напряжение, ток, температуру, давление и т.д.). Реле бывают контактные и бесконтактные, по принципу действия — электромагнитные, тепловые, оптические и т.д. Наиболее широкое применение на практике находят электромагнитные реле, тепловые и электронные реле.

Электромагнитные реле. По принципу действия электромагнитное реле аналогично контактору. Замыкание и размыкание контакторов реле происходит за счет перемещения якоря электромагнита. Контакты реле рассчитаны на меньшие токи, реле имеют и меньшие, чем у контактора размеры, более разнообразное применение. Обычно реле применяются в схемах управления двигателями, телефонии, системах автоматики, в слаботоковых цепях. По назначению электромагнитные реле можно разделить на промежуточные, поляризованные, реле времени, максимального и минимального тока и напряжения, дифференциальные и т.д.

Промежуточные реле обычно применяются, когда разрывная способность реле защиты недостаточная или нужно увеличить число дополнительных (управляющих) контактов. Упрощенная конструкция такого реле приведена на рис. 9.14. Электромагнит реле состоит из сердечника 1, обмотки 2, подвижного якоря 4. Если к катушке приложено напряжение, в магнитопроводе появляется магнитный поток, который способствует перемещению якоря 4. Движению якоря препятствует пружина 5, создающая удерживающую силу. Якорь связан механически с подвижными контактами 3. Реле могут выполняться с замыкающими (нормально открыты-

ми) контактами и размыкающими (нормально закрытыми) контактами. Обычно промежуточные реле имеют несколько контактов разных типов.

Реле минимального и максимального тока (напряжения) имеют принцип действия подобный принципу действия промежуточного реле. Токовые реле содержат обмотку с малым количеством витков, включаемую последовательно в цепь с приемником, а реле напряжения включаются параллельно приемнику и содержат много витков из тонкого провода. Обе обмотки предназначены для создания магнитного потока, в результате чего якорь притягивается и замыкает (размыкает) контакты реле.

Специальным приспособлением можно регулировать величину тока (напряжения). Если электромагнитная сила становится больше удерживающей силы, пружина-якорь притягивается, если меньше — отпадает.

Поляризованное реле представляет собой разновидность электромагнитного реле (рис. 9.15). В конструкции поляризованного реле имеется постоянный магнит 6, который прикреплен к магнитному сердечнику электромагнита 2. В сердечнике имеется воздушный зазор, в который помещен подвижный якорь 8 с пластиной, имеющей двухсторонний контакт 4. Сердечник имеет обмотку 1, к которой подается сигнал в виде напряжения. В зависимости от полярности сигнала на якорь 8 действуют силы F_1 либо F_2 и он притягивается и замыкает контакт 3 или 5, замыкая, таким образом, цепи 3—7 или 5—7. Данное поляризованное реле является двухпозиционным. Если управляющий сигнал становится равным

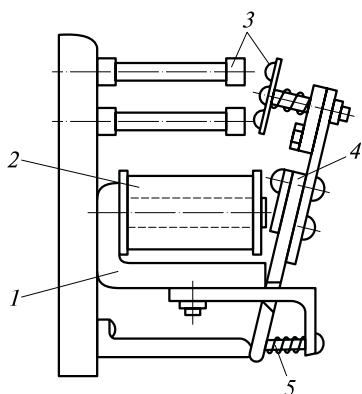


Рис. 9.14. Промежуточное реле:
1 — сердечник; 2 — обмотка; 3 — контакты; 4 — якорь; 5 — пружина

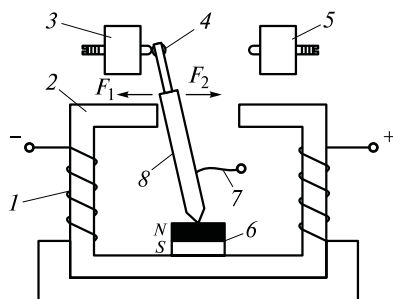


Рис. 9.15. Поляризованное реле:
1 — обмотка; 2 — электромагнит; 3, 5 — контакты; 4 — двухсторонний контакт; 6 — постоянный магнит; 7 — зажим; 8 — якорь

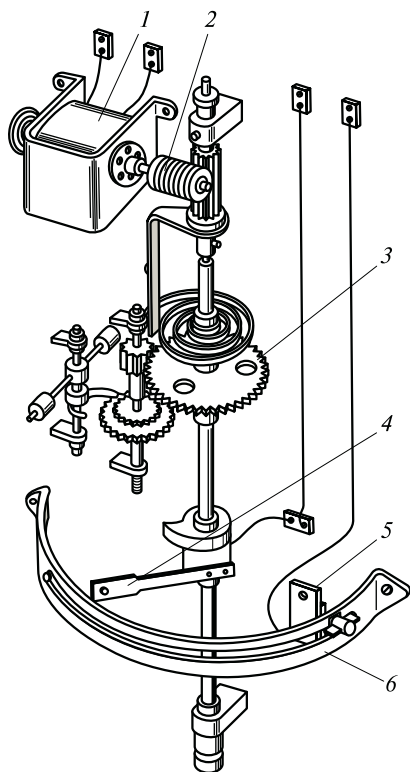


Рис. 9.16. Электромагнитное реле времени:

1 — электромагнит; 2 — червячный механизм; 3 — часовой механизм; 4 — подвижный контакт; 5 — неподвижный контакт; 6 — плата

нулю, реле остается в том положении, в котором находилось до уменьшения сигнала. Данное реле находит применение в слаботочных цепях.

Электромагнитное реле времени (рис. 9.16) служит для задержки коммутаций во времени при управлении электроприемниками. Реле содержит электромагнит 1 и часовой механизм 3 с пружиной. Ток, протекающий по обмотке электромагнита, создает усилие в якоре, который с помощью червячного механизма 2 заводит и поддерживает во взведенном состоянии часовой механизм. Рычаг с подвижным контактом 4 поворачивается до замыкания с неподвижным контактом 5. После отключения катушки реле пружина освобождается и под действием часового механизма раскручивается. Подвижный контакт скользит по плате 6 и контакты 4, 5 замыкаются. Перемещая неподвижный контакт 5, можно регулировать время задержки. Данное реле позволяет получить выдержку времени от 0,1 до 20 с.

Электронные реле. В технике широко применяются бесконтактные электронные реле на базе тиристоров и транзисторов, а также электронные реле времени.

Бесконтактное транзисторное реле позволяет без замыкания контактов получить напряжение на нагрузке Z_n . Схема реле (рис. 9.17) содержит транзистор, источники постоянного тока U_a и U_y . Если входное напряжение $U_{вх} > U_y$, то транзистор открывается и по нагрузке протекает ток. Основное достоинство — нет механических контактов, недостаток — в закрытом состоянии имеет малое входное сопротивление.

Бесконтактное тиристорное реле (рис. 9.18) содержит тиристор и источник напряжения U_a . При поступлении остроугольного импульса на управляющий электрод тиристор открывается и все напряжение приложено к нагрузке Z_n . В отличие от транзистора, тиристор остается в открытом состоянии и после снятия управля-

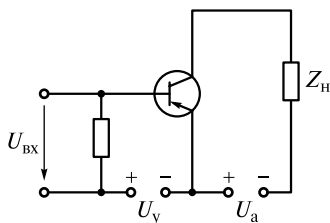


Рис. 9.17. Схема транзисторного реле

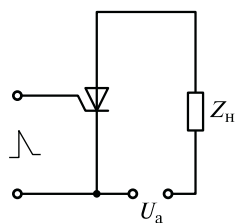


Рис. 9.18. Схема тиристорного реле

емого сигнала. Чтобы закрыть тиристор, необходимо отключить источник анодного напряжения.

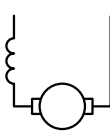

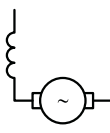

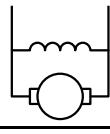










9.6. Условные обозначения на электрических схемах

Электрические устройства коммутируются в электрической цепи с помощью электрических аппаратов. Соединения элементов и требуемая последовательность коммутации отражены на электрических схемах. Каждая схема имеет две электрические цепи: силовую (изображается жирными линиями) и цепь управления (изображается тонкими линиями). Все электрические аппараты и

Таблица 9.1

Условные обозначения электрических аппаратов и устройств

Условное обозначение	Буквенное обозначение	Наименование элемента	Условное обозначение	Буквенное обозначение	Наименование элемента
	<i>R</i>	Резистор		<i>M</i>	Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором
	<i>C</i>	Конденсатор		<i>M</i>	Асинхронный двигатель с фазным ротором
	<i>L</i>	Катушка индуктивности		<i>M</i>	Синхронный двигатель

Условное обозначение	Буквенное обозначение	Наименование элемента	Условное обозначение	Буквенное обозначение	Наименование элемента
	<i>M</i>	Двигатель последовательного возбуждения		—	Нормально открытый контакт
	<i>M</i>	Коллекторный двигатель переменного тока		—	Нормально закрытый контакт
	<i>M</i>	Двигатель параллельного возбуждения		—	Замыкающий силовой контакт
	<i>KM</i> <i>KT</i> <i>KV</i> <i>KL</i> <i>KA</i>	Реле, контакторы, пускатели		—	Дугогасительный контакт
				<i>KK</i>	Контакт теплового реле
	<i>QS</i>	Контакт разъединителя		<i>KT</i>	Замыкающий контакт с выдержкой времени на замыкание
	<i>QW</i>	Контакт выключателя-разъединителя		<i>KT</i>	Замыкающий контакт с выдержкой времени на размыкание
	<i>QF</i>	Контакт автомата		<i>KT</i>	Размыкающий контакт с выдержкой времени на размыкание

Условное обозначение	Буквенное обозначение	Наименование элемента	Условное обозначение	Буквенное обозначение	Наименование элемента
	КТ	Размыкающий контакт с выдержкой времени на замыкание		S	Кнопка «Пуск»
				S	Кнопка «Стоп»

устройства представляются на схемах в соответствии с государственным стандартом графическими значками и обозначаются буквами. Условные обозначения некоторых электрических аппаратов и устройств приводятся в табл. 9.1.

Контрольные вопросы

1. Объясните назначение электрических аппаратов.
2. Какие типы электрических аппаратов вы знаете?
3. От чего зависит переходное сопротивление контакта?
4. Почему дуга является вредной в электрических аппаратах?
5. Какие факторы способствуют образованию электрической дуги?
6. Что такое электрический предохранитель?
7. Объясните конструкцию плавкого предохранителя.
8. Объясните по схеме устройство контактора.
9. В чем отличие контактора от пускателя?
10. Какие виды защиты электрических цепей вы знаете?
11. Объясните назначение и конструкцию автоматов.
12. Назовите известные вам типы электронных реле.
13. Для чего применяют реле времени?

Темы рефератов

1. Роль электрических контактов в электротехнике.
2. Методы борьбы с дугой в электрических аппаратах.
3. Назначение выключателей высокого напряжения, разъединителей, выключателей нагрузки.

РАЗДЕЛ III

ПРОИЗВОДСТВО, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

ГЛАВА 10

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ, СЕТИ И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

10.1. Электроэнергетические системы

Для питания электроэнергией (электроснабжения) потребителей (приемников электроэнергии), расположенных в городах, поселках и деревнях, на объектах промышленного, сельскохозяйственного и военного назначения необходимы мощные источники электроэнергии — электростанции, а также электрические сети, предназначенные для передачи электрической энергии от источников до потребителей. Как было отмечено во введении, уже в самом начале реализации Плана государственной комиссии по электрификации России (ГОЭЛРО) в 20-х гг. XX в. началось объединение отдельных электростанций и их сетей в так называемые энергетические системы.

Энергетической системой (энергосистемой) называется совокупность электростанций, электрических сетей и тепловых сетей (сетей подачи потребителям горячей воды, полученной при работе электростанций), соединенных между собой и участвующих в процессе производства, преобразования и распределения электрической и тепловой энергии под общим управлением.

Электрическая часть энергосистемы вместе с питающимися от нее приемниками электроэнергии называется *электроэнергетической системой (ЭЭС)*.

Энергетическая система по сравнению с отдельными электростанциями со своими сетями обладает целым рядом преимуществ: значительным повышением надежности электроснабжения потребителей;

облегчением работы при ремонте и авариях;

лучшим использованием мощностей агрегатов отдельных электростанций и повышением их экономичности;

увеличением мощностей агрегатов электростанций.

Преимущества электроэнергетических систем оказались столь велики, что во второй половине XX в. лишь несколько процентов электроэнергии, генерируемой в России, вырабатывались вне ЭЭС на отдельных электростанциях.

Электроэнергетические системы состоят из трех групп — основных силовых элементов, измерительных элементов и средств управления.

Основные силовые элементы ЭЭС:

генерирующие электроэнергию агрегаты электростанций;
элементы преобразования токов и напряжений — трансформаторы, выпрямители и т. д.;
элементы, передающие электроэнергию на большие расстояния, — линии электропередачи;
элементы, изменяющие схему ЭЭС, в частности отключающие ее поврежденные участки, — коммутационная аппаратура (выключатели, разъединители).

Измерительные элементы ЭЭС — трансформаторы тока и напряжения, предназначенные для подключения измерительных приборов, средств управления и регулирования.

Средства управления ЭЭС — автоматика, регуляторы, релейная защита, связь, обеспечивающие управление схемой и работой ЭЭС.

Функционирование ЭЭС в каждый момент времени характеризуется режимом, под которым понимается состав включенных основных элементов ЭЭС и их нагрузка. Режим, в свою очередь, определяется параметрами режима: значениями напряжений, токов, мощностей, частоты, определяющими процесс производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Если эти параметры неизменны на некотором отрезке времени, то режим ЭЭС называют установившимся, если они изменяются, то — переходным. Управление режимами ЭЭС осуществляется автоматическими регуляторами и устройствами противоаварийной автоматики, но главное — персоналом специально созданных служб — диспетчерских управлений. Диспетчерское управление — вид оперативного подчинения, когда операции с оборудованием ЭЭС производятся только по распоряжению диспетчера (старшего дежурного персонала), в управлении которого это оборудование находится. Диспетчер осуществляет руководство: распределением мощностей между отдельными электростанциями ЭЭС; регулированием частоты, напряжений и потоков мощностей; вводом в работу и выводом из нее отдельного оборудования; ликвидацией аварий на электростанциях и в электрических сетях и т. д.

Рассмотрим особенности электроэнергетических систем России и их организацию. В гигантской по размерам стране топливно-энергетические ресурсы сосредоточены в основном в ее азиатской части, а основные потребители — в Центре, на Юге, Западе, Урале. Отсюда необходимость переброски электроэнергии на большие расстояния и согласованности режимов работы многих станций. Эти особенности привели к строительству мощных линий электропередачи высокого напряжения, объединению отдельных

электроэнергетических систем и созданию Центрального диспетчерского пункта ее управлением. В России существует шесть объединенных, совместно работающих энергосистем (ОЭС): объединенные энергосистемы Центра, Северо-Запада, Средней Волги, Северного Кавказа, Урала и Сибири, которые образуют единую энергетическую систему (ЕЭС) России. Единая энергетическая система России связана с ОЭС и ЭЭС республик бывшего СССР — Беларуси, Украины, Казахстана, Прибалтики, Закавказья, а также с ЕЭС Польши, Финляндии, Турции, Монголии, Норвегии. Последние крупные системные аварии в Северной Америке (август — сентябрь 2003 г.), когда без электроэнергии остались Нью-Йорк, Детройт, Монреаль и другие мегаполисы, и в Европе (Италия) еще раз подтвердили необходимость объединения ресурсов ЭЭС отдельных стран в целях повышения надежности электроснабжения. Управление режимами работы такой сложной системы, как ЕЭС России, трехступенчатое: Центральное диспетчерское управление (ЦДУ) ЕЭС; объединенные диспетчерские управления (ОДУ) ОЭС, центральные диспетчерские службы (ЦДС) отдельных ЭЭС. Организация столь сложного и надежного управления электроэнергетическими системами — предмет особой гордости энергетиков России, практически не знавшей таких крупных системных аварий, как вышеотмеченные.

