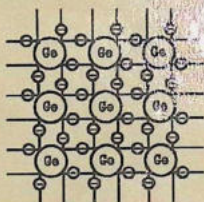
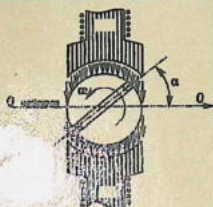
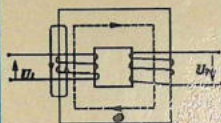
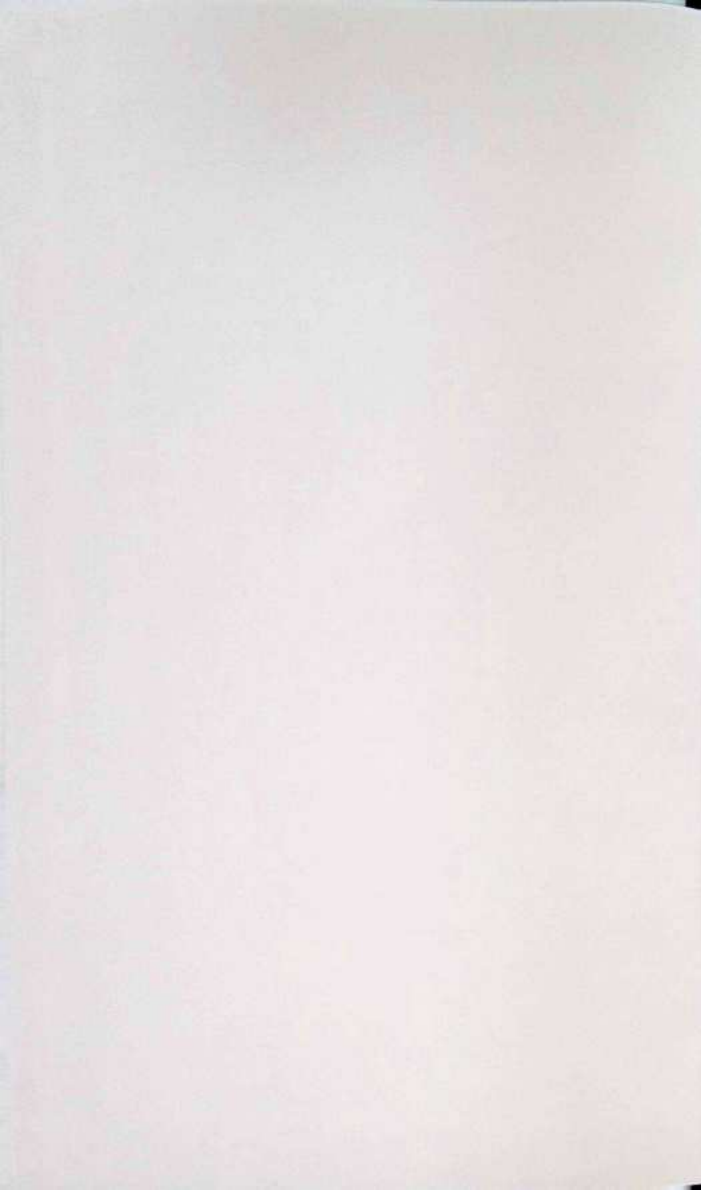


Н.А. Халилов, А.И. Ханбабаев

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА С ОСНОВАМИ ЭЛЕКТРОНИКИ



Ташкент - 2004



К+

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО
И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

Н.А. ХАЛИЛОВ, А.И. ХАНБАБАЕВ

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА С ОСНОВАМИ ЭЛЕКТРОНИКИ

Издательско-полиграфический творческий дом
имени Гафура Гуляма
Ташкент — «ЦПИУЛ» — 2004

31.2
X19

621.3
X-172

Н.А. ХАЖИМОВ, А.Н. ЗАИБАГАЛ

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
С ОСНОВАМИ ЭЛЕКТРОНИКИ

Библиотека

СамСХИ

Инд № 351740

X $\frac{2103000000 - 93}{M352(04) - 2004}$ Тв.зак. — 2004 © Издательско-полиграфический
творческий дом им. Г. Гуляма,
2004 г.
ISBN 5-635-02293-6 © «ЦПИУЛ», 2004 г.

ВВЕДЕНИЕ

Электротехника как наука занимается изучением электрических и магнитных явлений и применением их на практике.

Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях, может передаваться на разных по мощности линиях и распределяться среди различных потребителей. Электрическая энергия применяется во всех областях деятельности человека. Устройства производственного назначения в основном приводятся в движение электродвигателями. Электрические и неэлектрические параметры измеряются и контролируются при помощи электрических приборов.

В большинстве случаев современные автоматические системы основаны на электрических и электронных элементах. Кроме того, электрическая энергия легко преобразуется в другие виды энергии.

Электроника как наука занимается изучением электронных приборов и применением их на практике. Они основаны на изменении концентрации заряженных частиц в вакууме, газе и твердых кристаллических веществах.

Электронные приборы и устройства применяются во всех областях науки и техники. Это объясняется их чувствительностью, быстротой действия и универсальностью.

Электронные устройства всегда имели малые габариты, потребляли мало энергии, были просты и удобны. С появлением интегральных микросхем их габариты и потребление энергии уменьшились в тысячи раз. Современная электроника основана на интегральной технике. Это дает возможность автоматизации процессов, создавать разумные автоматизированные системы. Данный учебник рассчитан на учащихся средних школ, техникумов и может быть использован в качестве дополнительного учебного материала.

Книга написана простым языком и в ней более двухсот решенных задач. Все это дает возможность легкого усвоения основ электротехники и электроники.

ГЛАВА 1

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ДИЭЛЕКТРИКИ

Любое вещество состоит из атомов, которые состоят из ядра и вращающихся вокруг них электронов. Ядро состоит из протонов и нейтронов. Принято считать электрон отрицательно заряженным, а протон положительно. Если в атоме число протонов и электронов одинаково, то он считается электрически нейтральным. Если в атоме преобладают электроны, то он будет заряжен отрицательно и называться отрицательным ионом. Если в атоме преобладают протоны, то он будет заряжен положительно и называться положительным ионом.

Вокруг любого электрического заряда возникает электрическое поле, через которое взаимодействуют электрические заряды. Одноименно заряженные частицы отталкиваются, разноименно заряженные частицы притягиваются друг к другу. Следовательно, электрическое поле обладает энергией. При перемещении заряженных частиц совершается работа за счет энергии электрического поля.

1.1. Напряженность электрического поля. Закон Кулона

Напряженность электрического поля, являясь основным параметром заданной точки этого поля, выражается отношением силы, с которой поле действует на точечный (пробный) заряд, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда:

$$E = \frac{F}{q}, \quad (1.1)$$

где, E — напряженность электрического поля,

F — сила, Н,

q — положительный точечный заряд, Кл.

Точечным (пробным) зарядом называют заряженное тело, размеры и заряд которого настолько малы, что не

искажают исследуемое поле. В качестве пробного заряда принят положительный точечный заряд. Напряженность электрического поля является векторной величиной. Графически электрическое поле выражается линиями напряженности, которые проводят так, чтобы направление касательной в каждой ее точке совпадало с направлением вектора напряженности поля. Линии напряженности электрического поля начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных зарядах. Следовательно, они разомкнуты. Если во всех точках поля векторы напряженности одинаковы, то такое поле называют однородным.

Сила взаимодействия двух точечных зарядов определяется законом Кулона:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi \cdot r^2 \cdot \epsilon_a} H, \quad (1.2)$$

где, r — расстояние между зарядами q_1 и q_2 , м; F — сила, Н; ϵ_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость, она показывает зависимость силы F от окружающей среды. $\epsilon_a = \epsilon_0 \cdot \epsilon$, где, ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость, она показывает во сколько раз сила взаимодействия зарядов уменьшается в данной среде по сравнению с вакуумом.

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, называемая **электрической постоянной**.
Напряженность в заданной точке поля равна:

$$E = \frac{q}{4\pi \cdot r^2 \cdot \epsilon_a}. \quad (1.3)$$

1.2. Потенциал и напряжение

Энергия электрического поля определяется величинами зарядов, создающих его. Поля сравниваются между собой их воздействием на пробный заряд. При создании электрического поля отрицательным зарядом для введения в это поле другого отрицательного заряда надо преодолеть силу отталки-

вания этого поля. В результате энергия электрического поля увеличивается. При введении в это поле положительного заряда его энергия уменьшается, т.к. расходуется на увеличение скорости вводимого заряда. В обоих случаях поле совершает работу. На рис. 1.1. положительный точечный заряд q расположен в точке M_1

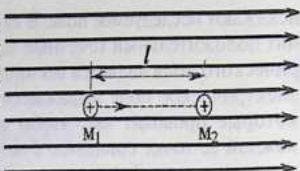


Рис. 1.1. Движение электрического заряда в однородном электрическом поле.

электрического поля. Если под воздействием сил электрического поля заряд q переместили за пределы поля, то совершенная полем работа будет равна потенциальной энергии этой точки поля. Отношение работы, которая должна быть совершена силами поля для удаления положительного пробного заряда q к величине этого заряда, называется потенциалом электрического поля в данной точке.

$$\varphi_{M_1} = \frac{W_{M_1}}{q}, \quad (1.4)$$

где, q — величина заряда,

W_{M_1} — потенциальная энергия поля в точке M_1 ,

φ_{M_1} — потенциал поля в точке M_1 .

Размерность потенциала.

$$\varphi = \frac{W}{q} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ К}} = 1 \text{ В}$$

Если заряд q под воздействием сил электрического поля переместился из точек M_1 в точку M_2 , то совершенная работа будет равна изменению потенциальной энергии

$$A_{12} = W_{M_1} - W_{M_2} = q \cdot \varphi_{M_1} - q \cdot \varphi_{M_2} = q(\varphi_{M_1} - \varphi_{M_2}). \quad (1.5)$$

Разность потенциалов точек M_1 и M_2 называется напряжением и обозначается U_{12} . Таким образом, $A_{12} = q \cdot U_{12}$. В общем виде $A = q \cdot U$

Следовательно, работа по перемещению заряда между двумя точками поля прямо пропорциональна напряжению меж-

ду этими точками. Размерность напряжения — вольт. Однако в технике применяются и другие единицы: милливольт ($1 \text{ мВ} = 10^{-3} \text{ В}$), микровольт ($1 \text{ мкВ} = 10^{-6} \text{ В}$), киловольт ($1 \text{ кВ} = 10^3 \text{ В}$).

Если, например, потенциал точки M_2 будет равен 0, то $U_{12} = U_{M1} - U_{M2} = U_{M1}$. В различных точках поля значения и знаки потенциалов могут быть различными. Для сравнения потенциалов разных точек поля введено понятие точки с потенциалом, равным 0. Обычно потенциал земли принято считать равным 0.

При перемещении заряда q из точки M_1 в точку M_2 совершается работа

$$A = F \cdot l \quad (1.7)$$

где F — сила поля, N

l — расстояние, M

Пользуясь формулами 1.1, 1.6, найдем другое выражение напряженности

$$A = E \cdot q \cdot l = q \cdot U,$$

отсюда

$$E = \frac{q \cdot U}{q \cdot l} = \frac{U}{l} \quad \frac{B}{M}.$$

1.3. Электропроводность и электрический ток

В электрическом поле положительные заряды перемещаются из точек с высоким потенциалом в точки с низким потенциалом. Отрицательные заряды, наоборот, перемещаются из точек с низким потенциалом в точки с высоким потенциалом. Направленное движение электрических зарядов в электрическом поле называется электрическим током. Способность вещества под действием электрического поля создавать электрический ток называется электропроводностью. По степени электропроводности вещества делятся на три вида: проводники, полупроводники и диэлектрики. Проводники обладают высокой электропроводностью и делятся на 2 рода. Все металлы и их сплавы относятся к проводникам 1 рода и в них электрический ток создается и за счет движения свободных электронов. Кислоты и щелочи относятся к проводникам 2 рода и в них

электрический ток создаётся за счет движения ионов. Диэлектрики обладают низкой электропроводностью и они применяются в качестве электроизоляционных материалов. К ним относятся: минеральные масла, лаки, слюда, бумага, резина, стекло и т. д.

Полупроводники в обычных условиях обладают низкой электропроводностью. Однако, под воздействием температуры, электрического и магнитного полей, света резко повышают свою электропроводность.

При отсутствии электрического поля в металлических проводниках свободные электроны двигаются беспорядочно. Поэтому электрический ток будет равен нулю. При наличии внешнего электрического поля свободные электроны приобретают направленное движение и поэтому создается электрический ток. Следовательно, для непрерывного протекания тока между концами проводника постоянно должна быть разность потенциалов.

Скорость самих электронов мала. Однако скорость передачи энергии электронами друг другу высока (300000 км/с). Электроны двигаются от точек с низким потенциалом к точкам с высоким потенциалом. Следовательно, электрический ток движется от «-» к «+». В начале, когда электрический ток не был хорошо изучен, предполагали, что он движется от «+» к «-». Впоследствии эту условность решили сохранить.

Размерность тока — ампер. Величина тока определяется количеством электрических зарядов, проходящих через поперечное сечение проводника за 1 с. Величина тока равна 1 А если через поперечное сечение проводника за 1 с проходит электрический заряд, равный 1 к, т.е.

$$I = \frac{Q}{t} \left(\frac{Кл}{с} \right) = А.$$

1 А = 10^3 миллиампер (мА) = 10^6 микроампер (мкА).

В проводниках второго рода электрический ток обеспечивается движением ионов. Так, например, под действием растворителя (воды) молекулы серной кислоты (H_2SO_4) распадаются на положительный $2H^+$ и отрицательный, SO_4^- ионы. Под действием электрического поля положительные ионы двигаются к катоду, отрицательные ионы — к аноду. (рис. 1.2). Отрицательные ионы отдают аноду свободные электроны,

которые во внешней цепи создают электрический ток. Положительные ионы электролита соединяются с электронами внешней цепи. Таким образом, в электролите ток создаётся движением ионов, а во внешней цепи — движением свободных электронов.

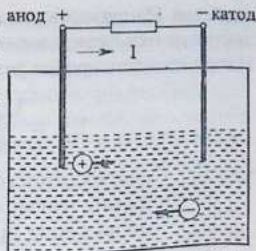


Рис. 1.2. Ток в электролите.

1.4. Диэлектрик в электрическом поле

У одной группы диэлектриков, называемых неполярными, под действием внешнего электрического поля происходит смещение центров положительных и отрицательных зарядов атомов (рис. 1.3, б). Такие атомы могут рассматриваться как пара разноименных точечных зарядов $+q$ и $-q$, называемых электрическим диполем (рис. 1.3) Смещение орбит атомов называется **поляризацией диэлектрика**. Во внешнем электрическом поле электроны всех атомов смещаются одновременно. В результате создается электрический ток, называемый **током смещения**. Электрическое поле поляризованных атомов направлено против внешнего поля и ослабляет его.

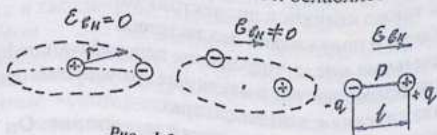


Рис. 1.3. Атом диэлектрика:

а) неполяризованный атом; б) поляризованный атом; в) диполь.

Способность поляризации диэлектриков во внешнем поле называется **диэлектрической проницаемостью**. Она показывает во сколько раз уменьшается внешнее поле под действием поляризации. При превышении напряжения внешнего поля критического значения наступает пробой диэлектрика, т.е. местное его разрушение с образованием канала высокой проводимости. При этом диэлектрик теряет свои изоляционные

свойства. Напряженность, при котором происходит пробой диэлектрика называется электрической прочностью диэлектрика. Напряженность пробоя диэлектрика равна.

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{d} \left(\frac{\text{кВ}}{\text{м}} \right) \quad (1.9)$$

где, $E_{\text{пр}}$ — напряженность пробоя,
 d — толщина изоляционного материала,
 $U_{\text{пр}}$ — напряжение пробоя.

Для надежной работы электрических установок необходимо, чтобы допустимое напряжение было в несколько раз меньше напряжения пробоя. Сопротивление диэлектрика с поперечным сечением 1 м^2 и длиной $l \text{ м}$ называется удельным объемным сопротивлением:

$$\rho_v = \frac{R \cdot S}{l} \left(\frac{\text{ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} \right) = \text{ом} \cdot \text{м}. \quad (1.10)$$

1.5. Электроизоляционные материалы

1. Газообразные диэлектрики. Воздух служит природным диэлектриком в линиях электропередачи, некоторых устройствах, между открытыми проводами. Водород, азот, инертные газы также являются диэлектриками.

2. Жидкие и полужидкие диэлектрики.

Минеральные масла — продукты переработки нефти. Они в основном применяются в масляных трансформаторах, выключателях, кабелях и конденсаторах.

Совол — синтетический жидкий диэлектрик. Он применяется для пропитки и заполнения конденсаторов, так как его диэлектрическая проницаемость в 2 раза больше, чем у минерального масла.

Совтол также как и совол негорюч и, залитые им трансформаторы, безопасны в пожарном отношении.

Смолы при низких температурах — это аморфные стеклообразные массы, а при нагреве они размягчаются и становятся пластичными, а затем жидкими. Они не гидроско-

пичны и не растворяются в воде, но растворяются в спирте и других растворителях. Смолы являются важной составной частью многих лаков, компаундов, пластмасс, красок.

Лаки — растворы пленкообразующих веществ. Они применяются в электрических машинах и аппаратах для пропитки их обмоток с целью повышения их влагостойкости. Эмалевые лаки предназначены для создания тонких и гибких изоляционных покрытий на обмоточных проводах.

Электроизоляционным составом (компаундами) заливаются узлы электрических приборов, а также пропитываются их обмотки.

3. Твердые диэлектрики

Бумага применяется для изготовления кабелей, конденсаторов.

Электрокартон широко используют для прокладок в пазах электрических машин, каркасов обмоток и различных изделий.

Резина обладает высокими электроизоляционными свойствами, она эластична и поэтому широко применяется в электротехнике.

Слюда — на её основе изготавливаются такие электроизоляционные материалы, как миканит, микалекс, микафолли, слюдинит, которые широко применяются в качестве изоляционных прокладок в электрических машинах и аппаратах.

Электрофарфор широко применяется для изготовления изоляторов.

Пластмассы в электротехнике применяются в качестве твёрдых и гибких конструктивных материалов.

Асбест — это волокнистый минеральный материал, выдерживающий тепло до $300-400^{\circ}\text{C}$. Из него изготавливаются пряжа, материя, шнуры, картон. В таблице 1.1. приведены данные некоторых электроизоляционных материалов, где $E_{пр}$ — напряженность пробоя, ε — диэлектрическая проницаемость, ρ_v — удельное объемное сопротивление.

1.6. Электрическая емкость. Конденсаторы

Способность вещества накапливать электрический заряд называется электрической емкостью. Система из двух проводников, разделенных диэлектриком, называется конденсатором. Проводники конденсатора

Параметры некоторых электроизоляционных материалов

Диэлектрик	$E_{\text{пр}}$	ϵ	ρ
	10^3 кВ/м	-	$\text{Ом}\cdot\text{м}$
Бумага, пропитанная маслом	10+25	3,6	-
Трансформаторное масло	15+20	2,1+2,4	$10^{12}+10^{13}$
Воздух	3	1	-
Гетинакс	10+15	4+7	10^8+10^{10}
Миканит	15+40	5+6	10^9+10^{11}
Резина	15+20	3+6	$10^{11}+10^{12}$
Стекло	10+15	6+10	10^{12}
Фарфор	15+20	5,5	$10^{12}+10^{13}$
Текстолит	6+16	5+8	10^7+10^{10}
Совол	14+16	5,0+5,2	$10^{12}+10^{13}$
Совтол	13+18	4,5+4,8	$10^{11}+10^{12}$
Полистирол	25+40	2,4+2,6	$10^{13}+10^{15}$
Полиэтилен	35+60	2,2+2,4	$10^{13}+10^{15}$
Фторопласт	15+20	2,8+3,0	$10^{14}+10^{16}$
Электроизоляционный картон	8+12	3+5	10^6+10^8

зываются его обкладками или электродами. На обкладках конденсатора накапливаются равные по количеству, но разноименные заряды. Заряд конденсатора пропорционален напряжению между его обкладками. Емкостью конденсатора называется коэффициент пропорциональности между зарядом Q и напряжением между обкладками U :

$$C = \frac{Q}{U}, \quad (1.11)$$

где Q — заряд на одной из обкладок конденсатора,
 U — напряжение между обкладками.