В заключение остановимся на трех специфических особенностях электроэнергетических систем как элементов энергетического производства:

производство, передача, распределение и потребление электроэнергии в ЭЭС осуществляются практически в один и тот же момент времени (энергия нигде не аккумулируется);

электромагнитные процессы в ЭЭС происходят с большой скоростью: включения, отключения, короткие замыкания и т. д. совершаются в течение секунд и даже их долей;

электроэнергетическая система теснейшим образом связана с обеспечением жизнедеятельности городов и поселков, функционированием производства и транспорта, что требует особой надежности ее работы и ответственности всех принимаемых при этой работе решений.

Познакомившись с основными понятиями и назначением ЭЭС, перейдем к более детальному рассмотрению их составляющих.

10.2. Электрические станции

Типы станций, доля выработки на них электроэнергии, используемые энергоресурсы. Источниками электрической энергии в ЭЭС служат электростанции трех типов: тепловые электростанции (ТЭС), атомные электростанции (АЭС) и гидравлические элект-

ростанции (ГЭС). На этих станциях происходит преобразование энергии органических топлив (ТЭС), ядерных топлив (АЭС) или напора воды (ГЭС) в электрическую энергию.

Большая часть электроэнергии вырабатывается на тепловых станциях. В России эта часть достигает 70 %, в мире — 90 %. Тепловые электростанции используют энергию в основном нефти, газа, угля. Большинство ТЭС России, особенно в ее европейской части, используют природный газ, а в качестве резервного топлива — мазут. Подобные ТЭС называют газомазутными. В азиатской части страны на ТЭС используют уголь, который предварительно размалывается в специальных мельницах до пылевидного состояния. Такие ТЭС называют пылеугольными.

На АЭС в России вырабатывается до 15 % электроэнергии (во Франции — более 70 %, в Германии и Японии — около 30 %, в США — более 20 %). Ядерное горючее получают из природного урана (из 1000 кг природного урана получают 100 кг обогащенного урана). Из обогащенного урана изготавливают тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ), которые используются в качестве топлива на АЭС. Почти все АЭС в России расположены в европейской ее части, где мало органических топлив (здесь АЭС дают 30 % электроэнергии).

На ГЭС в качестве энергоресурса используется не топливо, а возобновляемый ресурс — механическую энергию воды. Для получения мощного потока воды возводятся специальные сооружения — плотины, которые дают перепад уровней воды и обеспечивают большой напор воды, необходимый для вращения колеса турбины. Гидравлическая турбина соединена валом с ротором электрогенератора, вырабатывающего электроэнергию. Обычно стараются с максимальной эффективностью использовать богатые гидроресурсами места, устанавливая целые каскады ГЭС — Волжский, Камский, Ангарский, Енисейский.

Принцип действия электростанций, особенности конструкций их энергоагрегатов, структурные электрические схемы станций. В основе принципа действия всех трех типов станций лежит преобразование первичной энергии (органических и ядерных топлив, механической энергии воды) в электроэнергию. Общим должен быть результат — все эти различные по используемому энергоресурсу станции должны вырабатывать напряжение вполне определенного уровня (действующего значения) при частоте 50 Гц. Подобное преобразование энергии на каждой электростанции осуществляется с использованием специальных агрегатов — электрических генераторов. Причем в качестве такого генератора всегда выбирается синхронный генератор, с помощью которого только и возможно обеспечить полную синхронность частот напряжений, генерируемых сотнями таких генераторов в ЭЭС. Но конструкции таких генераторов для различных типов станций отличаются друг от друга.

На ТЭС и АЭС органические и ядерные топлива сжигаются в специальных котлах. Выделяемая теплота греет воду, движущуюся внутри ряда труб и в результате образуется пар, который движется к паровой турбине. За турбиной с помощью специального аппарата — конденсатора — поддерживается очень низкое давление и из-за перепада давлений на входе и выходе пар движется в турбине с очень большой скоростью, вращая ее вал. Вал турбины связан с ротором электрогенератора, вращение которого и позволяет синхронному генератору вырабатывать электроэнергию. При этом ротор генератора выполняется в неявнополюсном исполнении, а сам генератор называют турбогенератором. Коэффициент полезного действия ТЭС может достигать 40 %, КПД АЭС несколько ниже, но оценить его сложно из-за неполного сгорания ядерного топлива.

На ГЭС используются синхронные машины, называемые гидрогенераторами, роторы у которых явнополюсные. Гидрогенераторы имеют частоту вращения роторов в десятки раз меньшую, чем турбогенераторы. Поскольку масса машины возрастает с уменьшением частоты ее вращения, то массы гидрогенераторов в несколько раз превышают массы турбогенераторов аналогичной мощности. Диаметры роторов турбогенераторов не превышают 1,1... 1,25 м при длине роторов до 8 м. Роторы гидрогенераторов достигают 15... 20 м в диаметре при длине до 5 м, что затрудняет установку их в горизонтальном (как у турбогенераторов) положении.

На электростанциях электроэнергия вырабатывается на так называемом генераторном напряжении, уровень которого несколько ниже требуемого уровня напряжения для эффективной его передачи на большие расстояния. Поэтому в состав станций помимо генераторов входят трансформаторы, повышающие это напряжение, выключатели, позволяющие отключать и подключать эти генераторы и трансформаторы в сеть, а также распределительные устройства (см. подразд. 10.5), служащие для

распределения электроэнергии. Выбор структурных электрических схем станций зависит от числа и мощности генераторов, типов используемых трансформаторов, требуемых уровней выдаваемого станцией напряжения и т.д. На рис. 10.1 показан пример структурной схемы для станции с тремя энергоблоками, каждый из которых состоит из генератора, трансформатора, выключателя (изображается в виде квадрата). Отдельными стрелками показан отбор мощностей на генераторном напряжении для собственных нужд электростанций (освещения, работы вентиляторов, насосов и т.д.).

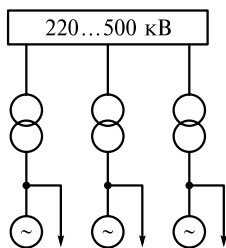


Рис. 10.1. Структурная схема электростанции с тремя энергоблоками

Назначение станций. Исторически первым по назначению типом станции была районная электростанция — ТЭС или ГЭС, служащая для снабжения электроэнергией промышленных районов или городов. Объединение подобных станций вместе с их сетями привело к появлению энергетических систем. В энергосистемах ГЭС служат только для выработки электроэнергии. Тепловые же электростанции по назначению подразделяются на два класса — конденсационные станции (КЭС), которые также служат только для выработки электроэнергии, и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), служащие для комбинированной выработки теплоты и электрической энергии. Конденсационные станции проектируются с агрегатами мощностью от 100 до 1200 МВт, имеющими генераторное напряжение (напряжение генераторов) 10,5...36,75 кВ. Установленная мощность типовых электростанций соответствует 2400...6400 МВт. Теплоэлектроцентрали выгодно размещать рядом с потребителями теплоты (городами, поселками, предприятиями), отпуская им пар для обогрева зданий и технологических целей. С пуском в 1954 г. в России первой в мире АЭС наступил новый этап электрификации, на котором все большая доля выработки электроэнергии приходится на АЭС. Атомные станции также подразделяются на конденсаторные (КАЭС) и теплофикационные (АТЭС), но преимущественно используются КАЭС. Атомные электростанции обладают слабой маневренностью, а в энергосистемах часто возникает необходимость изменения объемов выработки энергии, регулирования частоты и т. д. Потребителям электроэнергии требуются разные ее объемы в разное время суток и в разное время года. Высокой маневренностью обладают гидравлические электростанции, но не во всех энергосистемах есть достаточные мощности ГЭС, а на последних — необходимые для маневрирования запасы воды. В последние годы для маневров с вырабатываемыми мощностями стали применять специальные газотурбинные агрегаты на ТЭС.

10.3. Электрические сети, распределение электрической энергии

Электрические сети ЭЭС обеспечивают возможность электростанциям выдавать мощности, передавать их на расстояния, преобразовывать параметры электроэнергии и распределять ее по некоторой территории, вплоть до непосредственных электроприемников. Классификацию электрических сетей можно провести по уровням напряжений, размерам территорий, назначению, конфигурации, конструктивному исполнению и т. д.

Уровни напряжения сетей. Электрические сети ЭЭС на протяжении от станций до потребителей имеют несколько трансформаций

напряжений. Дело в том, что генераторы электроэнергии проектируются на одни уровни напряжений, приемники — на другие, а передачу электроэнергии на определенные расстояния наиболее выгодно (по потерям) осуществлять с использованием иных, чем у генераторов и приемников, уровней напряжения. Все это и определяет необходимость многоуровневости напряжений в электрических сетях, которая достигается с помощью трансформаторов. Всего в России используются 16 уровней линейных напряжений, из которых четыре меньше 1 кВ (40, 220, 380 и 660 В) и 12 — больше 1 кВ (3, 6, 10, 20, 35, 110, 150, 220, 330, 500, 750, 1150 кВ). Напряжения до 1 кВ называют низкими напряжениями (НН), от 3 до 35 кВ — средними напряжениями (СН), от 110 до 220 кВ — высокими напряжениями (ВН), от 330 до 750 кВ — сверхвысокими напряжениями (СВН), а напряжение 1150 кВ — ультравысоким напряжением. Выбор уровня напряжения зависит от назначения сети.

Местные, районные и региональные сети. По размерам территорий сети подразделяют на местные ($U_{\text{ном}} \leq 35$ кВ), районные ($U_{\text{ном}} = 110 \dots 220$ кВ) и региональные ($U_{\text{ном}} \geq 330$ кВ). Региональные сети связывают отдельные районы и небольшие энергосистемы в региональные объединенные энергосистемы (ОЭС) — для этой цели обычно используются сети напряжением 330 кВ, а также связывают ОЭС между собой.

Системообразующие и распределительные сети. Распределение электрической энергии. Системообразующие электрические сети объединяют отдельные электростанции на параллельную работу и формируют районные энергосистемы, а также объединяют последние и ОЭС. Эти сети осуществляют передачу электроэнергии к понижающим подстанциям. Для передачи электроэнергии в таких сетях используются воздушные линии ВН и СВН. *Воздушная линия* (ВЛ) — линия электропередачи, провода которой поддерживаются над землей с помощью опор, изоляторов и арматуры. Опоры ВЛ могут иметь разные конструкции. Одна из таких конструкций опор для ВЛ СВН изображена на рис. 10.2. Элементами ВЛ с опорами такой конструкции служат провода 1 фаз А, В, С, которые крепятся с помощью арматуры 5 к гирлянде изоляторов 4, отделяющих провода от металлической заземленной конструкции опор 3. Сама опора устанавливается на фундаменты 6, обеспечивающие ее устойчивость, и в верхней своей части содержат тросостойки, к которым крепятся тросы 2, обеспечивающие защиту проводов от ударов молнии.

Распределительные электрические сети (РЭС) служат для распределения электроэнергии, получаемой от источников (электрических станций и понижающих напряжение подстанций), по территории электроснабжаемого района и для непосредственной ее подачи к потребителям. В РЭС используются сети разного уровня напряжений:

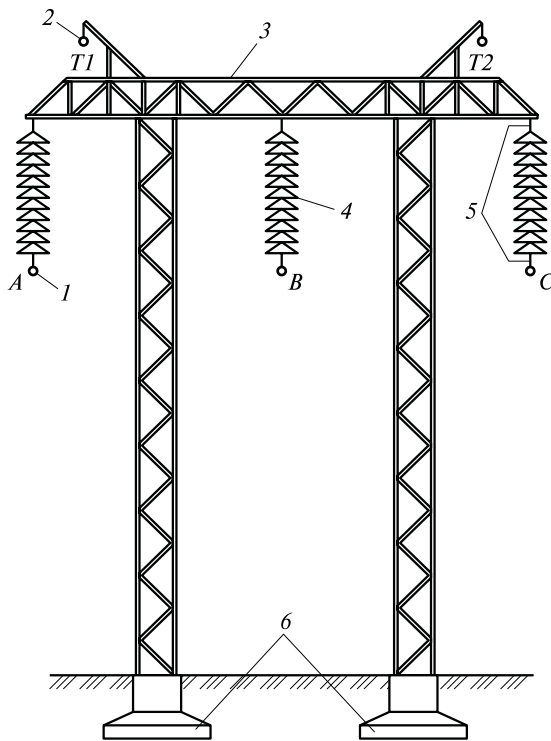


Рис. 10.2. Опора воздушной линии:

1 — провода фаз (A, B, C); 2 — защитные тросы (T1, T2); 3 — опора; 4 — гирлянда изоляторов; 5 — элементы арматуры; 6 — фундаменты

до 1 кВ — в пределах кварталов городов, поселков, цехов предприятий;

6—10 кВ — в пределах микрорайонов городов, крупных поселках и предприятий, сельскохозяйственных районов и узлов железнодорожного транспорта;

35 и 110 кВ при расстояниях от одного до нескольких десятков километров.

Имеется тенденция повышения уровней напряжения РЭС. Так, если вновь создаваемая системообразующая сеть напряжением 750 кВ проходит в районах расположения сетей 220 и даже 330 кВ, то последние могут перейти в разряд региональных сетей.

В РЭС могут применяться как воздушные, так и кабельные линии. В сельской и малонаселенной или малозастроенной местности применяются воздушные линии как более дешевые в сравнении с линиями кабельными. В городах и на промышленных предприятиях передача электроэнергии осуществляется с использованием кабельных линий, прокладываемых в земле в траншеях

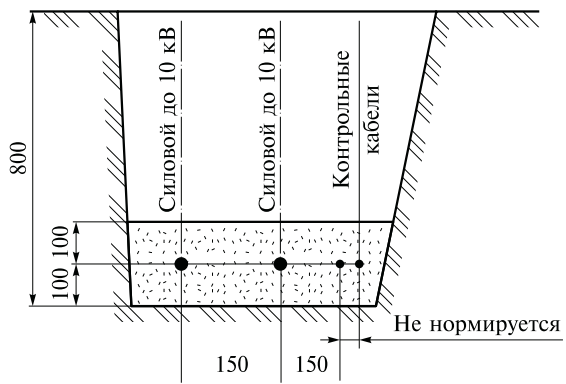


Рис. 10.3. Прокладка кабелей в траншее

или в специальных сооружениях — кабельных каналах, блоках, туннелях, эстакадах, галереях, служащих для защиты кабелей и удобства их ремонта. Пример прокладки кабелей напряжением до 10 кВ в траншее показан на рис. 10.3. Силовые кабели на напряжение 6 и 10 кВ выполняются трехжильными (рис. 10.4), каждая токопроводящая жила 1 (фаза) окружена фазной изоляцией 2, а все жилы — поясной изоляцией 3. В качестве фазной и поясной изоляции в кабелях среднего напряжения применяется бумага, пропитанная маслосиликоновым составом. В промежутках между фазной и поясной изоляцией находится специальный наполнитель 4. Поверх поясной изоляции наложена металлическая оболочка 5,

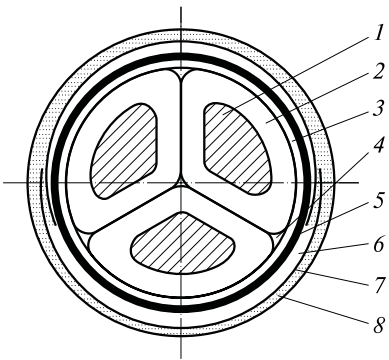


Рис. 10.4. Сечение трехжильного кабеля:

- 1 — токопроводящая жила; 2 — фазная изоляция; 3 — поясная изоляция; 4 — наполнитель; 5 — металлическая оболочка; 6 — подушка; 7 — броня; 8 — наружный покров

которая выполняется из свинца или алюминия и служит для защиты гигроскопической изоляции. Для механической и коррозионной защиты поверх металлической оболочки находятся защитные покрытия из двух стальных лент, называемых броней 7, и наружный покров 8. Между броней и металлической оболочкой 5 расположена подушка 6.

В РЭС используются два основных способа передачи и распределения электроэнергии:

от источников питания (электростанция, понижающая подстанция) отходят распределительные линии, к которым подсоединяются потребители. Такой способ предполагает большое число при-

соединенных линий на источниках, что увеличивает общую протяженность линий и требует увеличения соответствующего распределительного устройства и его коммутационного оборудования;

к источникам присоединены только несколько крупных (с большим сечением проводов и кабелей) линий. Эти линии оканчиваются в распределительных пунктах напряжением 6, 10 кВ или на распределительных щитах напряжением до 1000 кВ, к которым подсоединяется необходимое количество распределительных линий. При этом в подобных пунктах и на щитах отсутствует трансформация напряжения и осуществляется только разделение потоков энергии. Такое двухзвенное устройство РЭС позволяет уменьшить количество коммутационного оборудования в распределительных устройствах у источников, а также сократить протяженность линий между этими источниками и районом расположения потребителей.