Единицей измерения электрической ёмкости является **фарада**

$$1\text{ф} = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}} = 1 \frac{\text{К}}{\text{В}}.$$

Фарада очень крупная единица. Поэтому на практике пользуются микрофарадой (мкФ) или пикофарадой (пФ).

1 мкФ = 10^{-6} Ф; 1 пФ = 10^{-12} Ф.

Если известны площадь обкладки, расстояние между ними и тип диэлектрика, то емкость конденсатора можно определить по формуле

$$C = \epsilon_s \cdot \frac{S}{d},$$

где ϵ_s — абсолютная диэлектрическая проницаемость,

S — площадь обкладки конденсатора, м²,

d — расстояние между обкладками, м.

1.7. Типы конденсаторов

Тип конденсатора связан с его диэлектриком. Например, в бумажных конденсаторах две длинные ленточные фольги разделены парафинированной бумагой. Конденсаторы бывают бумажные, слюдяные, стеклянные, керамические, электролитические. У электролитических конденсаторов диэлектриком служит тончайший слой окиси на поверхности алюминиевой или танталовой фольги, которая служит одним электродом. Второй обкладкой служит бумага или ткань, пропитанная густым раствором электролита. Электролитические конденсаторы могут применяться только в цепях постоянного тока.

1.8. Соединения конденсаторов

Для получения конденсаторов необходимой ёмкости на нужное напряжение применяют параллельное, последовательное или смешанное соединения конденсаторов.

Последовательное соединение конденсаторов (рис. 1.4)

При этом на обкладках всех конденсаторов будут одинаковые по величине электрические заряды. Это объясняется тем, что заряды от источника питания поступают только на внешние обкладки соединения. Напряжения конденсаторов равны

$$U_1 = \frac{Q}{C_1}; U_2 = \frac{Q}{C_2}; U_3 = \frac{Q}{C_3}. \quad (1.12)$$

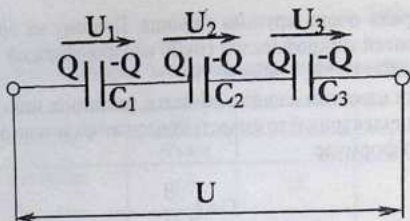


Рис. 1.4. Последовательное соединение конденсаторов.

Напряжение, приложенное к цепи равно:

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (1.13)$$

Если напряжение выразим через отношения зарядов к ёмкостям, то получим:

$$\frac{Q}{C_{\text{об}}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} \quad (1.14)$$

или при сокращении на Q :

$$\frac{1}{C_{\text{об}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{C_2 \cdot C_3 + C_1 \cdot C_3 + C_1 \cdot C_2}{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3} \quad (1.15)$$

Следовательно, при последовательном соединении конденсаторов обратная величина их общей ёмкости равна сумме обратных величин ёмкостей всех конденсаторов.

Из выражения 1.15 находим общую ёмкость для трёх последовательно соединённых конденсаторов

$$C_{\text{об}} = \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3}{C_2 \cdot C_3 + C_1 \cdot C_3 + C_1 \cdot C_2}.$$

При последовательном соединении n одинаковых конденсаторов общая ёмкость равна:

$$C_{\text{об}} = \frac{C}{n}. \quad (1.16)$$

Необходимо подчеркнуть то, что при последовательном соединении конденсаторов их общая ёмкость меньше меньшей.

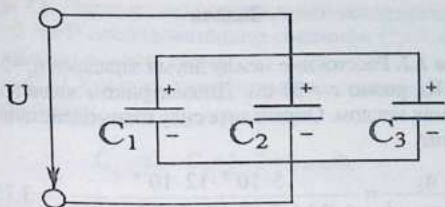


Рис. 1.5. Параллельное соединение конденсаторов.

Параллельное соединение конденсаторов — при этом напряжения на них будут одинаковы, а заряды разные (рис. 1.5):

$$Q_1 = C_1 \cdot U; \quad Q_2 = C_2 \cdot U; \quad Q_3 = C_3 \cdot U. \quad (1.17)$$

Общий заряд конденсаторов будет равен сумме зарядов всех конденсаторов:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3; \quad (1.18)$$

$$CU = C_1 \cdot U + C_2 \cdot U + C_3 \cdot U. \quad (1.19)$$

При сокращении на U получим:

$$C = C_1 + C_2 + C_3. \quad (1.20)$$

Таким образом, при параллельном соединении общая ёмкость схемы равна сумме ёмкостей всех конденсаторов.

Смешанное соединение конденсаторов — для определения общей ёмкости таких схем пользуются правилами последовательного и параллельного соединения.

1.9. Энергия электрического поля

С увеличением напряжения конденсатора растет его электрическая энергия

$$dW_э = dA = Q \cdot dU_э, \quad (1.21)$$

где $dW_э$ — приращение электрической энергии,

dU — приращение напряжения.

$$W_э = \int_0^U U_э C \cdot dU_э = \frac{CU^2_э}{2} = \frac{Q \cdot U_э}{2} \text{ Дж.}$$

Следовательно, на конденсаторе накапливается только половина энергии, полученной от источника.

Задачи

Задача 1.1. Расстояние между двумя зарядами $q_1 = 5 \cdot 10^{-8}$ Кл и $q_2 = 12 \cdot 10^{-8}$ Кл равно $r = 20$ см. Диэлектриком является бумага, пропитанная маслом. Определите силу взаимодействия зарядов.

Решение

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot r^2} = \frac{5 \cdot 10^{-8} \cdot 12 \cdot 10^{-8}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,6 \cdot 4 \cdot 10^{-2}} = 3,75 \cdot 10^{-4} \text{ Н},$$

так как $\epsilon = 3,6$.

Задача 1.2. Электрическое поле действует на заряд $q = 1,8 \cdot 10^{-3}$ Кл с силой $F = 5,4 \cdot 10^{-4}$ Н. Определите напряженность электрического поля.

Решение

$$E = \frac{F}{q} = \frac{5,4 \cdot 10^{-4}}{1,8 \cdot 10^{-3}} = 0,3 \cdot \text{В/М}.$$

Задача 1.3. Пробойное напряжение резины толщиной 5 мм равно $U_{\text{пр}} = 8,5$ кВ. Определите электрическую прочность этого диэлектрика.

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{d} = \frac{8,5}{5 \cdot 10^{-3}} = 17 \cdot 10^2 \text{ кВ/м}.$$

Задача 1.4. Емкость конденсатора $C = 1,5$ мкФ, заряд $Q = 45 \cdot 10^{-5}$ Кл. Определите напряжение между обкладками конденсатора.

Решение:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{4,5 \cdot 10^{-5}}{1,5 \cdot 10^{-6}} = 30 \text{ В}.$$

Задача 1.5. Емкость конденсатора $C = 0,35$ мкФ, напряжение между обкладками $U = 400$ В. Определите энергию электрического поля конденсатора.

Решение

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{0,35 \cdot 10^{-6} \cdot (400)^2}{2} = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}.$$

Задача 1.6. Параллельно соединенным конденсаторам $C_1=1$ мкФ, $C_2=2$ мкФ последовательно соединён $C_3=1$ мкФ. Определите общую емкость схемы.

Решение: 1) Емкость параллельных соединенных конденсаторов равна:

$$C_{1,2}=C_1+C_2=1+2=3 \text{ мкФ.}$$

2. Общая емкость определяется следующим образом:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{1,2}} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{3} + \frac{1}{1} = \frac{4}{3} \frac{1}{\text{мкФ}} \text{ или } C = \frac{3}{4} = 0,75 \text{ мкФ.}$$

Библиотека

СамСХИ 351740

ИДР №

ГЛАВА 2

МАГНЕТИЗМ И ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

2.1. Магнитное поле

Магнитное поле является одним из видов материи. Магнитное поле создается вокруг постоянного магнита и проводника с током, а также при изменении электрического поля. Наличие магнитного поля можно определить по воздействию на проводник с током, постоянный магнит, электромагнит. Например, в магнитном поле проводника с током магнитная стрелка располагается перпендикулярно оси проводника. Направление магнитного поля проводника совпадает с направлением север-

ного полюса стрелки компаса. Графически магнитное поле изображается линиями магнитной индукции. Направление магнитного поля совпадает с направлением касательной к линиям магнитной индукции в каждой точке поля. Линии магнитной индукции всегда замкнуты. Например, линии магнитной индукции проводника с током представляют собой концентрические окружности, расположенные на плоскости, перпендикулярной оси

проводника. Направление этих линий магнитной индукции определяется по правилу буравчика: если направление движения буравчика совпадает с направлением тока проводника, то направление вращения ручки буравчика покажет направление магнитных линий (рис. 2.1). На-

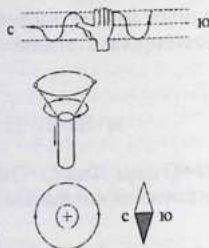


Рис. 2.1. Определение направления магнитного поля при помощи правил правой руки и буравчика.

правление магнитного поля катушки можно определить по правилу правой руки: если катушку правой рукой охватить так, чтобы направления четырех пальцев совпали с направлением тока, то вытянутый большой палец покажет северный полюс магнитного поля (рис. 2.1).

2.2. Параметры магнитного поля

1. Магнитодвижущая сила (или намагничивающая сила)— это способность электрического тока создавать магнитное поле. Магнитодвижущая сила (МДС) одного проводника с током равна величине этого тока:

$$F = I \text{ (A)}, \quad (2.1)$$

где F —магнитодвижущая сила (МДС).

МДС катушки равна:

$$F = I \cdot w \text{ (A)}, \quad (2.2)$$

где w — число витков катушки.

2. Напряженность магнитного поля — это отношение намагничивающей силы к средней длине магнитных силовых линий:

$$H = \frac{F}{l} = \frac{A}{M} \quad (2.3)$$

где H — напряженность магнитного поля; l — средняя длина магнитных силовых линий.

Иногда применяется другая размерность—ЭРСТЕД

$$1 \text{ Э} = 79,6 \frac{A}{M} = 0,8 \frac{A}{CM}. \quad (2.4)$$

Напряженность магнитного поля не зависит от среды.

3. Магнитная индукция определяет интенсивность магнитного поля. Магнитная индукция—это векторная величина, её направление определяется направлением касательной к магнитным линиям в каждой точке поля. Магнитная индукция зависит от величины тока, формы проводника, магнитных свойств среды и расстояния от проводника до точки, где определяется магнитная индукция. Магнитная индукция и напряженность связаны простым соотношением:

$$B = \mu_0 \cdot H. \quad (2.5)$$

где μ_a — абсолютная магнитная проницаемость, она характеризует среду магнитного поля.

В различных средах магнитная индукция будет различной. В парамагнитной среде магнитная индукция по отношению к вакууму будет сильнее, а в диамагнитной — слабее. Абсолютная магнитная проницаемость вакуума называется магнитной постоянной и она равна:

$$\mu_a = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{М}} = \left(\frac{\text{Ом} \cdot \text{с}}{\text{М}} \right). \quad (2.6)$$

$\text{Ом} \cdot \text{с} = \text{Гн}$ (генри) — размерность индуктивности.

Отношение абсолютной магнитной проницаемости какого-либо вещества к магнитной постоянной называется относительной магнитной проницаемостью

$$\mu = \mu_a / \mu_0. \quad (2.7)$$

В диамагнитных материалах (медь, серебро, свинец и т. д.) $\mu < 1$, в парамагнитных материалах (алюминий, платина и т. д.) $\mu > 1$. У ферромагнитных материалов $\mu \gg 1$ (несколько тысяч и более). По этой причине ферромагнитные материалы широко применяются в электротехнике, так как позволяют получать сильные магнитные поля. Размерность магнитной индукции:

$$B = \mu_a \cdot H \frac{\text{Ом} \cdot \text{с}}{\text{М}} \cdot \frac{\text{А}}{\text{М}} = \frac{B \cdot \text{с}}{\text{М}^2} = \frac{B\phi}{\text{М}^2} = \text{Тесла (Т)}. \quad (2.8)$$

На практике иногда пользуются другой единицей — гауссом.

$$1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Т}.$$

4. Магнитное напряжение. По аналогии с электрическим напряжением при расчете магнитных полей пользуются понятием магнитного напряжения. Магнитное напряжение между двумя точками однородного поля по одной магнитной линии выражается произведением напряженности поля и расстояния между точками:

$$U_m = H \cdot \ell = \frac{A}{M} \cdot M = A.$$

5. Магнитный поток — произведение магнитной индукции B и величины площади, перпендикулярной вектору этой индукции:

$$\Phi = B \cdot S = \frac{B\delta}{M^2} \cdot M^2 = \text{Вебер (Вб)}.$$

На практике пользуются также более мелкой единицей, называемой максвеллом

$$1 \text{ Вб} = 10^8 \text{ максвелл (мкс)}.$$

2.3. Закон полного тока

Магнитное поле проводника с током изображается в виде concentрических окружностей, плоскость которых перпендикулярна проводнику. Напряженность на расстоянии a от проводника (рис. 2.2):

$$H = \frac{l}{l} = \frac{I}{2\pi \cdot a} = \frac{F}{2\pi \cdot a} \quad (2.14)$$

или

$$I = H \cdot l = H \cdot 2\pi \cdot a = F. \quad (2.15)$$

где F — намагничивающая сила; l — длина магнитных линий, м.

Если через поверхность, ограниченную замкнутым контуром, проходят несколько проводников с током, то намагничивающая сила:

$$F = \Sigma I. \quad (2.16)$$

где ΣI — полный ток — это алгебраическая сумма токов, пронизывающих поверхность, ограниченную замкнутым контуром

Формула 2.16 выражает закон полного тока: Намагничивающая сила вдоль контура равна полному току, проходящему сквозь поверхность, ограниченную этим контуром. Если напряженность магнитного поля на разных участках магнитных линий различна, то намагничивающая сила:

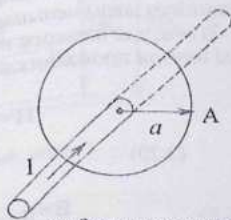


Рис. 2.2. Закон полного тока.

$$F = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + \dots + H_n \cdot l_n = \Sigma H_n \cdot l_n. \quad (2.17)$$

Закон полного тока применяется при расчетах магнитных цепей.

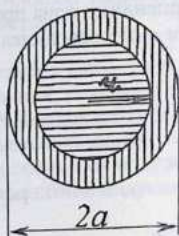
2.4. Магнитное поле прямолинейного проводника с током

При этом рассмотрим два случая (рис 2.3).

1) $r > a$ где a — радиус проводника, r — расстояние, на котором определяются напряженность магнитного поля и величина магнитной индукции. По закону полного тока

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot r} \quad (2.18)$$

$$B = \mu_a \cdot H = \mu_a \cdot \frac{I}{2\pi r} \quad (2.19)$$



Следовательно с увеличением r магнитная индукция и напряженность магнитного поля уменьшаются.

Рис. 2.3. Магнитное поле внутри проводника с током.

2) $r < a$, т.е. находим напряженность и магнитную индукцию внутри проводника

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot a^2} \cdot r; \quad (2.20)$$

$$B = \mu_a \cdot \frac{I}{2\pi \cdot a^2} \cdot r. \quad (2.21)$$

Следовательно, внутри проводника магнитная индукция и напряженность магнитного поля возрастают с увеличением r .

На поверхности проводника ($r=a$) напряженности магнитной индукции поля имеют наибольшее значения:

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot a^2} \cdot a = \frac{I}{2\pi \cdot a} \quad (2.22)$$

$$B = \mu_a \frac{I}{2\pi a}. \quad (2.23)$$

График напряженности магнитного поля внутри и вне проводника (рис. 2.4).

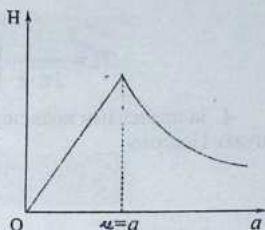


Рис. 2.4. График изменения напряженности магнитного поля проводника с током.

2.5. Магнитное поле коаксиального кабеля

Коаксиальный кабель состоит из двух изолированных проводов, имеющих общую ось (рис. 2.5). Внутренний провод — цилиндрический, наружный — трубчатый. Рассмотрим четыре случая:

1) $r > r_1$. Согласно формуле 2.20 напряженность внутри цилиндрического провода равна:

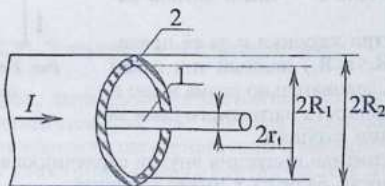


Рис. 2.5. Коаксиальный кабель.

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot r_1^2} \cdot r \quad (2.24)$$

2) между трубчатым и цилиндрическим проводами $r_1 < r < R_1$

$$H = \frac{I}{2\pi r}. \quad (2.25)$$

3). Внутри трубчатого провода напряженность равна

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot r} \cdot \left(1 - \frac{r^2 - R_1^2}{R_1^2 - R_2^2} \right) \quad (2.26)$$

4. За пределами коаксиального кабеля полный ток равен нулю. Поэтому

$$H=0.$$

2.6. Магнитное поле катушки с кольцевым сердечником (рис 2.6)

В соответствии с законом полного тока напряженность магнитного поля на расстоянии r от оси катушки равна:

$$H = \frac{F}{l} = \frac{I \cdot \omega}{l} = \frac{I \cdot \omega}{2\pi \cdot r},$$

где $l=2\pi \cdot r$ — средняя длина магнитных линий; ω — число витков катушки.

Внутри катушки и за её пределами ($R_2 < r < R_1$) полный ток равен нулю. Следовательно равна нулю и напряженность магнитного поля за пределами катушки.

Магнитная индукция внутри сердечника в любой точке окружности радиуса r имеет величину:

$$B = \mu_a \cdot H = \mu_a \cdot \frac{I \cdot \omega}{l} = \mu_a \cdot \frac{I \cdot \omega}{2\pi \cdot r}. \quad (2.28)$$

Магнитная индукция и напряженность при $r=R_1$ будет наибольшей, а при $r=R_2$ наименьшей.

2.7. Магнитное поле цилиндрической катушки (рис. 2.7)

Цилиндрическую катушку можно рассматривать как кольцевую с достаточно большим радиусом, у которой обмотка расположена только на части сердечка длиной l .

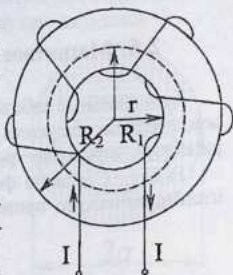


Рис. 2.6. Кольцевая катушка.

$$F_e = q \cdot B \cdot V \cdot \sin \alpha, \quad (2.30)$$

где q – заряд электрона, Кл;

V – скорость электрона, м/сек;

B – магнитная индукция заданного поля;

α – угол между направлениями движения тока и вектора магнитной индукции.

Необходимо отметить, что ток, возникающий в результате движения электрона, направлен против направления его движения. Сила Лоренца действует не только на электрон, но и на любую заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле. Направления силы Лоренца определяется по правилу левой руки.