Выбор способа распределения энергии зависит от стоимости необходимого оборудования, особенностей месторасположения источника и потребителей (плотности застройки территории и т. д.) и других факторов надежности электроснабжения.

Режим нейтрали распределительных сетей:

сети 6—10 кВ — трехпроводные, нейтраль которых соединяется с землей через специальное устройство — дугогасящий реактор, наличие которого ограничивает величину токов однофазных коротких замыканий на землю;

сети 380/220 В — четырехпроводные, так как основные потребители, включая освещение, однофазные, подключаются между фазным проводом и нейтральным проводом, нейтраль трансформаторов (в подстанциях 6/0,38, 10/0, 38 кВ) у них глухо заземлена на 380, 220 В;

сети 660/380 В — трехпроводные (к ним подключаются трехфазные приемники, в основном двигатели) с глухозаземленной нейтралью.

10.4. Электроснабжение промышленных предприятий и населенных пунктов

Системы электроснабжения. Системы электроснабжения (СЭС) — электроэнергетические комплексы, обеспечивающие непосредственное питание электроэнергией конкретных потребителей и их групп. В СЭС входят местные электростанции и подстанции, понижающие напряжение с 35, 110, 150 или 220 кВ до 6—10 кВ, электрические сети, а также все приемники. Таким образом, СЭС являются частью ЭЭС.

Питающие СЭС сети состоят из внешних воздушных линий 35—220 кВ и понижающих подстанций 35, 110, 150 220/6, 10 кВ.

Распределение электроэнергии по территории объектов электроснабжения осуществляется линиями 6 и 10 кВ, понижающими подстанциями 6, 10/0, 38, 0,66 кВ и линиями до 1 кВ. Конкретное исполнение СЭС зависит от особенностей объектов электроснабжения и в первую очередь от требуемой надежности этого снабжения.

По требуемой надежности снабжения электроэнергией все ее потребители подразделяются на три категории. Первая категория потребителей (больницы и высотные дома в городах, доменные цеха, подъемники и вентиляционные установки шахт на производстве и т.п.) должна иметь непрерывное снабжение электроэнергией, поскольку его нарушение связано с опасностью для людей или большим материальным ущербом. Вторая категория (самая многочисленная) потребителей допускает перерывы в снабжении электроэнергией на ограниченное время, необходимое для включения резервного питания действиями дежурного персонала или выездной оперативной бригады. Третья категория потребителей допускает перерыв в снабжении энергией до одних суток, к ней относят наименее ответственные потребители электроэнергии (электроприемники цехов несерийных производств, вспомогательных цехов, небольших поселков и т.д.).

Обеспечение максимальной надежности электроснабжения наиболее ответственных потребителей достигается их подключением к двум независимым сетям и наличием автоматически включаемого резервного источника электроэнергии.

Электроснабжение промышленных предприятий. Промышленные предприятия — основные потребители электроэнергии (50...70 % ее выработки). Причем главными потребителями электроэнергии на самих предприятиях являются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (60...90 % от электропотребления промышленных предприятий).

Своеобразие функционирования СЭС заключается:

в колебаниях напряжения из-за пусковых токов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, а также из-за работы крупных электротехнологических установок;

резкопеременной нагрузке (потребление активной и реактивной мощности), вызванной работой прокатных станов, дуговых сталеплавильных печей и т.п.;

наличии потребителей с низким коэффициентом мощности (0,7...0,75 — у асинхронных двигателей и 0,2...0,6 — у сварочных аппаратов).

Кроме того, из-за нелинейного характера большинства потребителей напряжение в СЭС промышленных предприятий содержит высшие гармоники и отличается несинусоидальностью. Таким образом, для этих СЭС характерно низкое качество электроэнергии (колебания напряжений, их несинусоидальность, по-

требление реактивной мощности), поэтому актуальными становятся мероприятия по повышению этого качества, в частности по компенсации реактивной мощности, для чего используются батареи конденсаторов, но могут использоваться и синхронные двигатели, работающие в режиме перевозбуждения.

Большая часть промышленных производств относится к потребителям первой категории, для которых перерыв в электроснабжении не должен превышать 1...2 с, требуемых на включение резервного питания. Поэтому сети СЭС промышленных предприятий должны обеспечивать такую надежность, для чего воздушные линии этих сетей выполняются двухцепными (когда к одной опоре крепятся шесть проводов — по три фазных провода для каждой из двух независимых цепей, предназначенных для питания данного потребителя).

Электроснабжение городов. Если не рассматривать расположенные в городах промышленные предприятия, то основными потребителями электроэнергии в них будут здания — жилые, административные, учебных и научных заведений, магазинов и предприятий общественного питания, медицинских учреждений и т. д. Главными потребителями электроэнергии в них являются осветительные приборы (в первую очередь обычные электролампы накаливания), нагревательные приборы (электроплиты, электронагреватели), холодильники и различные электронные приборы (телевизоры, радиоприемники, музыкальные центры, компьютеры). Из-за преобладания среди потребителей ламп накаливания и электронагревательных приборов коэффициенты мощности у зданий как потребителей электроэнергии оказываются достаточно высокими — порядка 0,9. Большинство зданий относятся ко второй категории по надежности электроснабжения, но ряд объектов относится к первой категории — здания большой этажности (выше 17 этажей), больницы и административные здания, крупные учебные и зрелищные заведения. Своеобразной группой потребителей в городах являются объекты электрифицированного транспорта (трамвай, троллейбус, метро). Системы электроснабжения электротранспорта относятся к первой категории по надежности и оказывают весьма негативное влияние на качество электроэнергии в городских сетях:

из-за частых пусковых токов двигателей трамваев и троллейбусов при их движении по маршруту также часто возникают колебания напряжения в сетях 6, 10 кВ;

наличие выпрямительных установок в электроснабжении транспорта приводит к появлению высших гармоник и существенной несинусоидальности напряжения в питающих сетях;

использование однофазного переменного тока при электротяге приводит к несимметрии трехфазных систем напряжений и токов.

Вместе с тем надо отметить, что коэффициент мощности в СЭС городского транспорта довольно высок, высоким оказывается и результирующий коэффициент мощности СЭС городов (не менее 0,9), в связи с чем в этих системах установка средств компенсации реактивной мощности, как правило, не требуется.

10.5. Подстанции и распределительные устройства

Подстанции, назначение и классификация. Подстанциями (ПС) называются электроустановки, предназначенные для преобразования и распределения электроэнергии и состоящие из трансформаторов, распределительных устройств (РУ), устройств управления и вспомогательных сооружений. По своему назначению подстанции (ПС) подразделяются на системные ПС, осуществляющие связь между отдельными регионами ЭЭС или между различными энергосистемами с напряжением 220...750 кВ, и потребительские ПС, служащие для преобразования, распределения и электроснабжения потребителей. По способу присоединения к электрической сети подстанции подразделяются на тупиковые (рис. 10.5, *а*), ответвительные (рис. 10.5, *б*), проходные (рис. 10.5, *в*) и узловы (рис. 10.5, *г*).

Подстанции принято подразделять по месту расположения:

пристроенные — непосредственно примыкающие к основному зданию;

встроенные — закрытые подстанции, вписанные в контур основного здания;

внутрицеховые — расположенные внутри производственного здания (открыто или в отдельном закрытом помещении);

столбовые (мачтовые) — подстанции, все оборудование которых устанавливается на конструкциях или опорах ВЛ на высоте, не требующей ограждения ПС.

Кроме того, широкое применение находят комплексные трансформаторные ПС, состоящие из трансформаторов и блоков распределительных устройств.

Больше половины подстанций — двухтрансформаторные, чуть более $\frac{1}{5}$ — однотрансформаторные, около $\frac{1}{5}$ от всего их числа

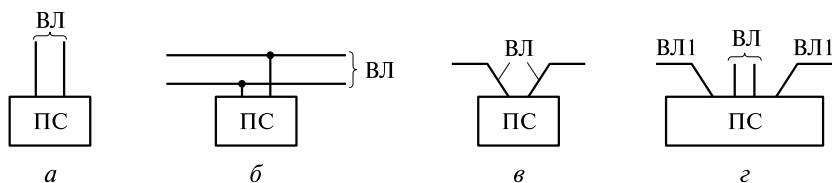


Рис. 10.5. Типы подстанций:

а — тупиковая; *б* — ответвительная; *в* — проходная; *г* — узловая

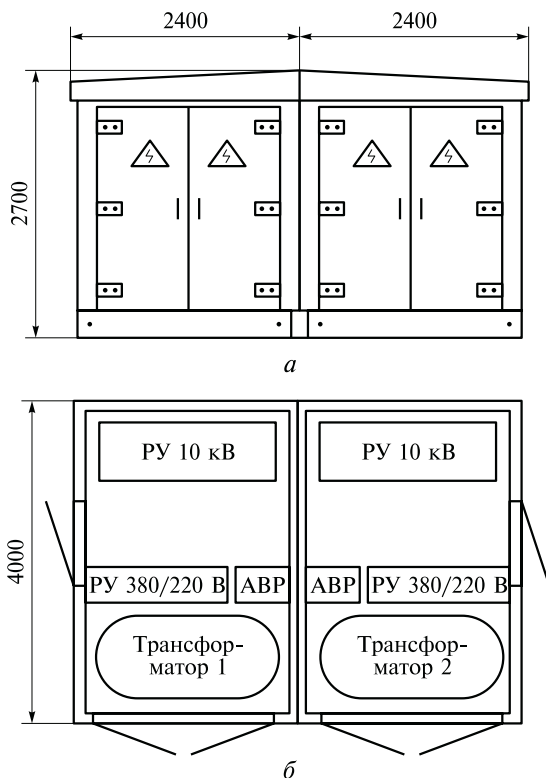


Рис. 10.6. Малогабаритная городская трансформаторная подстанция 10/0,38 кВ с трансформаторами 2630 кВ·А:

a — вид спереди; *б* — план размещения основного оборудования

составляют подстанции, содержащие три и более трансформаторов. На рис. 10.6 изображено устройство современной малогабаритной городской двухтрансформаторной подстанции 10/0,38 кВ с трансформаторами $2 \cdot 630$ кВ·А, где АВР — автоматика, осуществляющая ввод резервного оборудования при отключении основного.

Распределительные устройства, назначение и классификация. *Распределительным устройством (РУ)* называется электроустановка, служащая для приема или распределения электроэнергии и содержащая коммутационные аппараты, сборные и соединительные шины, вспомогательные устройства (компрессорные, аккумуляторные и др.), а также устройства защиты автоматики и измерительных приборов. В РУ линии с помощью выключателей и разъединителей подключаются к токоведущим частям сборных шин.

Распределительные устройства электростанций принято подразделять по уровням напряжения — на РУ генераторного (ГРУ),

высшего (ВН) и среднего (СН) напряжений, а также на распределительные устройства собственных нужд.

По способу использования РУ подразделяются на РУ открытого (ОРУ) и закрытого (ЗРУ) исполнения. Открытым называется РУ, все или основное оборудование которого расположено на открытом воздухе. Закрытым называется РУ, оборудование которого расположено в здании. При напряжении до 20 кВ РУ всегда выполняются закрытыми, при напряжении более 330 кВ — открытыми, при $U = 35 \dots 220$ кВ они могут быть как открытыми, так и закрытыми.

Как ОРУ, так и ЗРУ могут быть комплектными устройствами внутренней (КРУ) или наружной (КРУН) установки. Комплектным распределительным устройством называется РУ, состоящее из полностью или частично закрытых шкафов или блоков со встроенными в них аппаратами, устройствами защиты и автоматики, поставляемое в собранном или полностью подготовленном для сборки виде. Промышленность выпускает также РУ, объединенные с трансформаторными подстанциями, тогда их называют комплектными трансформаторными подстанциями.

Контрольные вопросы

1. Что такое электроэнергетическая система (ЭЭС) и чем она отличается от энергетической системы?
2. Что такое диспетчерское управление ЭЭС и каковы его функции?
3. Назовите основные типы электростанций и поясните принципы их действия.
4. Что такое электрическая сеть, каково назначение системообразующих электрических сетей и распределительных сетей?
5. Что такое система электроснабжения?
6. На какие группы подразделяются потребители электроэнергии по требуемой надежности их электроснабжения?
7. В чем заключаются особенности электроснабжения городов и промышленных предприятий?
8. Что такое электрическая подстанция?
9. Что такое распределительное устройство?
10. Что такое комплектное распределительное устройство?

Темы рефератов

1. Электроэнергетические системы России.
2. Электрические сети.

11.1. Понятие об электроприводе

Электроприводом называется электромеханическое устройство, позволяющее приводить в движение исполнительные механизмы в соответствии с технологическим процессом. Структурная схема электропривода представлена на рис. 11.1. Потребляемая из электрической сети электроэнергия в преобразователе может преобразовываться в электроэнергию другой частоты, другого напряжения или тока. Это устройство может отсутствовать в некоторых приводах. Электродвигатель преобразует электроэнергию на входе двигателя в механическую на выходе (на валу). Частота вращения рабочего механизма не всегда может быть равной частоте вращения электродвигателя. В этом случае применяют редуктор — устройство для согласования двух вращающихся с разными скоростями механизмов.

Электропривод бывает групповой, индивидуальный и многодвигательный.

В групповых электроприводах один электродвигатель с помощью механической передачи приводит в действие несколько механизмов.

В индивидуальных электроприводах рабочий механизм приводится в действие одним двигателем.

В многодвигательных электроприводах технологический процесс обеспечивается несколькими двигателями, работа которых взаимосвязана. Например, во фрезерном станке вращение фрезы, продольное и поперечное перемещение осуществляются разными двигателями.

Электропривод подразделяется на нерегулируемый и регулируемый. Нерегулируемый электропривод предназначен в основном для пуска и остановки рабочего механизма, регулируемый — позволяет управлять пуском, торможением, осуществлять другие функции в соответствии с технологическим процессом.



Рис. 11.1. Структурная схема электропривода

Коэффициент полезного действия электропривода η определяется отношением

$$\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{P_{\text{ВХ}} - \Delta P}{P_{\text{ВХ}}},$$

где $P_{\text{ВЫХ}}$ — мощность на валу редуктора; $P_{\text{ВХ}}$ — электрическая мощность на входе преобразователя; ΔP — суммарные потери в преобразователе, двигателе и редукторе.

Если электропривод не содержит преобразователя и редуктора, то η характеризуется только КПД двигателя.

11.2. Нагрев и охлаждение электродвигателя

Мощность электродвигателя в основном ограничивается допустимой температурой нагрева изоляции. В электродвигателе имеются потери, которые превращаются в тепло. За время работы двигателя Δt в нем выделяется тепловая энергия ΔW . Часть этой энергии расходуется на нагрев двигателя ΔW_1 , оставшаяся часть ΔW_2 рассеивается в окружающую среду. Таким образом, имеет место уравнение теплового баланса $\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2$.

Так как ΔW , ΔW_1 и ΔW_2 связаны с температурой θ и временем t , то решением уравнения теплового баланса будет зависимость температуры нагрева θ от времени нагрева t , т.е. $\theta(t)$.

Для двигателей эта зависимость имеет вид возрастающей экспоненты (рис. 11.2). Кривая 1 соответствует нагреву двигателя до установившегося значения температуры $\theta_{\text{уст}}$ при температуре окружающей среды $\theta_0 = 0$, кривая 2 — нагреву двигателя в окружаю-

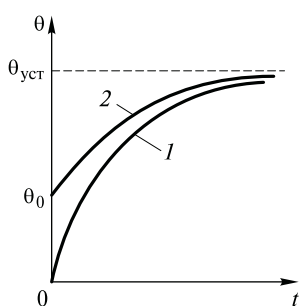


Рис. 11.2. Зависимость нагрева двигателя от времени нагрева:

1 — при нулевой температуре окружающей среды; 2 — при температуре θ_0

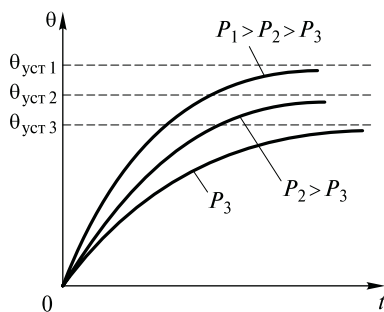
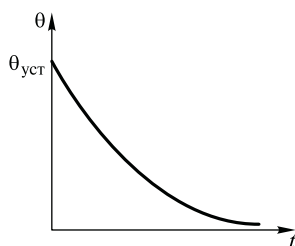


Рис. 11.3. Зависимости нагрева двигателя при различных нагрузках

Рис. 11.4. Зависимость изменения температуры при охлаждении двигателя



щей среде с температурой θ_0 . В первом случае допустимый перегрев двигателя значительно больше, чем во втором. На рис. 11.3 показано семейство зависимостей $\theta(t)$ для двигателя при различных нагрузках. Чем больше нагрузка, тем выше установившееся значение температуры нагрева $\theta_{уст}$.

При отключении двигателя от сети двигатель начнет охлаждаться и температура его начнет падать по закону падающей экспоненты (рис. 11.4).

11.3. Выбор мощности двигателя электропривода

Технологические особенности производства требуют работы электродвигателей в различных режимах. Различают следующие основные режимы работы двигателей: продолжительный; кратковременный; повторно-кратковременный.

При продолжительном режиме двигатель работает продолжительно и успевает нагреться до установившейся температуры. В таком режиме обычно работает электропривод насосов, компрессоров, вентиляторов, крупных обрабатывающих станков, электрического транспорта и т.д. На рис. 11.5 представлены зависимости $\theta(t)$ для трех случаев нагрузки двигателя: номинальной $P_{ном}$, меньше номинальной $P_1 < P_{ном}$, больше номинальной $P_2 > P_{ном}$. При номинальной нагрузке двигатель может продолжительно работать без перегрева, так как $\theta_{уст} \leq \theta_{доп}$, где $\theta_{доп}$ — допустимая максимальная температура нагрева двигателя с учетом окружающей среды. При мощности $P_1 < P_{ном}$ температура нагрева не достигает $\theta_{доп}$, а при мощности $P_2 > P_{ном}$ необходимо отключать двигатель при достижении температуры $\theta_{доп}$.

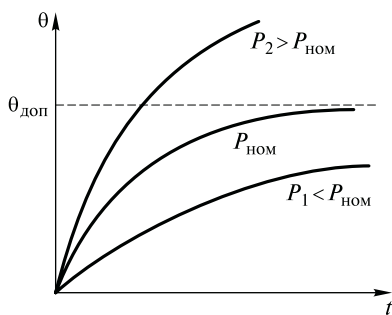


Рис. 11.5. Зависимости нагрева двигателя при различных нагрузках

При кратковременном режиме за время работы t_p двигатель не успевает нагреться до установившегося значения $\theta_{уст}$, время охлаждения (паузы) t_0 , напротив, достаточно, чтобы охладить дви-

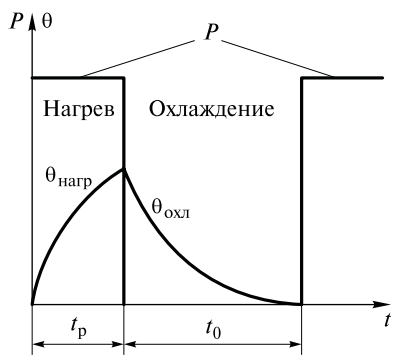


Рис. 11.6. Нагрузочный цикл кратковременного режима

гатель до температуры окружающей среды. Нагрузочный цикл при кратковременном режиме приведен на рис. 11.6.

Повторно-кратковременный режим характеризуется циклическим повторением периодов работы t_p и пауз t_0 (рис. 11.7). Двигатель то нагревается, то охлаждается. За время работы t_p температура нагрева двигателя не успевает достичь $\theta_{уст}$, а за время паузы двигатель не может охладиться до температуры окружающей среды.

При многократном повторении циклов температуры в начале каждого цикла будут одинаковы.

Повторно-кратковременный режим характеризуется продолжительностью включения (ПВ), измеряемого в процентах

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100.$$

Промышленностью специально выпускаются двигатели, работающие в повторно-кратковременном режиме с ПВ 15, 25, 40 и 60 %. Если реальная ПВ не совпадает с паспортной $ПВ_{пасп}$, то мощность двигателя $P_{ном}$ выбирают из условия $P_{ном} \geq P_1 \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{пасп}}}$.

Необходимо при этом проверить достаточность электромагнитного момента для удовлетворения требований кратковременных перегрузок.

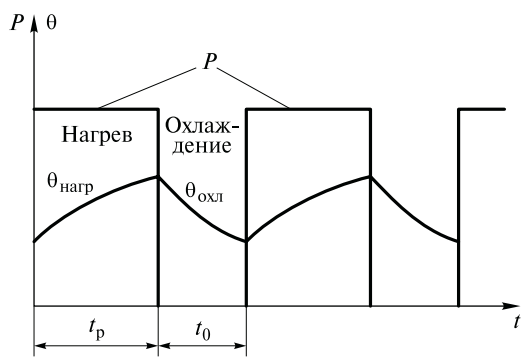


Рис. 11.7. Нагрузочный цикл повторно-кратковременного режима

Пример 1. Определить ПВ двигателя, график работы которого представлен на рис. 11.7, если $t_p = t_0 = 5$ мин.

Решение.

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_p + t_0} 100 = \frac{5}{5 + 5} 100 = 50 \%$$

Пример 2. Двигатель с ПВ 60 % мощностью 100 кВт приводит в действие компрессор, который работает в повторно-кратковременном режиме: $t_p = 6$ мин, $t_0 = 10$ мин. Двигатель какой мощности необходимо иметь в резерве?

Решение.

$$\text{ПВ}_{\text{дв}} = \frac{8}{8 + 10} 100 = 44,4 \%$$

Мощность резервного двигателя:

$$P_{\text{рез}} \geq P \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{дв}}}{\text{ПВ}_{\text{насп}}}} = 100 \sqrt{\frac{44,4}{60}} = 86,0 \text{ кВт.}$$

Необходимо выбрать двигатель с ПВ 60 %, номинальная мощность которого $P_{\text{ном}}$ приближается к найденной $P_{\text{рез}}$ сверху, т.е. $P_{\text{ном}} \geq 86$ кВт. Затем необходимо проверить достаточность электромагнитного момента для кратковременных перегрузок. Для асинхронного двигателя $M_{\text{крит}} > M_{\text{нагр}}$, где $M_{\text{крит}}$ — критический момент; $M_{\text{нагр}}$ — максимальный момент нагрузки.

11.4. Схемы управления электродвигателями

Схема управления асинхронным короткозамкнутым двигателем.
Нереверсивный электропривод. Электрическая схема предусматривает пуск электродвигателя в одном направлении, его остановку и защиту. Схема нереверсивного пускателя (см. рис. 9.13) позволяет осуществлять управление электрическим приводом. Защита двигателя от перегрузки осуществляется тепловыми реле $КК1$ и $КК2$, находящимися в пускателе, защита от короткого замыкания — предохранителями $F1$.

Схема позволяет осуществлять управление с различных постов управления, но для этого необходимо добавить кнопки «Пуск» и «Стоп». Для двух постов управления необходимо иметь две кнопки «Пуск», включенные параллельно и две кнопки «Стоп», включенные последовательно.

Реверсивный электропривод. Этот привод имеет вращение вала в обе стороны. Схема пуска асинхронного двигателя показана на рис. 11.8. Реверсивное управление асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором осуществляется контакторами $КВ$ (вперед) и $КН$ (назад) реверсивного магнитного пускателя.

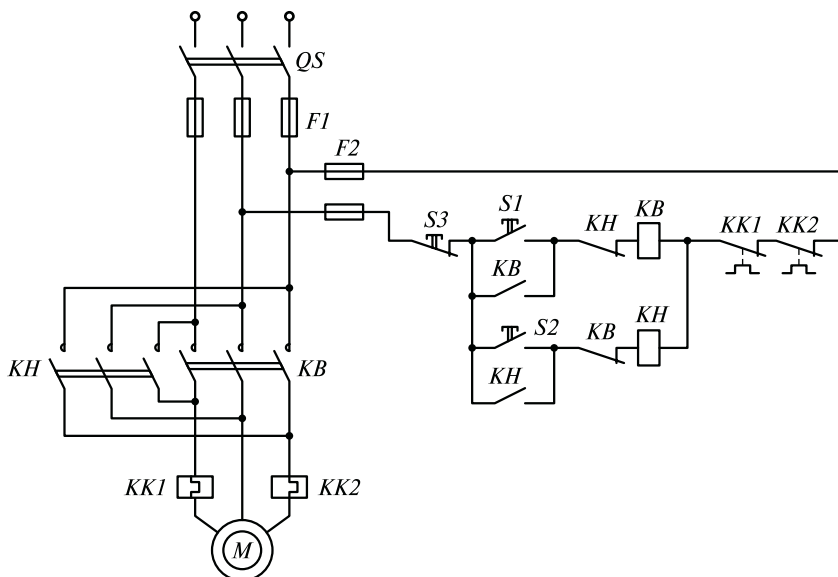


Рис. 11.8. Схема пуска асинхронного двигателя

Схема работает следующим образом. После нажатия кнопки *S1* (Пуск) срабатывает контактор *KB* и шунтирует кнопку *S1*, осуществляется пуск двигателя «Вперед». Для остановки двигателя необходимо нажать кнопку *S3* (Стоп). Пуск двигателя «Назад» осуществляется кнопкой *S2* и подобен пуску «Вперед». Чтобы предотвратить одновременное срабатывания контакторов *KB* и *KH*, существует электрическая блокировка с помощью нормально замкнутых контактов *KH* и *KB*. Защита от перегрузки осуществляется тепловыми реле *KK1* и *KK2*. От коротких замыканий силовая цепь защищается предохранителями *F1*, цепь управления — предохранителем *F2*.

Пуск асинхронного короткозамкнутого двигателя с помощью статорных сопротивлений. При пуске короткозамкнутого асинхронного двигателя ток в статоре двигателя в 6—8 раз превосходит номинальный, что сказывается на работе других потребителей. Большие пусковые токи асинхронных двигателей требуют повышенной мощности сети. Чтобы снизить пусковые токи асинхронных двигателей применяют искусственные методы пуска. Одним из таких методов является ограничение пускового тока с помощью статорных резисторов (рис. 11.9). Схема предусматривает вращение двигателя в одном направлении. После нажатия кнопки *S1* обмотки контактора *KM1* пускателя и реле времени *KT* оказываются под напряжением и контакты *KM1* замыкаются. Последовательно с двигателем *M* включаются сопротивления *R*, которые

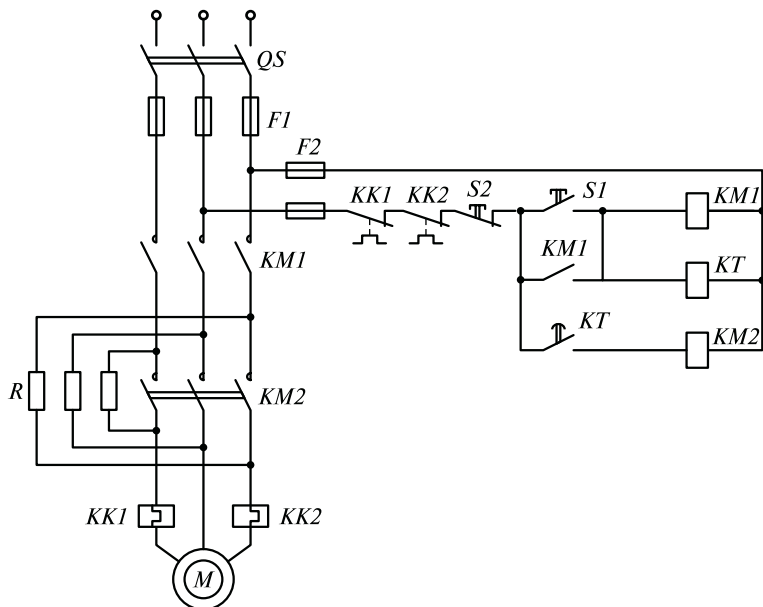


Рис. 11.9. Схема пуска асинхронного двигателя с помощью статорных резисторов

ограничивают пусковой ток. Через 2—4 с реле времени *KT* замыкает свой контакт в цепи катушки *KM2* и контактор *KM2* шунтирует своими контактами в силовой цепи резисторы *R*. Теперь все напряжение сети приложено к статорной обмотке двигателя и двигатель выходит на рабочий режим.

От перегрузки цепь защищена тепловыми реле *KK1* и *KK2*, от токов короткого замыкания — предохранителями *F1* и *F2*.

Ограничение пускового тока с помощью статорных резисторов *R* уменьшает также пусковой момент, что необходимо учитывать при реализации этой схемы управления.

Автотрансформаторный пуск асинхронного короткозамкнутого двигателя. Другой способ ограничения пусковых токов в асинхронном двигателе — применение автотрансформаторного пуска. С помощью автотрансформатора в начале пуска к обмоткам двигателя прикладывается только часть напряжения, что и позволяет снизить пусковой ток (рис. 11.10). Предложенная схема позволяет осуществить пуск короткозамкнутого асинхронного двигателя с вращением вала в одном направлении с разбиением пуска на три интервала времени. Порядок работы схемы следующий. При нажатии кнопки *S1* контактор *KM1* замыкает свои контакты в силовой и управляющей цепи. Одновременно с *KM1* подключается обмотка реле времени *KT1* и реле начинает отсчет времени (обычно 5—

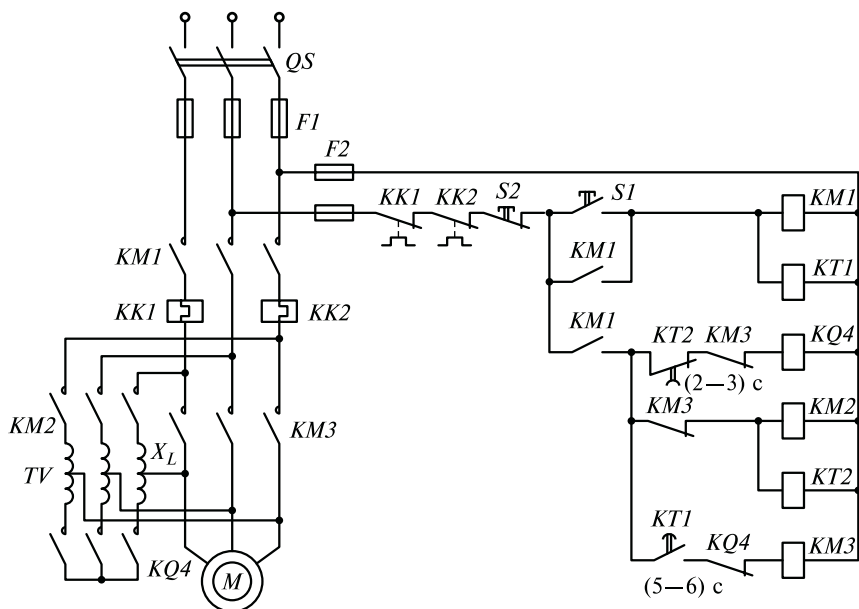


Рис. 11.10. Схема автотрансформаторного пуска

6 с). Затем подключаются контакторы $KQ4$, $KM2$ и реле времени $KT2$. Контакторы $KQ4$ и $KM2$ замыкают свои контакты в силовой цепи, к двигателю M прикладывается пониженное напряжение от автотрансформатора TV , и двигатель начинает разгоняться. Через 2—3 с реле $KT2$ размыкает свой контакт в цепи контактора $KQ4$, контактор $KQ4$ обесточивается, и контакты $KQ4$ размыкаются. Напряжение на обмотках двигателя возрастает, а силовая цепь из автотрансформаторной превращается в цепь с дополнительным реактивным сопротивлением X_L . Такое управление позволяет существенно облегчить пуск двигателя и уменьшить пусковой ток. Пусковой момент двигателя при таком пуске снижается до $0,85M_{\text{ном}}$. В схеме предусмотрена автоблокировка контакторов $KM2$, $KM3$ и $KQ4$, препятствующая одновременному включению контакторов. Защита от перегрузки осуществляется тепловыми реле $KK1$ и $KK2$, а от токов короткого замыкания — предохранителями $F1$ и $F2$.