2.9. Проводник с током в магнитном поле

Ток в проводнике создается движением электронов. На каждый электрон магнитное поле действует с определенной силой (рис 2.9). Следовательно, на проводник магнитное поле действует с определенной силой:

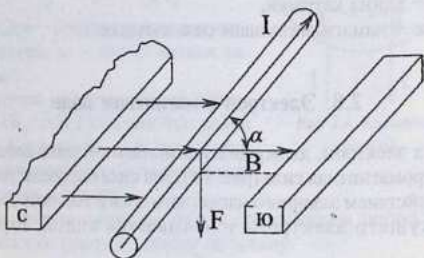


Рис. 2.9. Проводник с током в магнитном поле.

$$F = F_e \cdot n \cdot l \cdot S, \quad (2.31)$$

где F_e – сила, действующая на один электрон, Н,

n – число электронов в единице объема,

l – активная длина проводника (часть проводника, находящаяся в магнитном поле), м,

S – сечение проводника, м².

Подставив значение F_e из формулы 2.30 в эту формулу, получим

$$F = q \cdot n \cdot V \cdot S \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha, \quad (2.32)$$

где $q \cdot n \cdot V = \delta$ — плотность тока; $\delta \cdot S = I$ — сила тока в проводнике.

Таким образом

$$F = I \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha, \quad (2.33)$$

где α — угол между направлением тока и вектора магнитной индукции,

B — величина магнитной индукции.

Эта формула выражает закон Ампера: на проводник с током магнитное поле действует с силой, пропорциональной току проводника, его активной длине и величине магнитной индукции поля. Направление электромагнитной силы определяется по правилу левой руки: расположим ладонь левой руки так, чтобы вектор магнитной индукции входил в нее, четыре вытянутых пальца совпали с направлением тока, тогда отогнутый под прямым углом большой палец укажет на направление электромагнитной силы (рис. 2.10).

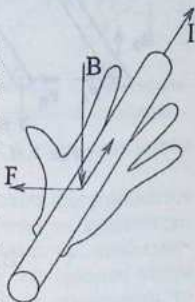


Рис. 2.10. Правило левой руки.

Если проводник с током в однородном магнитном поле под действием электромагнитных сил перпендикулярно магнитным линиям переместится на расстояние v , то при этом будет совершена следующая работа:

$$A = F \cdot v = I \cdot B \cdot l \cdot v = I \cdot B \cdot S = I \cdot \Phi, \quad (2.34)$$

где $S = l \cdot v$ — площадь поверхности, описанная проводником при его перемещении перпендикулярно к магнитным линиям. $\Phi = B \cdot S$ — магнитный поток, пронизывающий эту площадь. Закон Ампера применяется в электродвигателях, различных электромагнитных механизмах.

2.10. Взаимодействие параллельных проводников с токами

Вокруг любого проводника с током создается магнитное поле. На приведенной в рис. 2.11 второй проводник действует магнитное поле первого проводника, на первый проводник действует магнитное поле второго проводника. Величины магнитных индукций на расстоянии a от проводников равны:

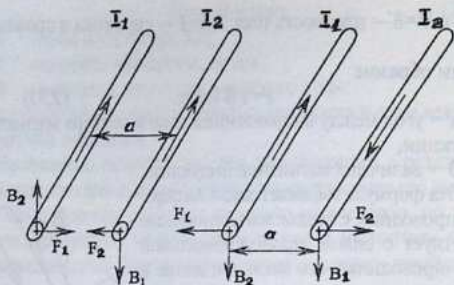


Рис. 2.11. Взаимодействие двух параллельных проводов с токами.

$$B_1 = \mu_a \cdot H_1 = \mu_a \frac{I_1}{2\pi \cdot a};$$

$$B_2 = \mu_a \cdot H_2 = \mu_a \frac{I_2}{2\pi \cdot a}.$$
(2.35)

Силы, действующие на проводники, равны:

$$F_1 = I_1 \cdot B_2 \cdot \ell = \mu_a \frac{I_1 \cdot I_2}{2\pi \cdot a} \cdot \ell;$$
(2.36)

$$F_2 = I_2 \cdot B_1 \cdot \ell = \mu_a \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{2\pi \cdot a} \cdot \ell.$$
(2.37)

Следовательно, эти силы равны друг другу, $F_1 = F_2$.

Если токи проводников направлены одинаково, то под действием этих сил провода притягиваются друг к другу. Если эти токи направлены противоположно друг другу, то провода отталкиваются друг от друга.

2.11. Явление электромагнитной индукции

На электроны движущегося проводника магнитное поле действует с определенной силой, под действием которой электроны перемещаются на один конец проводника и создают там

отрицательный заряд. На другом конце проводника из-за недостатка электронов возникает положительный заряд. Таким образом, между концами проводника возникает э.д.с. (электродвижущая сила) электромагнитной индукции (рис. 2.12):

$$E = B \cdot l \cdot V \cdot \sin \alpha, \quad (2.38)$$

где V — скорость перемещения проводника; α — угол между вектором скорости и вектором магнитной индукции; l — активная длина проводника.

При этом безразлично, движется проводник или изменяется магнитное поле. Направление э.д.с. определяется по правилу правой руки: если ладонь правой руки расположить так, чтобы магнитные линии входили в неё, отогнутый под прямым углом большой палец показал направление движения проводника, то вытянутые четыре пальца покажут направление э.д.с. Если проводник перпендикулярно магнитным линиям переместился на расстояние $\Delta \vartheta$ со скоростью V , то можно написать:

$$E = B \cdot l \cdot V \cdot \sin \alpha = B \cdot l \cdot \frac{\Delta \vartheta}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (2.39)$$

где $\sin 90^\circ = 1$; $V = \frac{\Delta \vartheta}{\Delta t}$; $l \cdot \Delta \vartheta = \Delta S$ — площадь, описанная проводником длиной l при его движении перпендикулярно магнитным линиям. Таким образом, э.д.с. индуцированная в проводнике, равна скорости изменения магнитного потока.

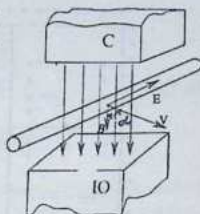


Рис. 2.12. Закон электромагнитной индукции.

2.12. Э.д.с., наводимая в контуре

Рассмотрим движение замкнутого контура в неоднородном магнитном поле (рис. 2.13). При движении контура перпендикулярно магнитному полю на его сторонах 1 и 2 создаются э.д.с.

$$e_1 = \frac{\Delta \Phi_1}{\Delta t}; \quad e_2 = \frac{\Delta \Phi_2}{\Delta t}, \quad (2.40)$$

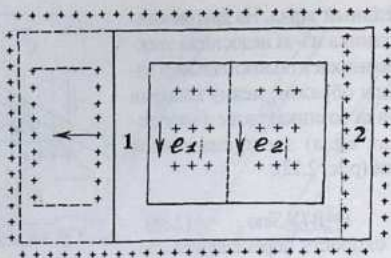


Рис. 2.13. Контур с током в магнитном поле.

где $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$ — магнитные потоки, пересекаемые сторонами 1 и 2 контура за время Δt . Сторону 1 пересекает магнитный поток $\Delta\Phi_1$, входящий в контур, сторону 2 пересекает магнитный поток $\Delta\Phi_2$ выходящий из контура. В соответствии с правилом буравчика направление э.д.с. e_2 будет положительным, а e_1 — отрицательным. Следовательно, э.д.с., наведенная в контуре, равна:

$$e = e_2 - e_1 = \frac{\Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1}{\Delta t} = -\frac{\Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_2}{\Delta t} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (2.41)$$

Эта выражение определяет среднее значение э.д.с. за время Δt .

За бесконечно малый промежуток времени dt магнитный поток изменяется на $d\Phi$. Поэтому выражение 2.41 можно написать:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.42)$$

Значит, индуцированная в контуре эдс равна скорости уменьшения магнитного потока, пронизывающего контур.

Если контур состоит не из одного витка, а из w витков, то э.д.с. равна

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.43)$$

Произведение магнитного потока на число витков называется потокосцеплением ψ :

$$\psi = w \cdot \Phi. \quad (2.44)$$

Поэтому

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d\Psi}{dt}. \quad (2.45)$$

2.13. Принцип Ленца

На рис 2.13 магнитный поток, пересекающий контур, уменьшается. Следовательно его производная будет отрицательной: $\Delta\Phi < 0$.

Тогда, в соответствии с 2.41 э.д.с будет положительной. Ток, возникающий в контуре под действием наведенной э.д.с. направлен против уменьшения магнитного потока, пронизывающего контур.

При движении контура в противоположном направлении производная магнитного потока, пересекающего его, будет положительной: $\Delta\Phi > 0$. Следовательно, э.д.с., наведенная в контуре, будет отрицательной. Ток, возникающий в контуре под действием наведенной э.д.с. направлен против увеличения магнитного потока, пронизывающего контур. Для определения действительного направления наведенной э.д.с. и тока можно пользоваться принципом Ленца: ток, возникающий в контуре под действием наведенной э.д.с. всегда направлен таким образом, что противодействует изменению магнитного потока, пронизывающего контур.

2.14. Потокосцепление катушки. Индуктивность (рис. 2.14, 2.15)

При прохождении тока в катушке его каждый виток охватывает магнитный поток. Этот поток называется потоком самоиндукции. Алгебраическая сумма этих потоков называется потоко-сцеплением самоиндукции. При постоянной магнитной проницаемости среды потокосцепление самоиндукции пропорционально току. Отношение потокосцепления самоиндукции к току будет постоянной величиной и называется индуктивностью:

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{B\delta}{A} = \frac{B \cdot c}{A} = \text{Ом} \cdot \text{с} = \text{Генри (Гн)}, \quad (2.46)$$

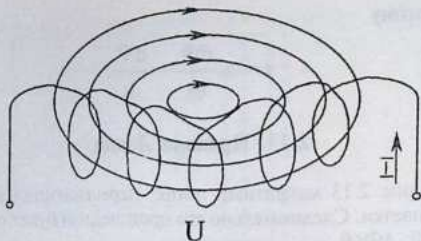


Рис. 2.14. Потокосцепление катушки.

где L — индуктивность,
 ψ — потокосцепление.