Схема управления двигателем постоянного тока параллельного возбуждения. Для управления двигателем постоянного тока параллельного возбуждения применяют как релейно-контакторные, так и тиристорные схемы управления. Релейно-контакторная схема управления двигателем постоянного тока при вращении вала в одном направлении приведена на рис. 11.11. Порядок работы схемы следующий. Пуск осуществляется кнопкой $S1$. При нажатии на нее срабатывает контактор $KM1$ и замыкает свои контакты, в результате

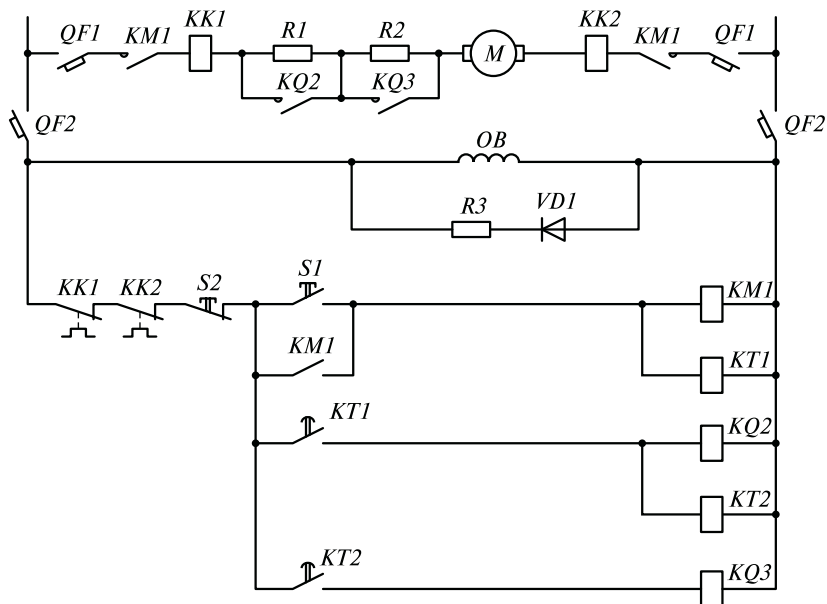


Рис. 11.11. Схема управления двигателем постоянного тока

этого реле времени $KT1$ начинает отсчет времени. Якорь двигателя M подключается к сети через последовательно включенные добавочные резисторы $R1$ и $R2$. Эти резисторы ограничивают пусковой ток, и двигатель начинает разгоняться. Через время t_1 реле времени $KT1$ подключает катушки контактора $KQ2$ и реле времени $KT2$ к сети. Контакт $KQ2$ своим контактом шунтирует резистор $R1$, частота вращения двигателя возрастает. Через время t_2 реле времени $KT2$ замыкает свой контакт, и к сети подключается катушка контактора $KQ3$. Контакт $KQ3$, замыкаясь, шунтирует резистор $R2$, и якорь двигателя подключается к полному напряжению сети.

Отключение двигателя производится нажатием кнопки $S2$. При этом контактор $KM1$ теряет питание и размыкает контакты в силовой цепи. Двигатель останавливается.

У двигателя постоянного тока параллельного возбуждения обмотка возбуждения OB всегда включается в цепь первой, а отключается после обмотки якоря. OB обладает большой индуктивностью и при отключении возникающая ЭДС индукции может пробить изоляцию обмотки. Для предотвращения пробоя параллельно OB включают резистор $R3$ и диод $VD1$.

Тиристорный электропривод. Широкое распространение получил тиристорный электропривод. На основе управляемых диодов — тиристоров — промышленностью выпускается широкий спектр тиристорных преобразователей для двигателей переменного и

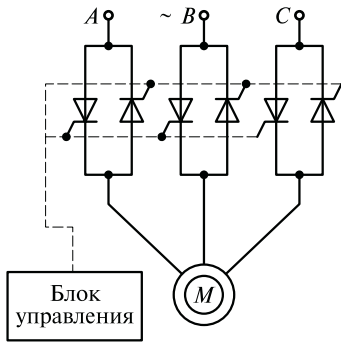


Рис. 11.12. Схема тиристорного управления асинхронным двигателем

торной обмотки от номинального до нуля. Данная схема широко применяется в устройствах мягкого пуска асинхронных двигателей и позволяет работать с наибольшим КПД при неполной нагрузке двигателя.

Схема тиристорного управления в цепи ротора (рис. 11.13) применяется для асинхронного двигателя с фазным ротором. У тиристоров $VS1$ и $VS2$, управляемых блоком управления, изменяются интервалы времени открытого и закрытого состояния, что, в свою очередь, приводит к изменению тока ротора. В результате изменяется эквивалентное сопротивление цепи ротора и, следовательно, частота вращения двигателя.

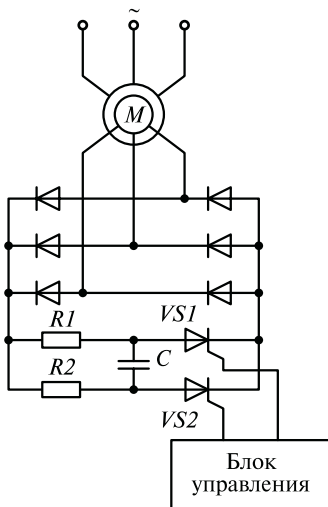


Рис. 11.13. Схема тиристорного регулирования в цепи ротора

постоянного тока. Тиристорные преобразователи имеют высокий КПД (0,90...0,95), сравнительно малые размеры и массу, хорошее быстродействие и отсутствие вращающихся частей.

Схема бесконтактного ключа в цепи статора асинхронного двигателя содержит встречно-параллельные тиристоры в каждой фазе (рис. 11.12) и позволяет регулировать напряжение на обмотке статора. Для управления тиристорами служит специальный блок управления, который меняет угол открывания тиристоров, что позволяет регулировать напряжение статорной обмотки от номинального до нуля.

Данная схема широко применяется в устройствах мягкого пуска асинхронных двигателей и позволяет работать с наибольшим КПД при неполной нагрузке двигателя. В результате изменяется эквивалентное сопротивление цепи ротора и, следовательно, частота вращения двигателя.

Обе рассмотренные схемы с тиристорным управлением могут применяться в замкнутых системах автоматического регулирования, когда электропривод работает практически без вмешательства оператора.

Тиристорные преобразователи частоты применяют для регулирования частоты асинхронного двигателя. Известно, что частота вращения асинхронного двигателя при постоянной частоте электрического тока меняется незначительно и ограничена синхронной частотой n_1 . Чтобы изменить n_1 , необходимо изменить частоту электрического тока. Изменяют частоту с помощью тиристорных инверторов. Упрощенная схема однофазного инвер-

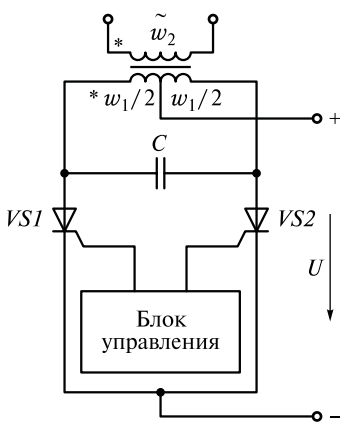


Рис. 11.14. Схема однофазного инвертора

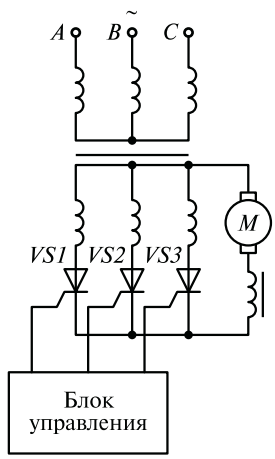


Рис. 11.15. Тиристорная схема управления двигателем постоянного тока

тора приведена на рис. 11.14. Существуют и трехфазные инверторы, которые позволяют преобразовывать постоянное напряжение U в переменное трехфазное с любой частотой. В качестве источника постоянного напряжения используют выпрямленное напряжение сети переменного тока. Обычно это напряжение также регулируется с помощью тиристоров. Для получения оптимальной работы двигателя необходимо поддерживать соотношение $U/f = \text{const}$. Применение регулирования частоты и напряжения асинхронного двигателя позволяет плавно изменять частоту вращения $n_{\text{max}}/n_{\text{min}}$ в диапазоне от 1 до 50 с мощностью преобразователя до 1 МВт.

Для регулирования частоты вращения якоря двигателей постоянного тока применяют управляемые тиристорные выпрямители (рис. 11.15).

Управляющее устройство позволяет включать тиристоры к каждой фазе в зависимости от угла управления α . В отрицательные полупериоды фазных напряжений тиристоры соответствующих фаз закрываются.

Среднее значение выпрямленного напряжения на якоре двигателя зависит от угла α и находится по формуле

$$U_{\text{я}} = \frac{3}{2\pi} U_m (1 + \cos \alpha),$$

где U_m — амплитуда напряжения сети; α — угол запаздывания включения тиристоров.

Использование тиристорного управляемого выпрямителя позволяет в сочетании с обратными связями получить диапазон регулирования скоростей от 1 до 100.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные элементы электропривода.
2. Приведите пример многодвигательного электропривода.
3. От чего зависит температура двигателя?
4. Назовите основные режимы работы электропривода.
5. Нарисуйте циклы нагрева и охлаждения двигателя в продолжительном и повторно-кратковременном режимах работы.
6. Напишите формулу для определения ПВ в процентах.
7. Объясните назначение основных элементов схемы управления двигателей.
8. Объясните назначение и функционирование схемы, показанной на рис. 11.8.
9. Для чего включают резисторы в цепь статора асинхронного короткозамкнутого двигателя?
10. Объясните порядок работы схемы, показанной на рис. 11.10.
11. Какова область применения асинхронных двигателей с фазным ротором?
12. Как производится пуск двигателя постоянного тока параллельного возбуждения?
13. Для чего применяют тиристорный электропривод переменного тока?
14. Приведите примеры применения преобразователей частоты для управления асинхронными двигателями.

Темы рефератов

1. Частотное регулирование асинхронных двигателей.
2. Различные методы пуска асинхронных двигателей.
3. Обзор приводов на основе асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока.
4. Виды защит электроприводов от нештатных режимов.

12.1. Электрические и световые характеристики источников света

Электрическое освещение предназначено для создания комфортных световых условий в быту, на производстве и в различных учреждениях. Основными устройствами в электрическом освещении являются источники света. Источники света преобразуют электрическую энергию в электромагнитные волны видимого спектра от 0,38 до 0,78 мкм.

Источники света можно подразделить на тепловые и газоразрядные. Тепловые источники света при нагревании излучают свет. К ним относятся лампы накаливания, дуговые угольные источники, различные инфракрасные нагреватели. Газоразрядные источники света используют разряд в газах при прохождении электрического тока, в результате чего излучается свет. К газоразрядным источникам света относятся люминесцентные лампы, дуговые ртутные лампы, лампы высокочастотного и импульсного разряда. Электрические источники света характеризуются световыми и электрическими величинами. К электрическим величинам относятся номинальное напряжение, мощность и ток. Основными световыми величинами являются световой поток Φ , излучаемый лампой, световая отдача лампы и освещенность E . Единицей светового потока является люмен (лм), световая отдача лампы равна отношению светового потока Φ к потребляемой источником электрической мощности P , т. е. Φ/P . Единицей световой отдачи является люмен на ватт $\left(\frac{\text{лм}}{\text{Вт}}\right)$. Чем больше световая отдача, тем более экономичным и совершенным является источник света.

Важной характеристикой электрических источников света является срок службы, измеряемый в часах. Срок службы широко применяемых источников света колеблется от 200 до 20 000 ч.

12.2. Требования к освещению рабочей поверхности

Основной задачей электрического источника света является создание необходимой освещенности рабочей поверхности. Освещенность E определяет интенсивность светового потока Φ на освещаемой поверхности S , т. е. $E = \Phi/S$. Единицей освещенности

является люкс (лк). Чем больше освещенность, тем более комфортными являются условия работы. Распределение освещенности по рабочей поверхности зависит от источника света, расстояния до него и вида светильника.

Выбор освещенности различных рабочих мест производится в соответствии со строительными нормами и правилами (СНиП). Рабочие места характеризуются разрядами в зависимости от зрительной работы с объектами различных размеров. Так зрительные работы с объектами размером 0,1 мм требуют освещенности рабочего места в 5000 лк, а работа с объектами размером более 5 мм — 200 лк, для освещения площадей и улиц в ночное время достаточно всего 15... 20 лк.

12.3. Типы источников света

Лампы накаливания. Лампы накаливания (ЛН) находят широкое применение в качестве источников света в быту и на производстве. Это объясняется достаточно простой конструкцией и простотой в эксплуатации. Лампа накаливания не требует специальных дополнительных устройств для включения в электрическую цепь.

Конструкция ЛН приведена на рис. 12.1. Основными элементами ЛН являются колба 1, вольфрамовая нить 2 и цоколь 3. Вольфрамовая нить при нагревании излучает свет и тепло, что приводит к испарению и утончению нити. Для замедления этого процесса колбы выполняются либо вакуумными, либо наполняются инертным газом — криптоном, аргоном и др. Материалом нити обычно служит тугоплавкий металл — вольфрам. Для увеличения светоотдачи ЛН нить накала выполняется в виде спирали. Для соединения ЛН с сетью служит цоколь, который имеет несколько типоразмеров Е11, Е27, Е40. Срок службы ЛН составляет 1000... 1100 ч.

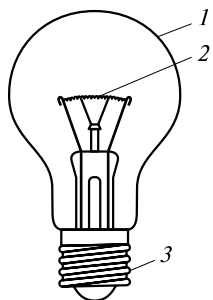


Рис. 12.1. Лампа накаливания:

1 — колба; 2 — вольфрамовая нить; 3 — цоколь

Основным достоинством ЛН является простота конструкции и эксплуатации. Номенклатура ЛН составляет более 1500 наименований. В ряде производств применяются только лампы накаливания.

Недостатками ЛН являются малая светоотдача, небольшой срок службы и большая зависимость срока службы от напряжения. При повышении напряжения на 10 % срок службы ЛН сокращается в 3—4 раза.

Галогенные лампы накаливания. С 60-х гг. XX в. широкое распространение получили галогенные

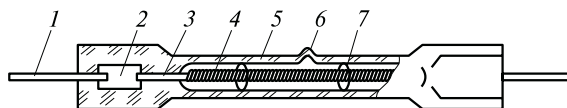


Рис. 12.2. Галогенная лампа накаливания:

1 — выводы; 2 — молибденовая фольга; 3 — вольфрамовые вводы; 4 — спираль-накал; 5 — кварцевая колба; 6 — корпус; 7 — держатель

лампы накаливания (ГЛН). Материалом накала является вольфрам, а колба изготовлена из кварцевого стекла и заполнена ксеноном с добавкой галогенного элемента. Образующиеся во время работы галогениды вольфрама препятствуют испарению вольфрама накала. Это позволяет повысить вдвое срок службы ГЛН по сравнению с ЛН при большей световой отдаче. Световая отдача ГЛН в 2—3 раза больше, чем у ЛН.

Устройством ГЛН показано на рис. 12.2. В длинную кварцевую колбу 5 помещена вольфрамовая спираль-накал 4, закрепленная на держателях 7. Вольфрамовые вводы 3 соединены с выводами 1 с помощью впаянной в кварц молибденовой фольги 2. Накал ГЛН изготавливается из специальных марок вольфрамовой проволоки в виде спирали.

Основное применение ГЛН находят в светильниках общего освещения и прожекторах, киносъёмочном освещении, автомобильных фарах, аэродромных огнях и т.д.

Люминесцентные лампы. Эти лампы используют свойство электрического разряда в газовой среде. В зависимости от рода газа или паров металла можно получить световой поток любой цветности. Конструкция люминесцентной лампы (ЛЛ) показана на рис. 12.3, а. Люминесцентная лампа состоит из стеклянной трубки 1, двух спиралей 3, расположенных на обоих концах, ножки 4, связывающей спираль с цоколем 6, и контактных штырей 5. Чтобы увеличить светоотдачу, внутреннюю поверхность стеклянной колбы покрывают специальным составом — люминофором 2. Во время электрического разряда возникают ультрафиолетовые лучи, которые воздействуют на люминофоры и преобразуют невиди-

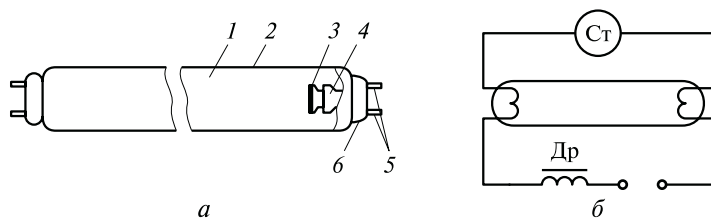


Рис. 12.3. Конструкция (а) и схема (б) люминесцентной лампы:

1 — трубка; 2 — люминофор; 3 — спираль; 4 — ножка; 5 — штыри; 6 — цоколь

мые ультрафиолетовые лучи в спектр видимого излучения. Это явление называется люминесценцией.

Разряд в электрическом газе зависит от многих факторов: приложенного напряжения; типа газа; наличия паров металлов; частоты тока; температуры и т. д. Для облегчения появления разряда в лампе в колбу добавляют вместе с инертным газом небольшое количество паров ртути. В момент включения две спирали, расположенные на обоих концах трубки, нагревают пространство вокруг электродов, это пространство ионизируется и происходит электрический разряд. После появления разряда спирали отключаются специальным устройством — стартером (Ст). Для ограничения тока после появления в ЛЛ разряда добавляют балластный дроссель (Др). Наиболее типичная схема включения ЛЛ со стартером и дросселем показана на рис. 12.3, б. В схеме дроссель не только ограничивает ток ЛЛ после зажигания, но и способствует зажиганию лампы.

Современные ЛЛ имеют большую светоотдачу и высокий КПД. Срок службы ЛЛ более продолжительный, чем у ЛН, и достигает 14 000 ч. Применяются ЛЛ для освещения учреждений и промышленных предприятий.

Недостатками ЛЛ являются необходимость пускорегулирующих устройств при подключении к сети и пульсация светового потока.

Дуговые ртутные люминесцентные лампы. В отличие от газоразрядных трубчатых люминесцентных ламп, которые заполнены инертным газом низкого давления, дуговые ртутные люминесцентные лампы (ДРЛ) относятся к газоразрядным лампам высокого давления.

Дуговая ртутная люминесцентная лампа (рис. 12.4.) состоит из кварцевой разрядной трубки 5, помещенной в стеклянную колбу 3. Внутренняя поверхность колбы покрыта слоем люминофора фосфат-ванадат иттрия 4. Видимое излучение ртутного разряда (электрод 6) проходит через слой люминофора, а ультрафиолетовое излучение кварцевой горелки люминофор преобразует в видимую красную область спектра. Это позволяет примерно в 10 раз увеличить яркость ламп по сравнению с ЛЛ.

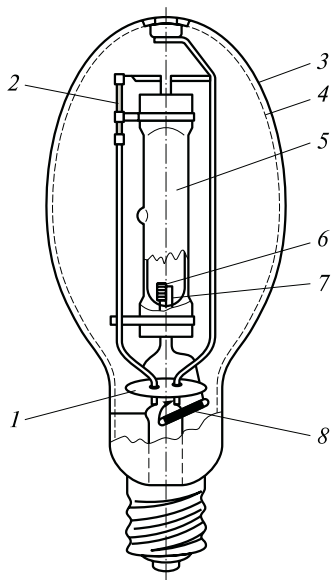


Рис. 12.4. Дуговая ртутная люминесцентная лампа (ДРЛ): 1 — экран; 2, 7, 8 — вспомогательные электроды; 3 — колба; 4 — слой люминофора; 5 — разрядная трубка; 6 — электрод

Дуговые ртутные люминесцентные лампы изготавливаются мощностью от 80 до 4000 Вт со средним сроком службы 10 000... 12 000 ч. Для облегчения зажигания большинство ДРЛ имеют кроме двух основных электродов еще два вспомогательных 7 и 8. Обычно ДРЛ подключаются в сеть либо с дросселем (рис. 12.5, *а*), либо с трансформатором (рис. 12.5, *б*).

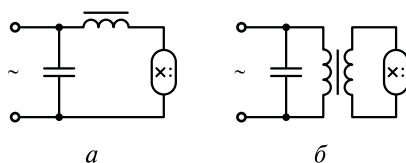


Рис. 12.5. Пусковые схемы ДРЛ с дросселем (*а*) и трансформатором (*б*)

Основные области применения ДРЛ — наружное освещение, освещение промышленных предприятий с высокими потолками.

К недостаткам ДРЛ следует отнести большое содержание красного цвета и высокий коэффициент пульсации. В маркировке ламп цифра соответствует мощности. Например ДРЛ 700 означает дуговую ртутную лампу мощностью 700 Вт.

Натриевые лампы. Эти лампы в настоящее время являются самыми экономичными источниками света. Различают натриевые лампы низкого давления (НЛНД) и натриевые лампы высокого давления (НЛВД). Так, НЛНД имеют большую световую отдачу, но неудовлетворительную цветовую передачу, поэтому большее распространение получили НЛВД типа ДНаТ (дуговые натриевые трубчатые).

Оформление этих ламп имеет различный вид (рис. 12.6). Лампы ДНаТ представляют собой стеклянную цилиндрическую или эллиптическую колбу, внутри которых помещается разрядная трубка из поликристаллической окиси алюминия. В этих лампах используется разряд в парах натрия, ртути и зажигающем газе ксенона. Рабочее давление паров натрия 4—14 кПа. При таком давлении желтый цвет приобретает белый оттенок.

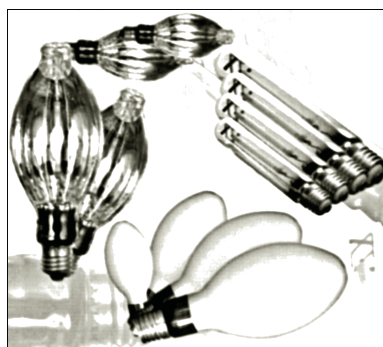
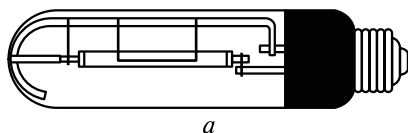


Рис. 12.6. Натриевые лампы типа ДНаТ:

а — цилиндрическая; *б* — в виде колбы

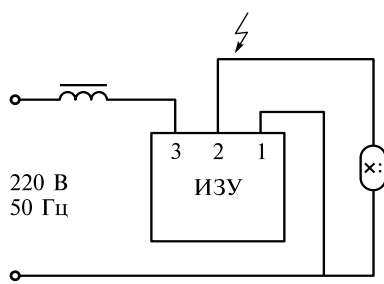


Рис. 12.7. Схема пускового устройства для ламп ДНаТ

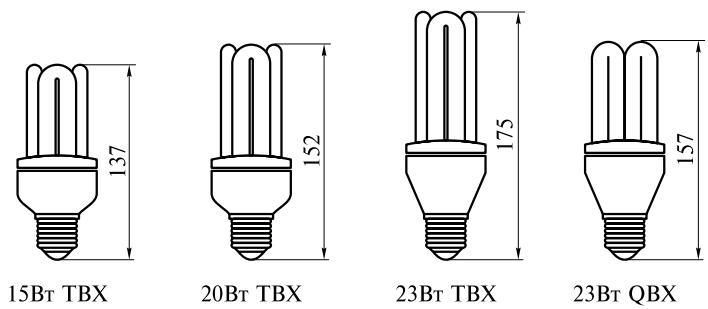


Рис. 12.8. Типы компактных люминесцентных ламп

Лампы ДНаТ применяются для освещения больших по площади территорий, улиц, автодорог, различных карьеров, портов и успешно заменяют ДРЛ.

Для зажигания лампы ДНаТ применяют специальные пусковые устройства (рис. 12.7). В некоторых лампах небольшой мощности пусковое устройство размещено в цоколе лампы. Цифры типа лампы соответствует мощности лампы.

Энергосберегающие люминесцентные компактные лампы. За рубежом и в России освоено производство энергоэкономичных ком-

Таблица 12.1

Мощности и световые потоки компактных люминесцентных ламп и ламп накаливания

Типы ламп КЛЛ	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Мощность аналогичной лампы накаливания, Вт
КЛЭ11-4	11	600	60
КЛЭ15-4	15	900	75
КЛЭ20-4	20	1200	100
КЛЭ23-4	23	1500	120

пактных люминесцентных ламп (КЛЛ) со встроенным электронным пусковым устройством и цоколем обычной лампы накаливания E22, E27. Типы ламп КЛЛ показаны на рис. 12.8. Наличие электронного пускового устройства обеспечивает мгновенное зажигание лампы и уменьшает пульсацию светового потока, что благотворно сказывается на зрении человека.

Так, КЛЛ потребляет в 5 раз меньше электроэнергии и имеет в 8—10 раз больший срок службы по сравнению с лампами накаливания.

Например, компактные лампы Саранского завода «Лисма» КЛЭ мощностью 11 Вт эквивалентны по световому потоку ЛН мощностью 60 Вт (табл. 12.1).

Можно не сомневаться, что КЛЛ в ближайшем будущем значительно потеснят привычные лампы накаливания.

12.4. Некоторые особенности применения газоразрядных ламп

Газоразрядные лампы типов ЛЛ, ДРЛ, ДНаТ и ряд других имеют пусковые устройства. В комплект пусковых устройств, как правило, входит индуктивное балластное сопротивление для ограничения тока дугового разряда. Наличие индуктивного сопротивления в цепи лампы приводит к появлению фазового сдвига между напряжением и током лампы и, как следствие, к уменьшению коэффициента мощности $\cos\varphi$. Чтобы увеличить коэффициент мощности, в электрические схемы ламп добавляют конденсаторы, компенсирующие появляющуюся от балластных сопротивлений реактивную мощность.

Особенностью газоразрядных ламп является также конструктивное исполнение пусковых устройств в цоколе лампы. В этом случае вместо крупногабаритных пусковых устройств применяют компактные электронные пусковые регулирующие аппараты (ПРА), которые размещают в цоколях ламп. В настоящее время такими устройствами оснащаются лампы типа КЛЛ и некоторые лампы ДНаТ.

Контрольные вопросы

1. Назовите электрические характеристики источников света.
2. Какими световыми величинами характеризуется источник света?
3. Что называется освещенностью?
4. Объясните конструкцию лампы накаливания.
5. Назовите преимущества и недостатки люминесцентных ламп.
6. Назовите основные конструктивные элементы галогенных ламп накаливания.

7. Объясните конструкцию дуговой ртутной люминесцентной лампы.
8. Объясните конструкцию натриевых ламп.
9. Что такое компактные люминесцентные лампы?
10. Для чего в электрическую цепь люминесцентных ламп включаются дроссель и конденсатор?

Темы рефератов

1. Световая отдача различных источников света.
2. Влияние типов осветительных установок на освещенность.
3. Типы пусковых регулирующих аппаратов для дуговых ламп.

13.1. Проблемы и перспективы производства электроэнергии

В начале XXI в. $\frac{4}{5}$ электроэнергии в мире вырабатывается на тепловых и атомных электростанциях (ТЭС и АЭС) путем сжигания органических (нефть, газ, уголь, мазут) или ядерных топлив с последующим нагревом воды и преобразованием энергии пара сначала в механическую работу (вращение ротора турбины), а затем в электроэнергию.

Во внутреннем энергопотреблении России особенно велика доля газа (более 50 %) вследствие его относительной дешевизны на внутреннем рынке. Однако разведанных запасов нефти и газа — основных видов топлива для производства электроэнергии — хватит не более чем на 70 лет (в России до 2020 г. будут отработаны $\frac{4}{5}$ запасов действующих месторождений нефти и газа). Все это требует изменения структуры потребляемых топлив и соответственно замены или модернизации оборудования для производства электроэнергии.

Дополнительную сложность в этот процесс вносит большая степень износа оборудования — в 2000 г. $\frac{1}{5}$ генерирующих мощностей электростанций уже выработала свой проектный ресурс, а к 2020 г. свой ресурс выработают уже $\frac{9}{10}$ мощностей электростанций. Подобное обстоятельство не привлекало внимание общественности только потому, что из-за снижения объемов производства и, следовательно, потребления энергии в 90-х гг. XX в. существующие мощности удовлетворяли потребности электроснабжения. С начавшимся в XXI в. подъемом промышленности и увеличением потребления электроэнергии этих мощностей уже будет не хватать.

С учетом этих обстоятельств была принята Энергетическая стратегия Российской Федерации до 2020 г., согласно которой ТЭС будут постепенно переводиться на уголь, запасов которого предположительно хватит на столетия. Реализация этой стратегии сопряжена с рядом трудностей.

Во-первых, угольная технология производства электроэнергии существенно дороже газовой.

Во-вторых, переход от экологически достаточно чистой газовой технологии к угольной технологии выработки электроэнергии связан для России, располагающей в основном низкосортными углями, с решением экологической проблемы снижения

выбросов в атмосферу тепловых станций различных вредных веществ.

Специалисты видят решение этой проблемы в использовании таких современных технологий, которые обеспечивают повышение КПД ТЭС и снижение их выбросов в атмосферу.

Перспективными представляются технологии, основанные на использовании газотурбинных установок (ГТУ) — систем, состоящих из воздушного компрессора, камеры сгорания, газовой турбины и электрогенератора, а также парогазовых установок (комбинаций газотурбинных и паротурбинных установок).

Энергетическая стратегия России предусматривает также увеличение производства электроэнергии на АЭС, а в более отдаленной перспективе — к увеличению производства электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии. Атомная технология производства электроэнергии также является существенно более дорогой, чем газовая, кроме того, она связана с решением таких серьезных экологических проблем, как снижение выбросов в атмосферу вредных веществ на АЭС, а также с необходимостью утилизации отработанного ядерного топлива. Общественное мнение также настроено против сооружения АЭС. Работа ТЭС и АЭС связана с образованием излишков теплоты, которая передается окружающей среде, поэтому говорят о тепловом загрязнении Земли при работе этих станций. Поскольку в XXI в. экологические проблемы будут иметь все большее значение, то одним из перспективных путей решения проблемы производства электроэнергии будет использование возобновляемых источников энергии.

13.2. Производство электроэнергии с использованием возобновляемых источников. Объемы такого производства, его преимущества и перспективы

Возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) называют энергию Солнца, ветра, тепла Земли, рек, морей и океанов, биомассы (дрова, бытовые и сельскохозяйственные отходы) и т.д. — т.е. энергию постоянно или периодически действующих процессов в природе.

По оценке специалистов, в 1980 г. доля производимой с использованием ВИЭ электроэнергии составляла всего 1 %, в 2005 г. — 5 %, в 2020 г. достигнет 10 %, а в 2060 г. — 33 %. В некоторых передовых странах, обделенных собственными запасами традиционных топлив, эта доля еще больше: в Дании с использованием ВИЭ сейчас вырабатывается 10 % электроэнергии, а в ближайшие годы будет вырабатываться 20 %.

Столь сильный рост использования ВИЭ для производства электроэнергии объясняется в основном двумя обстоятельствами: истощением запасов таких органических топлив, как нефть и газ, а также экологичностью ВИЭ, которая позволяет сберечь окружающую среду.

В России производство электроэнергии с использованием ВИЭ целесообразно организовать прежде всего в тех удаленных районах, которые не подключены к сетям энергосистем. Это районы Крайнего Севера, Дальнего Востока, Сибири, Архангельской области. Завоз дизельного топлива, мазута, угля для производства электроэнергии в эти районы из-за высоких транспортных расходов делает стоимость производства электроэнергии на ТЭС неприемлемо высокой и связан с серьезными транспортными проблемами, часто решаемыми с привлечением МЧС. Использование ВИЭ в этих районах сняло бы эти трудности.

Целесообразно использовать ВИЭ и в энергонапряженных районах Центра, где часты отключения потребителей электроэнергии по тем или иным причинам. Автономность производства электроэнергии с использованием ВИЭ позволит предотвратить ущерб, наносимый потребителям электроэнергии от таких отключений.