Кроме генри пользуются более мелкими единицами: миллигенри ($1\text{мГн}=10^{-3}\text{ Гн}$), микрогенри ($1\text{мкГн}=10^{-6}\text{ Гн}$). Если в кольцевой катушке радиус витков катушки будет значительно меньше радиуса сердечника, то в каждой точке сердечника магнитные индукции будут одинаковы. Магнитный поток будет равен:

$$\Phi = B \cdot S = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{I \cdot \omega}{l} \cdot S = 4\pi \cdot 10^{-7} \mu \frac{I \cdot \omega}{l} \cdot S \quad (2.47)$$



Рис. 2.15. Условное обозначение катушки.

где l — средняя длина магнитных линий;

I — ток катушки;

ω — число витков катушки;

S — сечение сердечника, м^2 .

Магнитный поток пересекает витки катушки. Поэтому потокосцепление самоиндукции будет равно:

$$\psi = \Phi \cdot \omega = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{I \cdot \omega^2}{l} \cdot S. \quad (2.48)$$

Таким образом, индуктивность кольцевой катушки равна:

$$L = \frac{\psi}{I} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{\omega^2}{l} \cdot S \quad (\text{Гн}). \quad (2.49)$$

Если диаметр цилиндрической катушки значительно меньше её длины, то её индуктивность вычисляется по формуле 2.49, но при этом l — длина катушки.

Индуктивность двухпроводной воздушной линии определяется по формуле

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot l \cdot \ln \frac{a}{r} \quad (\text{Гн}), \quad (2.50)$$

где l — длина линии, м;

a — расстояние между проводами, м;

r — радиус провода, м.

2.15. Э.д.с. самоиндукции

При любом изменении тока контура изменяется потокосцепление.

В результате в катушке возникает э.д.с. Появление э.д.с. в контуре при изменении тока в нем называется явлением самоиндукции. Э.д.с. самоиндукции равна:

$$e_L = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{d(L \cdot I)}{dt} = -L \frac{di}{dt}, \quad (2.51)$$

где $\frac{di}{dt}$ — скорость изменения тока в контуре.

Направление э.д.с. самоиндукции определяется по принципу Ленца: при уменьшении тока $\left(\frac{di}{dt} < 0\right)$ э.д.с. будет положительной и направлена одинаково с током, при увеличении тока э.д.с. будет отрицательной и направлена против тока.

2.16. Энергия магнитного поля

Согласно принципу Ленца э.д.с. самоиндукции направлена против изменения тока. Поэтому при подключении катушки на постоянное напряжение ток в ней растет медленно (рис. 2.16 и 2.17). При подключении катушки на сопротивление R ток сразу не исчезает, т.к. этому препят-

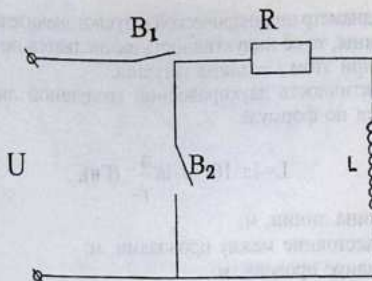


Рис. 2.16. Включение катушки на постоянное напряжение.

ствует э.д.с. самоиндукции. При прохождении тока через сопротивление R в нем выделяется тепло. Следовательно в катушке накапливается энергия. Согласно второму закону Кирхгофа для рис. 2.16 можно написать уравнение:

$$U + e_L = i \cdot R \quad \text{или} \quad U = i \cdot R - e_L = i \cdot R + L \frac{di}{dt} \quad (2.52)$$

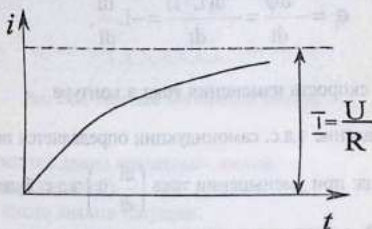


Рис. 2.17. График изменения тока при включении на постоянное напряжение.

Следовательно, часть напряжения, поданного в цепь, падает на сопротивление R ($i \cdot R$), другая часть уравновешивает э.д.с. самоиндукции. Умножим обе части уравнения 2.52 на $i \cdot dt$:

$$U \cdot i \cdot dt = i^2 \cdot R \cdot dt + L \cdot i \cdot di, \quad (2.53)$$

где $U \cdot i \cdot di$ — энергия, полученная цепью от источника питания за время dt .

$i^2 \cdot R \cdot dt$ — энергия, преобразованная в тепло за время dt на R .

$Li \cdot di = i \cdot d\psi$ — приращение энергии магнитного поля. Суммируя приращение энергии при увеличении тока от нуля до значения I , получим энергию, запасённую в магнитном поле цепи:

$$W_m = \int_0^I L \cdot i \cdot di = \frac{Li^2}{2} = \frac{\Psi \cdot I}{2}. \quad (2.54)$$

2.17. Взаимная индукция (рис. 2.18)

Индуктирование э.д.с. в одной катушке в результате изменения тока в другой катушке называется взаимной индукцией. Часть Φ_{12} магнитного потока первой катушки пересекает вторую катушку и образует с витками второй катушки потокосцепление

$$\Psi_{12} = \omega_2 \cdot \Phi_{12}, \quad (2.55)$$

где ω_2 — число витков второй катушки.

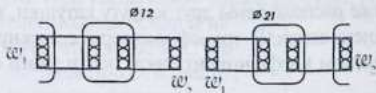


Рис. 2.18. Магнитная связь двух катушек.

Часть Φ_{21} магнитного потока второй катушки пересекает первую катушку и образует с витками первой катушки потокосцепление:

$$\Psi_{21} = \omega_1 \cdot \Phi_{21}, \quad (2.56)$$

где ω — число витков первой катушки.

Отношение потокосцепления второй катушки Ψ_{12} к току i_1 первой катушки называется взаимной индуктивностью

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{i_1} = \frac{\omega_2 \cdot \Phi_{12}}{i_1}$$

Аналогично

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_2} = \frac{\omega_1 \cdot \Phi_{21}}{i_2}. \quad (2.57)$$

Взаимные индуктивности двух катушек равны между собой:

$$M_{12} = M_{21} = M \text{ (Гн)}. \quad (2.58)$$

Взаимная индуктивность зависит от числа витков катушек, от взаимного расположения, магнитных свойств среды. При изменении тока в одной катушке изменяется потокосцепление и индуцируется э.д.с. взаимной индукции в другой катушке:

$$e_{2M} = -\frac{d\psi_{12}}{dt} = -M \frac{di_1}{dt}; \quad (2.59)$$

$$e_{1M} = -\frac{d\psi_{21}}{dt} = -M \frac{di_2}{dt}, \quad (2.60)$$

где e_{1M} и e_{2M} — э.д.с. взаимоиндукции первой и второй катушек.

Взаимная индуктивность связана с индуктивностями катушек следующим выражением:

$$M = K\sqrt{L_1 \cdot L_2}, \quad (2.61)$$

где K — коэффициент связи катушек.

Чем ближе расположены друг к другу катушки, тем больше их коэффициент связи. В трансформаторах с замкнутым стальным сердечником коэффициент связи почти равен единице.

2.18. Намагничивание ферромагнитных материалов

Материалы, обладающие большой магнитной проницаемостью, называются ферромагнитными. К ним относятся железо, сталь, никель, кобальт, их сплавы, а также ферриты — соединения окислов железа с окислами других металлов. Попадая во внешнее магнитное поле, они резко усиливают его магнитную индукцию.

Магнитные свойства веществ зависят от магнитных свойств элементарных носителей магнетизма электронов. Электроны при вращении вокруг своей оси создают так называемые спиновые моменты. Установлено, что главную роль в намагничивании ферромагнитных материалов играют спиновые моменты. В нейтральном атоме все электронные оболочки заполнены. Однако, у атомов ферромагнитных материалов не все электронные оболочки заполнены. Например, в третьей оболочке атомов железа вместо 18 электронов имеется 14. Значит этот

атом будет обладать магнитным моментом, так как спиновые моменты 4-х электронов не компенсированы. В ферромагнитных материалах образуются такие кристаллические структуры, называемые **доменами**, спиновые моменты которых ориентируются **параллельно**.

Таким образом, эти области оказываются самопроизвольно намагниченными.

При отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты отдельных доменов имеют различные направления. Поэтому суммарный магнитный момент вещества оказывается равным нулю, т.е. материал не намагничен.

При наличии внешнего магнитного поля магнитные моменты доменов ориентируются в направлении этого поля, что ведет к намагничиванию материала. Если ферромагнитный сердечник поместить в катушку и пропускать по ней ток, это приведет к намагничиванию сердечника. Магнитное поле сердечника складывается с внешним полем катушки и усиливает его. При увеличении тока в катушке увеличивает-ся ее намагничивающая сила и на-

пряженность магнитного поля. С увеличением напряженности растет магнитная индукция ферромагнитного материала. Зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля при начальных $H=0$ и $B=0$ называется кривой первоначального намагничивания

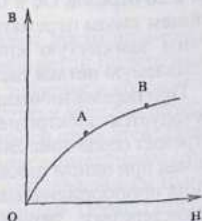


Рис. 2.19. Кривая первоначального намагничивания.

первоначального намагничивания, который характеризует замедление роста B . После точки B зависимость между напряженностью и магнитной индукцией будет вновь пропорциональной. Однако, по сравнению с участком OA рост магнитной индукции резко замедляется, так как сердечник насыщается. Это происходит из-за того, что практически моменты всех доменов ориентированы вдоль магнитных линий поля. Каждому ферромагнитному материалу присуща своя кривая первоначального намагничивания.

2.19. Циклическое перемагничивание

После достижения магнитной индукцией максимального значения начнем уменьшать напряженность магнитного поля H . Это ведет к уменьшению магнитной индукции B . Однако, прежним значениям H уже соответствуют другие значения магнитной индукции B . Таким образом, при размагничивании уменьшение индукции B идет с некоторым запаздыванием по сравнению с уменьшением напряженности H . При $H=0$ магнитная индукция B не будет равной 0, а будет равна значению B_r , называемого остаточной магнитной индукцией (рис 2.20, отрезок Oe).