Почему же ВИЭ в России не так распространены? Одна из причин — относительная дороговизна производства электроэнергии с использованием ВИЭ. Другая причина — непродуманность, недальновидность принимаемых инженерных решений. Например, малые (до 30 МВт) и микрогидроэлектростанции (до 100 кВт) (ГЭС), использующие энергию воды малых рек. Такие ГЭС эффективно работают в Европе — в Австрии, Финляндии, Норвегии, Швеции. В Китае к 2015 г. планируется построить более 40 тыс. малых ГЭС с ежегодным вводом мощностей до 1000 МВт. В России из-за ориентации на строительство только больших ТЭС и АЭС число малых ГЭС было сокращено с 5 тыс. в 50-х гг. до 300 в 90-х гг. XX в. И только сейчас начинается процесс восстановления разрушенных и строительство новых малых и микрогидроэлектростанций.

Производство электроэнергии с использованием ВИЭ можно совместить с решением такой серьезной экологической проблемы больших городов, как переработка отходов мусорных свалок.

В год 1 человек дает порядка 250 кг бытовых отходов — в основном биомассы, что эквивалентно 50 кг угля. Скорейшее внедрение технологии утилизации этих отходов с одновременной выработкой электроэнергии — один из перспективных путей решения экологической и энергетической проблемы XXI в.

Рассмотрим теперь два наиболее быстро развивающихся направления производства электроэнергии с использованием ВИЭ — солнечную и ветровую технологии производства электроэнергии.

13.3. Производство электроэнергии с использованием энергии Солнца

Фотоэффект, открытый в 1888 г. А. Г. Столетовым, показал возможность преобразования солнечной энергии в электрическую. Ныне эта идея реализуется в виде фотоэлектрических преобразователей, которые внешне выглядят как плоские панели, на которых при падении светового потока образуется электрическое напряжение. На основе таких преобразователей создают фотоэлектрические установки и электростанции, воздействие на окружающую среду которых минимально (нет выбросов газов в атмосферу, шумов, вибрации и т. д.). Подобная солнечная фотоэлектрическая электростанция состоит из фотоэлектрического преобразователя, инвертора (преобразователя постоянного напряжения в переменное — синусоидальное), накопителя электроэнергии (аккумулятора) и системы автоматического управления режимами ее работы.

В начале XXI в. ежегодный прирост мощностей солнечных электростанций дойдет до 30 %. Это объясняется постоянным снижением стоимости генерации электроэнергии с помощью фотопреобразования (за последние 5 лет она снизилась в 5 раз). И хотя эта стоимость все еще остается относительно высокой солнечные электростанции интенсивно внедряются в ряде стран, чему способствует специальная государственная политика. Так в Германии реализуется программа «100 тысяч фотоэлектрических крыш», в Японии и США планируется установка 1 млн таких крыш. Подобные программы — наглядный пример долгосрочного планирования перехода на экологически чистую энергетику, использующую только возобновляемую энергию. В Германии такие фотоэлектрические преобразователи часто устанавливают прямо на крышах промышленных предприятий, что улучшает их внешний вид. Конечно, страны лидеры в производстве солнечной электроэнергии: Япония, США, Израиль — расположены в районах с гораздо большей, чем Россия, солнечной активностью, но все же наше почти 100-кратное отставание от перечисленных стран в области солнечной энергетики далее недопустимо. В России перспективными районами для этого вида электростанций являются прежде всего южные районы, где годовой приход солнечной энергии больше.

13.4. Производство электроэнергии с использованием энергии ветра

Ветроэлектрическая станция представляет собой устройство, главным элементом которой является подвижная часть — рабочее колесо. Поток ветра, оказывая силовое воздействие на рабочее

колесо, заставляет его вращаться, т. е. энергия ветра преобразуется в энергию вращения колеса, вал которого непосредственно или через редуктор (для повышения частоты вращения) соединен с ротором электрогенератора. Наибольшее распространение в мире и России получили трехлопастные ветроэнергетические установки (ВЭУ), в состав которых входят: рабочее трехлопастное колесо 1, гондola с редуктором 2 и генератором, башня 3 и фундамент 4 (рис. 13.1). В качестве генератора ВЭУ используются синхронные и асинхронные, реже асинхронизированные синхронные генераторы. По мощностям ВЭУ принято подразделять на малые (до 10 кВт), средние (от 10 до 100 кВт), крупные (от 100 до 1000 кВт), сверхкрупные (более 1000 кВт). Лидер в области использования ВЭУ — Германия, где годовой прирост мощностей ВЭУ составляет 30 %, а установленная мощность всех ВЭУ на 01 января 2002 г. — 8734 мВт, в России установленная мощность ВЭУ в 1999 г. была всего 4 мВт — в 1000(!) раз меньше, чем у страны лидера. Вместе с тем ветроэнергетический потенциал у России весьма большой и, несомненно, его надо использовать.

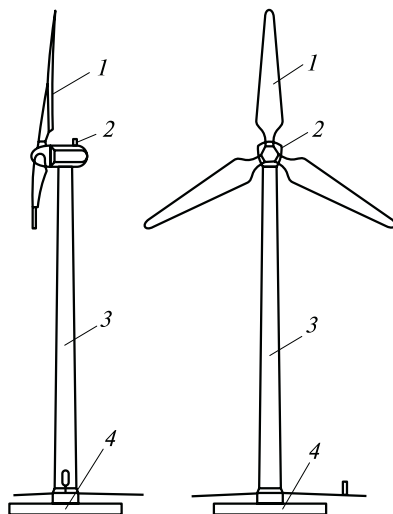


Рис. 13.1. Трехлопастная ветроэнергетическая установка:

1 — рабочее трехлопастное колесо; 2 — гондola с редуктором и генератором; 3 — башня; 4 — фундамент

13.5. Расширение области потребления электроэнергии

В XXI в. существенно расширится область потребления электроэнергии и изменится структура этого потребления. Рассмотрим некоторые тенденции в изменении структуры потребления электроэнергии и увеличение его областей.

Бытовое электропотребление. В США и развитых странах Европы доля бытового электропотребления составляет около $1/3$ от общего электропотребления, в современной России меньше $1/10$. На структуру электропотребления оказывают влияние климатические особенности страны. Для нашей страны характерно массовое использование электронагревательных приборов, для южных штатов США — кондиционеров. В целом наша структура электропо-

требления несовременна и несомненно будет претерпевать большие изменения с ростом благосостояния народа. В высокоразвитых странах число бытовых электроприборов, используемых в быту, достигает 50 наименований. Помимо базисной группы электроприборов (телевизор, холодильник, стиральная машина, утюг, пылесос, звуковоспроизводящая аппаратура) это электроприборы для тепловой (жарочные шкафы, тостеры, СВЧ печи, и т.д.) и механической (пищевые процессоры, электромясорубки, ломтерезки, электроножи и т.д.) обработки пищи, вспомогательные хозяйственные электроприборы (сушильные шкафы, посудомоечные машины, полотеры, мусородробилки, прессы для мусора и т.д.), электроприборы для поддержания микроклимата (ионизаторы, увлажнители и осушители воздуха, воздухоочистители и вентиляторы) и электроприборы личной гигиены (массажеры, сауны, электроодеяла и т.д.). Используемые в этих странах электроприборы бытового назначения гораздо экономичнее российских аналогов. Отсюда следует, что в условиях дефицита производства электроэнергии на отечественный рынок придет поток зарубежных электроприборов бытового назначения, если российская промышленность в ближайшее время не решит проблему повышения экономичности этих приборов.

Потребление электроэнергии в электротехнологических целях.

Если XX в. для электротехники был в основном веком электромеханики, то XXI в. в значительной мере будет веком электротехнологий. Главным образом это связано с растущими экологическими проблемами. Одна из них — утилизация мусора — была рассмотрена в подразд. 13.2. Другая проблема — обеззараживание питьевых, сточных и оборотных вод. К середине XXI в. чистая вода будет рассматриваться как стратегический товар в силу ее дефицита и потому названная проблема станет одной из самых востребованных. Поэтому спрос на различные электротехнологические установки обеззараживания воды (электроразрядные, ультрафиолетовые и т.д.) будет возрастать. Третья проблема — необходимость вмешательства в биотехнологические процессы, когда электротехнологии будут все чаще применяться для обеззараживания продуктов, дезинфекции зерна, управления сроками прорастания семян (за счет пропускания через них токов высоких частот) и т.д. Еще более востребованными окажутся и все традиционные направления электротехнологии — электротермия, электросварка, электрофизические методы обработки материалов.

Электротехника в области обеспечения гражданской, военной и государственной безопасности. Наряду с традиционными направлениями использования электротехники в этих областях — электроснабжением танков и другой подвижной наземной техники, а также кораблей, подводных лодок, самолетов, космической во-

енной техники, стартовых сооружений ракет, командных пунктов и узлов связи — в современных войсках используются уже системы электроснабжения бойцов. Поскольку управление войсками, наблюдение за противником (радиоразведка) строятся на использовании электротехники, то вывод ее из строя наносит противнику серьезный ущерб. Поэтому на вооружение современных армий берутся устройства, создающие мощный электромагнитный импульс, выводящий из строя все эти системы. Графитовые бомбы, примененные против объектов электроэнергетики дают рассеивание графитовых волокон, обладающих высокой электропроводностью, что приводит к замыканию токоведущих частей электроустановок (фаз воздушных линий электропередач, трансформаторов и т.д.).

Полиция также вооружается устройствами, наносящими не смертельные поражения путем многократных электрических разрядов (электрошокеры у нас, таузеры в США). Это новый тип так называемого нелетального оружия.

Электротехнические установки находят все более широкое применение в целях обеспечения гражданской и государственной безопасности — устройства, фиксирующие несанкционированное проникновение в жилище, устройства обнаружения взрывоопасных и наркосодержащих предметов.

Электротехника высоких технологий. Расширится использование электротехники в таких областях, как микроэлектротехника, космическая электротехника, робототехника; более широкое применение будут находить электроустановки на высоких, ультра- и сверхвысоких частотах (ВЧ, УВЧ, СВЧ) — вплоть до мега- и гигагерц, а также установки, работающие на новых физических принципах и явлениях. Одно из таких явлений — сверхпроводимость, открытое в 1911 г. Суть его заключается в том, что при очень низких температурах (близких к температуре абсолютного нуля — минус 273 °С) некоторые материалы практически теряют свое сопротивление и, следовательно, не дают потерь при их работе в электроустановках. Однако проблема охлаждения этих материалов до столь низких температур сама по себе требует больших материальных и энергетических затрат. Развитие электротехники на основе сверхпроводимости резко интенсифицировалось с открытием во второй половине XX в. явления высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП). Это явление связано с обнаружением материалов, приходящих в сверхпроводящее состояние при температуре всего в несколько десятков градусов ниже нуля по Цельсию. Ясно, что реализация такой, ее называют еще «теплой», сверхпроводимости уже не потребует особо сложной холодильной техники. По некоторым экспертным оценкам, в период с 2000 по 2020 г. объем продаж сверхпроводникового оборудования возрастет почти в 100 раз, страна лидер здесь — США.

Транспортная электротехника. Электрооборудование транспорта: магистрального (поезда, автомобили, самолеты, суда); городского (метро, трамваи и троллейбусы); промышленного (конвейеры, канатно-подвесные и грузовые монорельсовые дороги, электрокары) совершенствуется столь стремительно, что во-многом определяет как эффективность, так и стоимость транспортных средств. Показателен в этом отношении автомобиль, у которого стоимость электрооборудования выросла за последние несколько десятилетий с 5 % до 50 % от общей его стоимости и прежде всего за счет его автоматизации и интеллектуализации (бортовой компьютер).

Самым динамично развивающимся и важным по значению транспортом является железнодорожный транспорт (в России с его использованием осуществляется 80 % грузовых и более 40 % пассажирских перевозок). За первое десятилетие XXI в. в России планируется существенно повысить уровень грузовых перевозок по железной дороге, 80 % которых будет совершаться по электрифицированным железным дорогам. Еще большую значимость этот транспорт приобретет для пассажирских перевозок при введении высокоскоростных (160 км/ч и более) магистралей. На расстояниях до 1,5 км он окажется более предпочтительным, чем авиационный транспорт. В настоящее время в России подобных магистралей нет. Первая высокоскоростная магистраль была сооружена в Японии в 1964 г., рекорд скорости — более 500 км/ч. Создание электрооборудования для таких электропоездов, обеспечивающего экономичную и безопасную их работу — это интересная и исключительно важная задача для отечественных специалистов-электротехников.

13.6. Проблемы энергосбережения

Надвигающийся дефицит в производстве электроэнергии (см. подразд. 13.1) определяет необходимость более рачительного ее использования на всех стадиях производства, передачи, преобразования, потребления. Энергосбережение выдвигается и в качестве одной из основных задач реализации Энергетической стратегии Российской Федерации до 2020 г. Для решения этой задачи требуется прежде всего знание реальной картины потерь энергии, в связи с чем резко возрастет роль метрологического обеспечения электротехники, оснащение ее современными средствами контроля за расходом и качеством электроэнергии. Рассмотрим некоторые направления энергосбережения в области электротехники.

Применительно к электрическим сетям переменного тока это прежде всего строгое следование нормам обеспечения качества

электроэнергии. Внедрение средств компенсации реактивной мощности и улучшение гармонического состава токов и напряжений (синхронных компенсаторов, активных фильтров, тиристорных компенсаторов реактивной мощности и т.д.) может существенно повысить КПД работы таких сетей и продлить срок службы их элементов. Важным направлением энергосбережения является замена морально устаревших, низкоэффективных, но имеющих массовое распространение электроприборов и электроустановок.

В этом отношении показательна область бытовой светотехники — большинство эксплуатируемых ламп накаливания и люминисцентных ламп существенно уступают зарубежным аналогам по светоотдаче, срокам службы, энергоемкости. Еще один резерв энергосбережения связан с оснащением электроустановок эффективной системой диагностики под нагрузкой их технического состояния, а также с современной противоаварийной автоматикой, что позволит избегать аварийных ситуаций, ликвидация которых всегда связана с дополнительными затратами энергии, ресурсов и снижением срока службы самих электроустановок.

Особое отношение отводится учету и контролю электроэнергии, выработке рациональных приемов организации производства, при которых удельные расходы электроэнергии являются минимальными. В первую очередь эти вопросы затрагивают промышленные предприятия, на долю которых приходится более половины всей потребляемой электроэнергии. Особо электроемкими являются предприятия черной и цветной металлургии, нефтеперерабатывающие, химические и др.

На таких предприятиях трудятся многотысячные коллективы, объединенные общей технологической цепью. Поэтому в первую очередь необходимо правильно организовать производство, выявить места с повышенными потерями электроэнергии и внести оперативную коррекцию в технологический процесс. Для этого разрабатываются и внедряются на предприятия специальные автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ). Разработанные на единых принципиальных положениях, АСКУЭ предприятий учитывают особенности данного производства.

АСКУЭ позволяют:

осуществлять коммерческий учет электроэнергии с помощью трехфазных микропроцессорных счетчиков;

организовать автоматизированный технический учет, контроль и управление энергоресурсами по всему предприятию (корпуса, производства, цеха, участки, рабочие места и т.д.);

обеспечить контроль и управление процессами энергопотребления в реальном масштабе времени (любой момент времени);

делать анализ потребления энергоресурсов по времени суток, дням недели, месяцам, кварталам, годам.

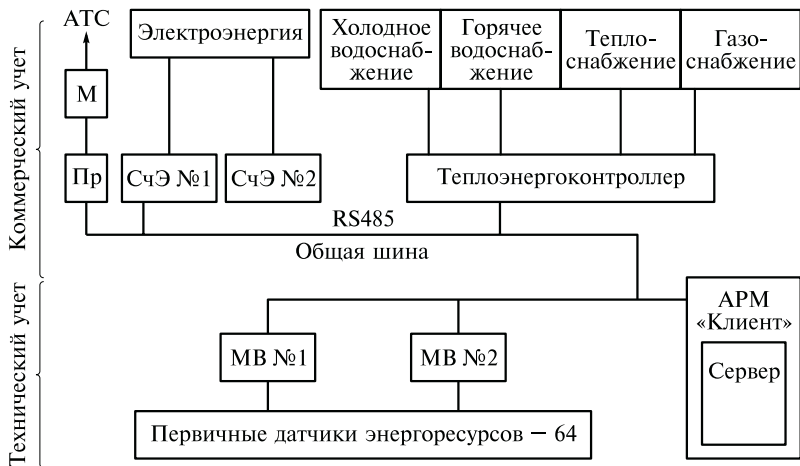


Рис. 13.2. Упрощенная структурная схема АСКУЭ предприятия пищевой промышленности

На рис. 13.2 приведена упрощенная блок-схема АСКУЭ предприятия пищевой промышленности.