Теперь начнем намагничивать сердечник в противоположном направлении, изменив направление тока в катушке. При этом изменится знак напряженности H . Магнитная индукция продолжает уменьшаться и доходит до нуля при значении H_c , называемой коэрцитивной силой (на рис 2.20 отрезок Oc и Ok). При дальнейшем таком перемагничивании получим замкнутую кривую $avcdeka$, называемую петлей гистерезиса.

При перемагничивании сердечника расходуется электроэнергия, которая нагревает сердечник. Энергия, затрачиваемая при одном цикле перемагничивания пропорциональна площади петли гистерезиса. Значит, потери электроэнергии на гистерезис пропорциональны частоте тока. С целью уменьшения этих потерь сердечники трансформаторов и электрических машин выполняются из тонких листов электротехнической стали. Из-за того, что листы сердечника тонкие, их сопротивление увеличивается, что ведет к уменьшению гистерезисного тока. Поэтому потери электроэнергии на гистерезис уменьшаются.

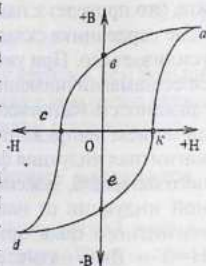


Рис. 2.20. Петля гистерезиса.

2.20. Ферромагнитные материалы

Ферромагнитные материалы делятся на две группы: магнитомягкие и магнитотвердые (рис. 2.21).

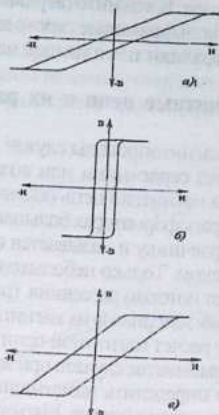


Рис. 2.21. Петли гистерезисов ферромагнитных материалов: а — электро-техническая сталь; б — пермаллой; в — магнитотвердые материалы.

Магнитомягкие материалы обладают круто поднимающейся кривой намагничивания. Площадь петли гистерезиса у них маленькая. Они обладают низким значением коэрцитивной, высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями на гистерезис. К этой группе материалов относятся: электротехническая сталь, кобальт, железоникелевые сплавы (пермаллой), ферриты. Из них изготавливаются сердечники трансформаторов, катушек, электрических машин. Пермаллой обладает высокой магнитной проницаемостью и прямоугольной петлей гистерезиса. Он широко применяется в автоматических системах, электромашинных усилителях. Сердечники высокочастотных катушек изготавливаются из магнитодиэлектриков или ферритов. Магнитодиэлектрики изготавливаются из смеси мелкозернистого ферромагнитного порошка с диэлектриком: смесь формуется и прессуется. Ферритами называют материалы, изготавливаемые из смеси меди, цинка, окислов железа или никеля. Смесь прессуется и отжигается при температуре 1200°C.

Магнитотвердые материалы обладают большой коэрцитивной силой и остаточной магнитной индукцией, у них большая

площадь петли гистерезиса. К магнитотвердым материалам относятся углеродистые, вольфрамовые, хромистые и кобальтовые стали. Из них изготавливают постоянные магниты.

2.21. Магнитные цепи и их расчет

Магнитная цепь и магнитопроводы служат для прохождения магнитного потока через сердечники или воздух. Например, в катушке без сердечника магнитная цепь полностью проходит по воздуху (рис. 2.22, 1). В трансформаторах большая часть магнитного потока проходит по сердечнику и называется основным или рабочим магнитным потоком. Только небольшая часть замыкается по воздуху и её называют потоком рассеяния. (рис. 2.22, 2). С насыщением ферромагнитных материалов их магнитная проницаемость уменьшается. Поэтому расчет магнитной цепи производится графическим путем. В большинстве случаев при заданных величинах магнитной цепи надо определить намагничивающую силу для создания заданного магнитного потока. Магнитную цепь разбиваем на однородные участки, определяем магнитную индукцию в каждом из них.

$$B = \frac{\Phi}{S}, \quad (2.62)$$

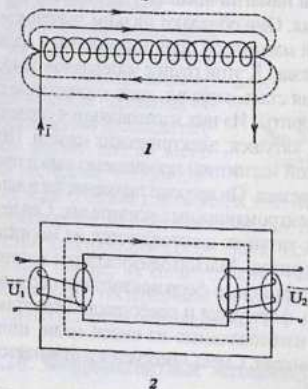


Рис. 2.22. Магнитные цепи: 1 — катушка без сердечника; 2 — трансформатор.

где B — магнитная индукция участка;

Φ — заданное значение магнитного потока.

После этого по кривой намагничивания (рис. 2.23) для каждого участка находим величину напряженности в соответствии с найденным значением магнитной индукции.

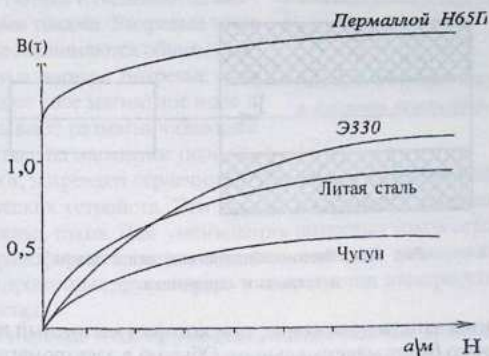


Рис. 2.23. Кривые намагничивания некоторых ферромагнитных материалов.

В воздушном промежутке величина напряженности определяется по формуле:

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_0}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 80 \cdot 10^4 \cdot B_0 \frac{A}{M}, \quad (2.63)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость воздуха.

$$B_0 = \frac{\Phi}{S_0}, \quad (2.64)$$

где S_0 — поперечное сечение воздушного промежутка. После нахождения величин напряженности на каждом участке по закону полного тока находим намагничивающую силу:

$$F = I \cdot w = H_0 \cdot l_0 + H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + \dots + H_n \cdot l_n, \quad (2.65)$$

2.22. Электромагниты

Если расположить стальной сердечник вблизи катушки с током (рис. 2.24), то он намагничивается и втягивается в катушку. Под действием электромагнитных сил сердечник

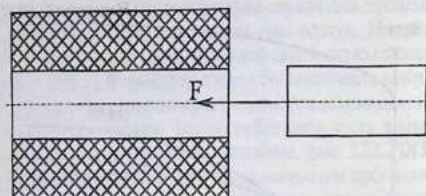


Рис. 2.24. Взаимодействие катушки с током и стального сердечника.

стремится занять положение, при котором магнитный поток через него будет максимальным. Обычно в электромагнитах сердечник установлен неподвижно и под действием электромагнитных сил притягивает к себе якорь (рис. 2.25). Сила тяги электромагнита определяется по формуле:

$$F = 4 \cdot 10^4 \cdot B^2 \cdot S \cdot H \quad (2.26)$$

где B — магнитная индукция, Т; S — сечение полюса, м^2 ; F — сила, кг.

Электромагниты применяются в измерительных приборах, реле, автоматических устройствах.

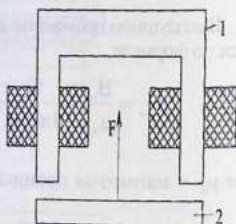


Рис. 2.25. Электромагнит:
1-сердечник; 2-якорь.

2.23. Вихревые токи (рис. 2.26)

В проводниках, сердечниках катушек и электрических машин под действием изменяющегося магнитного поля воз-

никают токи. Эти токи замыкаются в контурах, плоскости которых перпендикулярна направлению изменения магнитного потока и называются **вихревыми токами**. Вихревые токи также подчиняются общим правилам и законам. Вихревые токи создают свое магнитное поле и оказывают размагничивающее действие на магнитное поле катушки, нагревают сердечники, тем самым снижают КПД электрических устройств. Эти потери называются потерями от вихревых токов. Для уменьшения вихревых токов сердечники трансформаторов, электрических машин выполняются из изолированных друг от друга тонких листов электротехнической стали.

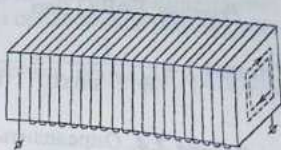


Рис. 2.26. Вихревые токи в стальном сердечнике.

Вихревые токи применяются для создания вращающего момента (например, в электрических счетчиках), индукционного нагрева металлов для их плавки и закалки.

Задачи

Задача 2.1. В однородное магнитное поле с индукцией $B=1,4$ Тл внесен контур с площадью $S=150$ см², поверхность которого перпендикулярна магнитным линиям поля. Определить магнитный поток через этот контур.

Решение: $\Phi=B \cdot S=1,4 \cdot 0,015=0,021$ Вб.

Задача 2.2. В однородное магнитное поле индукцией $B=0,5$ л введен проводник длиной $l=0,3$ м и током $I=1$ А перпендикулярно силовым линиям поля. Определить действующую на проводник.

Решение: $F=B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha=0,5 \cdot 0,3 \cdot 1 \cdot 1=1,8$ Н

Задача 2.3. Однородное магнитное поле с магнитной индукцией $B=1,0$ Тл действует на проводник длиной $l=1$ м. Определить величину тока проводника, если его действующая сила $F=1$ Н и установлен он перпендикулярно магнитным линиям.

Решение: $F = B \cdot I \cdot \sin \alpha$

Отсюда $I = \frac{F}{B \cdot I \cdot \sin \alpha} = \frac{0,5}{1 \cdot 0,2 \cdot \sin 90^\circ} = 2,5 \text{ А.}$

Задача 2.4. Определить магнитную индукцию и напряженность магнитного поля на расстоянии $R=25$ см от проводника с током $I=50$ А.

Решение: окружающая среда — воздух, магнитная проницаемость которого равна $\mu_0=1$. Напряженность равна:

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot R} = \frac{50}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,25} = 32 \frac{\text{А}}{\text{М}}, \text{ где } R=25 \text{ см}=0,25 \text{ М}$$

Магнитная индукция равна:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{I}{2\pi \cdot R} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{I}{2\pi \cdot R} = 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{50}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,25} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Тл.}$$

Задача 2.5. Определите напряженность магнитного поля в центре кольцеобразного проводника диаметром 25 мм и током $I=12$ А

Решение: $H = \frac{I}{d} = \frac{12}{25 \cdot 10^{-3}} = 480 \text{ А/М.}$

Задача 2.6. В кольцевой катушке с каркасом из гетинакса ток равен $I=1,54$ А, число витков $w=250$, наружный диаметр $D=52$ мм, внутренний $d=42$ мм. Определить максимальную и минимальную напряженности внутри катушки.