Схема работает следующим образом. С помощью телефонной связи АТС через модем М и преобразователь — интерфейс — в сервер (главный компьютер системы) поступает информация со всех узлов коммерческого учета, мультиплексоров — вычислителей (МВ).

Мультиплексоры-вычислители подключены к первичным датчикам, с которых проводится параллельный непрерывный съем информации. По каналам телефонной связи информация поступает в сервер, где обрабатывается, накапливается и хранится. С сервером связаны с помощью автоматизированного рабочего места (АРМ) различные службы предприятия. С АРМ можно получить оперативную информацию на свой компьютер и внести коррекцию в технологический процесс.

Помимо электроэнергии данная система производит учет и контроль других энергоресурсов (воды, тепла, газа). Альтернативы энергосбережению в России нет, так как удельная энергоёмкость валового внутреннего продукта (ВВП) в России в несколько раз больше, чем в развитых странах Западной Европы.

Контрольные вопросы

1. Каковы проблемы производства электроэнергии в России и перспективы их разрешения?
2. Что такое возобновляемые источники энергии и каковы перспективы их использования в России?

3. Оцените роль электротехнологий в XXI веке.
4. Как решается проблема энергосбережения в электротехнике?

Темы рефератов

1. Энергетическая стратегия России.
2. Перспективы производства электроэнергии в России с использованием возобновляемых источников.
3. Энергопотребление в России и изменение его структуры.

ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА И ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

Работа с электроустановками, а иногда даже нахождение вблизи от них представляют определенную опасность. При неблагоприятном стечении обстоятельств человек может образовать путь для прохождения электрического тока и стать объектом приложения энергии. В этом случае над ним будет совершена работа, последствия которой могут быть весьма тяжелыми.

Прохождение через организм человека электрического тока сопровождается термическим, электролитическим и биологическим воздействиями.

Термическое воздействие тока приводит к ожогам отдельных участков тела, нагреву кровеносных сосудов, нервов, сердца, мозга, что вызывает их расстройство.

Электролитическое воздействие тока заключается в разложении органических жидкостей (крови и др.), нарушении их физико-химического состава.

Биологическое воздействие тока связано с нарушением биоэлектрических процессов, которые обеспечивают выполнение жизненных функций человека. В тканях организма человека содержатся особые клетки — рецепторы, обладающие особой чувствительностью к внешним и внутренним факторам. Их раздражение приводит к возникновению нервного электрического импульса, который по нервным путям передается в центральную нервную систему (т. е. в головной и спинной мозг). Реагируя на полученное таким образом сообщение, центральная нервная система посылает ответный импульс к рабочим органам — мышцам, железам, сосудам. Так функционирует наш организм. Внешний электрический ток оказывается чрезмерно сильным возбудителем рецепторов, и центральная нервная система в ответ на это чрезмерное возбуждение выдает команду исполнительным органам организма. Последствия этого могут быть трагическими. Кроме того, внешний ток вступает во взаимодействие с биотоками, вызывая специфические расстройства в организме человека.

Насколько же часто на производстве происходят несчастные случаи, вызванные поражением человека электрическим током и какова степень опасности таких случаев? Анализ (статистика) производственного травматизма дает следующие ответы на эти вопросы.

Число травм, вызванных поражением человека электрическим током, не велико — меньше 1 % от общего числа производственных травм.

Смертельные случаи, вызванные поражением человека электрическим током, составляют 20... 40 % (в энергетике — 60 %) от общего числа смертельных несчастных случаев на производстве. При этом 75... 80 %

смертельных случаев, вызванных поражением человека электрическим током, наступают при относительно низком напряжении — до 1000 В. В связи с этим специалисты особое внимание уделяют требованиям безопасности в электротехнике. Эти требования составляют содержание специального предмета «Основы техники безопасности в электротехнике», положения которого основываются на знании настоящего курса электротехники.

Рассмотрим меры безопасности, которые необходимо принять, приступая к лабораторным занятиям по электротехнике, и знание которых необходимо любому взрослому человеку, столкнувшемуся с проблемой ремонта или монтажа электроустановок напряжением до 1000 В. Все вещества в электротехнике принято подразделять по их электрическим свойствам на две большие группы — проводники и диэлектрики. Проводники (металлы, растворы кислот, щелочей, все влажные предметы) обладают свойством проводить электрический ток под действием приложенного напряжения. Как проводник можно рассматривать и человеческое тело. Диэлектрики (фарфор, стекло, резина, ряд пластмасс, некоторые масла, сухое дерево) этим свойством почти не обладают. Идеальных диэлектриков не существует, все они хотя бы в незначительной степени проводят электрический ток. Если же приложенное к ним напряжение окажется очень большим, то произойдет разрушение структуры материала — так называемый «пробой» диэлектрика, в результате чего он потеряет свои свойства.

Одной из важнейших мер, обеспечивающих безопасность эксплуатации электроустановок напряжением до 1000 В, является использование средств индивидуальной защиты (СИЗ) при работе с этими электроустановками, а также их защитное заземление.

Средства индивидуальной защиты изолируют человека от металлических частей электротехнических установок, а также от земли. Основными СИЗ являются: диэлектрические перчатки и специальный монтажный инструмент (пассатижи, кусачки, отвертки), рукоятки которого покрыты изолирующим материалом. Основные СИЗ обладают такой изоляцией, которая позволяет при работе с электроустановками касаться их токоведущих частей. К дополнительным средствам, усиливающим защитное (изолирующее) действие основных средств, относятся диэлектрические (резиновые) боты и коврики.

Защитное заземление — преднамеренное электрическое соединение с землей металлических нетокковедущих частей электротехнических устройств, прежде всего их корпусов. Корпуса силовых устройств (двигателей, генераторов, трансформаторов), а также корпуса приборов (вольтметров, осциллографов и др.) изготавливают обычно из металлов для защиты этих устройств от воздействия окружающей среды. Поскольку металл является проводником, то корпус может в процессе эксплуатации устройства соединиться с его токоведущими элементами и оказаться под напряжением, что опасно для находящихся рядом с электроустановкой людей. Поэтому корпуса электротехнических устройств с помощью заземляющих проводников подсоединяют к заземлителю (проводнику, находящемуся в непосредственном соединении с землей) и

тем самым предотвращают возможность опасного возрастания напряжения на корпусе устройства относительно земли.

Если в электроустановке имеется специальная нейтральная глухозаземленная точка, то вместо заземления входящих в эту электроустановку электротехнических устройств применяют так называемое зануление. При занулении корпуса электротехнических устройств соединяются со специальным нулевым защитным проводником, который, в свою очередь, подсоединяется к этой нейтральной точке.

Техническое исполнение электроустановок, их установка и эксплуатация осуществляются согласно Правилам устройств электроустановок (ПУЭ), а все виды работ с электроустановками строго регламентируются соответствующими требованиями техники безопасности. Строгое соблюдение этих требований — необходимое условие безопасности в электротехнике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Данилов И. А.* Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для неэлектротехн. спец. техникумов. — 2-е изд. — М.: Высш. шк., 1989.
2. Задачник по электротехнике: Учеб. пособие / П. Н. Новиков, В. Я. Кауфман, О. В. Толчеев и др. — М.: ИРПО; Издательский центр «Академия», 1998.
3. *Касаткин А. С.* Основы электротехники: Учеб. пособие для ПТУ. — 3-е изд., стер. — М.: Высш. шк., 1986.
4. *Китаев В. Е.* Электротехника с основами промышленной электроники: Учебник для ПТУ. — 2-е изд. — М.: Высш. шк., 1985.
5. *Ломоносов В. Ю., Поливанов К. М., Михайлов О. П.* Электротехника. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Основы современной энергетики: курс лекций для менеджеров энергетических компаний: В 2 ч. / Под ред. Е. В. Аметистова. — М.: Изд-во МЭИ, 2004.
7. Электротехника и электроника: Учеб. пособие для ПТУ / М. К. Бечева, И. Д. Златенов, П. Н. Новиков, Е. В. Шапкин. — М.: Высш. шк., 1991.
8. Электротехника: Учебник для ПТУ / А. Я. Шихин, Н. М. Белоусова, Ю. Х. Пухляков и др. — М.: Высш. шк., 1989.
9. Электротехника и основы электрики: Учебник для вузов / Под ред. О. Л. Глудкина, Б. П. Соколова. — М.: Высш. шк., 1993.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
----------------	---

РАЗДЕЛ I. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

Глава 1. Электрические цепи постоянного тока	7
----------------------------------------------------	---

1.1. Понятие об электрической цепи, электрическом токе, напряжении, электродвижущей силе	7
1.2. Элементы, схемы электрических цепей и их классификация	9
1.3. Элементы электрических цепей постоянного тока. Законы Ома и Кирхгофа. Задача расчета цепей	13
1.4. Преобразования схем в задачах расчета сложных цепей постоянного тока. Метод эквивалентного генератора	17
1.5. Метод узловых напряжений	19
1.6. Метод контурных токов	21
1.7. Принцип наложения	22
1.8. Энергетические соотношения в цепях постоянного тока	24
1.9. Нелинейные цепи постоянного тока	24

Глава 2. Магнитные цепи	27
-------------------------------	----

2.1. Магнитное поле: основные понятия и величины	27
2.2. Магнитные свойства веществ	29
2.3. Характеристики магнитных материалов	30
2.4. Классификация, элементы и характеристики магнитных цепей	31
2.5. Основные законы магнитной цепи. Расчет простейших магнитных цепей	32

Глава 3. Электромагнитная индукция	36
------------------------------------------	----

3.1. Закон электромагнитной индукции	36
3.2. ЭДС индукции в контуре. Закон Ленца	36
3.3. ЭДС самоиндукции и индуктивность катушки	37
3.4. ЭДС взаимной индукции. Вихревые токи	38

Глава 4. Электрические цепи переменного тока	40
----------------------------------------------------	----

4.1. Основные понятия и характеристики	40
4.2. Представление синусоидальных функций с помощью векторов и комплексных чисел	42

4.3. Идеальные элементы цепи переменного тока. Схемы замещения реальных элементов	45
4.4. Синусоидальный ток в RL -цепи	47
4.5. Синусоидальный ток RC -цепи	49
4.6. Анализ процессов в цепи синусоидального тока при последовательном соединении элементов R, L, C	49
4.7. Комплексный метод расчета цепей синусоидального тока	51
4.8. Комплексные сопротивления и проводимости в цепях переменного тока	52
4.9. Мощность в цепях синусоидального тока	53
4.10. Баланс комплексных мощностей	54
4.11. Резонансы напряжений и токов в электрических цепях	54
4.12. Цепи с индуктивно связанными элементами	57
4.13. Трехфазные электрические цепи	59
4.14. Способы повышения коэффициента мощности симметричных трехфазных приемников	66
4.15. Техника безопасности при эксплуатации трехфазных цепей	67

РАЗДЕЛ II. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Глава 5. Электроизмерительные приборы и электрические измерения	71
5.1. Общие сведения об электротехнических устройствах	71
5.2. Виды и методы электрических измерений	71
5.3. Погрешности измерений	72
5.4. Основные характеристики электроизмерительных приборов	73
5.5. Классификация электроизмерительных приборов	74
5.6. Электромеханические измерительные приборы	76
5.7. Аналоговые электронные приборы	82
5.8. Цифровые электронные приборы	83
5.9. Измерения тока и напряжения	87
5.10. Измерение электрической мощности и энергии	90
5.11. Измерение сопротивлений, индуктивностей, емкостей	91
5.12. Измерение неэлектрических величин	93
Глава 6. Трансформаторы	97
6.1. Типы, назначение, устройство и принцип действия	97
6.2. Анализ работы ненагруженного трансформатора	100
6.3. Приведение обмоток трансформатора	100
6.4. Анализ работы нагруженного трансформатора	101
6.5. Схемы замещения трансформатора	102
6.6. Опыты холостого хода и короткого замыкания	103
6.7. Коэффициент полезного действия трансформатора	105
6.8. Внешняя характеристика трансформатора	106
6.9. Трехфазные трансформаторы	107

6.10. Параллельная работа трансформаторов	108
6.11. Автотрансформаторы	109
6.12. Измерительные трансформаторы	110
Глава 7. Электрические машины	112
7.1. Назначение и классификация	112
7.2. Конструкция электрических машин и свойство обратимости	112
7.3. Генераторы постоянного тока	113
7.4. Двигатели постоянного тока	121
7.5. Асинхронные машины	125
7.6. Синхронные машины	137
7.7. Однофазные двигатели и двигатели малой мощности	145
Глава 8. Электронные приборы и устройства	150
8.1. Общие сведения	150
8.2. Полупроводники: основные понятия, типы электропроводимости	151
8.3. Полупроводниковые диоды	152
8.4. Биполярные транзисторы	156
8.5. Полевые транзисторы	159
8.6. Тиристоры	161
8.7. Полупроводниковые приборы как элементы интегральных микросхем	164
8.8. Индикаторные приборы	166
8.9. Фотоэлектрические приборы. Понятие об оптоэлектронных приборах	170
8.10. Выпрямители	173
8.11. Стабилизаторы постоянного напряжения	177
8.12. Инверторы	178
8.13. Электронные усилители	180
8.14. Операционные усилители	185
8.15. Электронные генераторы	187
8.16. Мультивибраторы	189
8.17. Логические элементы	190
8.18. Большие интегральные микросхемы и микропроцессоры	194
Глава 9. Электрические и электронные аппараты	197
9.1. Назначение и классификация электрических аппаратов	197
9.2. Основные элементы и особенности работы электрических аппаратов	197
9.3. Коммутирующие аппараты распределительных устройств и передающих линий	200
9.4. Аппараты управления режимом работы различных электротехнических устройств	202
9.5. Реле	208
9.6. Условные обозначения на электрических схемах	211

РАЗДЕЛ III. ПРОИЗВОДСТВО, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Глава 10. Электрические станции, сети и электроснабжение	214
10.1. Электроэнергетические системы	214
10.2. Электрические станции	216
10.3. Электрические сети, распределение электрической энергии	219
10.4. Электроснабжение промышленных предприятий и населенных пунктов	223
10.5. Подстанции и распределительные устройства	226
Глава 11. Электропривод	229
11.1. Понятие об электроприводе	229
11.2. Нагрев и охлаждение электродвигателя	230
11.3. Выбор мощности двигателя электропривода	231
11.4. Схемы управления электродвигателями	233
Глава 12. Электрическое освещение и источники света	241
12.1. Электрические и световые характеристики источников света	241
12.2. Требования к освещению рабочей поверхности	241
12.3. Типы источников света	242
12.4. Некоторые особенности применения газоразрядных ламп	247
Глава 13. Перспективы развития электротехники	249
13.1. Проблемы и перспективы производства электроэнергии	249
13.2. Производство электроэнергии с использованием возобновляемых источников. Объемы такого производства, его преимущества и перспективы	250
13.3. Производство электроэнергии с использованием энергии Солнца	252
13.4. Производство электроэнергии с использованием энергии ветра	252
13.5. Расширение области потребления электроэнергии	253
13.6. Проблемы энергосбережения	256
Приложение	260
Список литературы	263

Учебное издание

**Бутырин Павел Анфимович,
Толчеев Олег Владимирович,
Шакирзянов Феликс Нигматзянович**

Электротехника

Под редакцией П. А. Бутырина

Учебник

11-е издание, стереотипное

Редактор *Ю. А. Милютин*
Технический редактор *Н. И. Горбачева*
Компьютерная верстка: *Г. Ю. Никитина*
Корректоры *И. Н. Волкова, Н. Л. Котелина*

Изд. № 711208386. Подписано в печать 20.03.2015. Формат 60×90/16.
Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 17,0.

ООО «Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1.

Тел./факс: (495) 648-0507, 616-00-29.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU. АЕ51. Н 16591 от 29.04.2014.