Решение: магнитная проницаемость гетинакса $\mu_a=1$. Напряженность на внутренней поверхности максимальна, а на наружной минимальна. Поэтому:

$$H_{\text{макс}} = \frac{I \cdot w}{2\pi \frac{d}{2}} \cdot \mu_a = \frac{1,54 \cdot 250 \cdot 1}{2 \cdot 3,14 \cdot 21 \cdot 10^{-3}} = 2918 \frac{\text{А}}{\text{М}};$$

$$H_{\text{мин}} = \frac{I \cdot w}{2\pi \frac{D}{2}} \mu_a = \frac{1,54 \cdot 250 \cdot 1}{2 \cdot 3,14 \cdot 26 \cdot 10^{-3}} = 2362 \frac{\text{А}}{\text{М}}.$$

Задача 2.7. Расстояние между двумя проводниками длиной $l=200$ мм равно $a=5$ мм, токи проводников равны $I_1=30$ А, $I_2=75$ А.

Определить силу взаимодействия проводов, расположенных в воздухе.

Решение:

$$F = \mu_0 \frac{I_1 \cdot I_2}{2\pi \cdot a} \cdot l = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{30 \cdot 75 \cdot 200 \cdot 10^{-3}}{2,314 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ Н.}$$

Задача 2.8. В однородном магнитном поле с магнитной индукцией $B=1,2$ Тл со скоростью $V=25$ м/с движется проводник длиной $l=0,3$ м. Угол между магнитными линиями и плоскостью проводника $\alpha=45^\circ$. Определить э.д.с., наведенную в проводнике.

Решение:

$$E = B \cdot l \cdot V \cdot \sin \alpha = 1,2 \cdot 0,3 \cdot 25 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 6,36 \text{ В где } \sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Задача 2.9. В однородном магнитном поле перпендикулярно магнитным линиям установлен четырехугольный виток проволоки. При изменении времени на величину $\Delta t=0,05$ с магнитная индукция, изменившись на величину $\Delta B=0,9$ Тл, навела в витке э.д.с. в 70 мВ. Определить площадь витка проволоки.

Решение:

$$e = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{\Delta B \cdot S}{\Delta t}, \text{ где } \Delta \Phi - \text{производная магнитного потока.}$$

$$\text{Отсюда } S = \frac{e \cdot \Delta t}{\Delta B} = \frac{0,07 \cdot 0,05}{0,9} = 0,0039 \text{ м}^2.$$

Задача 2.10. Магнитный поток сердечника (рис. 2.27) равен $\Phi=2,2 \cdot 10^{-4}$ Вб, ток катушки равен $I=1,2$ А. Сердечник выполнен из стали Э330 толщиной 2 см. Определить необходимое число витков катушки.

Решение: сердечник делится на три части, поперечные сечения которых равны:

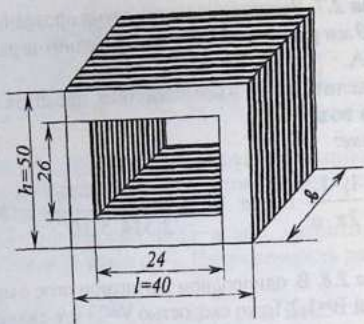


Рис. 2.27. Рисунок к задаче 2.10.

$$S_1 = \frac{40 - 24}{2} \cdot B = \frac{16}{2} 20 = 160 \text{ мм}^2 = 0,00016 \text{ м}^2$$

$$S_2 = \frac{50 - 26}{2} \cdot B = 12 \cdot 20 = 0,00024 \text{ м}^2$$

$$S_0 = S_1 = 0,00016 \text{ м}^2.$$

Величина магнитной индукции каждой части равна:

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{2,2 \cdot 10^{-4}}{0,00016} = 1,4 \text{ Тл};$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{2,2 \cdot 10^{-4}}{0,00024} = 0,91 \text{ Тл}.$$

$$B_0 = \frac{\Phi}{S_0} = 1,4 \text{ Тл}.$$

Из кривой намагничивания стали Э330 находим напряженности;

$$H_1 = 1800 \frac{\text{А}}{\text{М}}; \quad H_2 = 250 \frac{\text{А}}{\text{М}}$$

Напряженность воздушного промежутка равна

$$H_0 = 80 \cdot 10^4 B_0 = 80 \cdot 10^4 \cdot 1,4 = 112 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{М}}$$

Намагничивающая сила равна:

$$F = I \cdot w = H_0 \cdot l_0 + H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 = 112 \cdot 10^4 \cdot 0,0005 + 1800 \cdot 0,52 + 250 \cdot 0,08 = 664 \text{ А}$$

Число витков катушки равно:

$$w = \frac{F}{I} = \frac{664}{1,2} = 552 \quad \text{витка}$$

Задача 2.11. Потокосцепление контура равно $\Psi = 0,01$ Вб, индуктивность $L = 1,8$ мГн. Определить ток контура.

Решение:

$$I = \frac{\Psi}{L} = \frac{0,01}{1,8 \cdot 10^{-3}} = 5,5 \text{ А.}$$

Задача 2.12. Магнитная индукция в центре цилиндрической катушки равна $B = 1,45$ Тл, длина катушки равна $l = 180$ мм, число витков $w = 540$, сечение сердечника $S = 78,5$ мм², $\mu = 500$. Определить ток индуктивности и напряженность катушки в центре.

Решение:

$$L = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{w^2 \cdot S}{l} = 500 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{(540)^2 \cdot 78,5 \cdot 10^{-6}}{0,18} = 0,079 \text{ Гн};$$

$$\text{ток } I = \frac{\Psi}{L} = \frac{B \cdot S \cdot w}{L} = \frac{1,45 \cdot 78,5 \cdot 10^{-6} \cdot 540}{0,079} = 0,77 \text{ А.}$$

Диаметр катушки равен:

$$S = \frac{\pi d^2}{4}; d^2 = \frac{4 \cdot S}{\pi}; d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 78,5}{3,14}} = 10 \text{ мм.}$$

Таким образом, длина катушки намного больше ее диаметра $l \gg d$. Поэтому напряженность в центре катушки равна:

$$H = \frac{I \cdot w}{l} = \frac{0,77 \cdot 540}{0,18} = 2309 \text{ А/М.}$$

Задача 2.13 энергия, накопленная катушкой равна $W_M = 5,2$ Дж, индуктивность её равна $L = 0,3$ Гн. Определить ток катушки.

Решение:

$$W_M = \frac{LI^2}{2}; I = \sqrt{\frac{2W_M}{L}} = 5,9 \text{ А.}$$

ГЛАВА 3

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.1. Электрическое сопротивление

Известно, что электрический ток — направленное движение электрических зарядов. При этом заряды сталкиваются с узлами кристаллической решетки проводника и теряют часть своей энергии. Однако, под действием электрического поля скорость зарядов увеличивается. В результате устанавливается равномерное движение зарядов. Способность проводника препятствовать движению электрических зарядов называется электрическим сопротивлением. Сопротивление обозначается буквой R , единица измерения — Ом. Однако, на практике пользуются также другими единицами: килоОм (кОм) = 10^3 Ом, мегаОм (МОм) = 10^6 Ом. Величина, обратная сопротивлению называется электропроводностью:

$$g = \frac{1}{R} = \frac{1}{\text{Ом}} = \text{сименс (сим)}. \quad (3.1)$$

Эта величина показывает способность проводника проводить ток. Если известны геометрические размеры проводника, материал проводника, то его сопротивление можно определить по формуле:

$$R = \rho \frac{l}{S} \text{ Ом}, \quad (3.2)$$

где l — длина проводника, м;

S — сечение проводника, мм^2 ;

ρ — удельное сопротивление — это сопротивление проводника длиной 1 м, сечением 1 мм^2 . Из формулы 3.2 получим размерность удельного сопротивления.

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} = \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

Под сопротивлением понимают один из параметров электрической цепи, проводников или потребителей электроэнергии, а также устройства для ограничения тока в электрической цепи, называемые резисторами. Реостаты — это переменные сопротивления, служащие для изменения тока в электрических цепях (рис. 3.1).

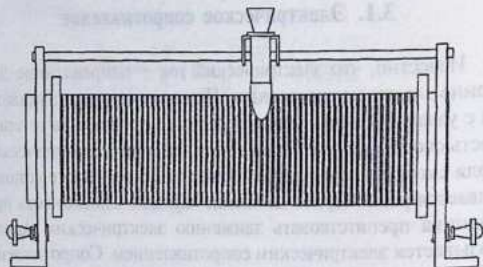


Рис. 3.1. Реостат.

Потенциометры — это переменные сопротивления, служащие для изменения тока в радиотехнических цепях.

3.2. Зависимость сопротивления от температуры

Повышение температуры металлического проводника вызывает увеличения скорости теплового движения частиц. Это ведет к увеличению числа столкновений свободных электронов с узлами кристаллической решетки. При этом увеличивается сопротивление проводника.

При нагревании угля и электролитов наряду с уменьшением скорости свободных электронов увеличивается концентрация зарядов. В результате сопротивление проводника уменьшается.

Относительное приращение сопротивления большинства металлических проводников в узких границах изменения температуры $0 \div 100^\circ\text{C}$ пропорционально приращению температуры.

$$\frac{\Delta R}{R_1} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} = \alpha(t_2 - t_1)$$

откуда $R_2 = R_1 + R_1 \cdot \alpha (t_2 - t_1)$ или

$$R_2 = R_1 [(1 + \alpha (t_2 - t_1))] \quad (3.3)$$

где R_1 и R_2 — это сопротивления при температурах t_1 и t_2 ; α — температурный коэффициент сопротивления, он численно равен относительному приращению сопротивления при нагревании проводника на 1°C .

В таблица 3.1. даны температурные коэффициенты некоторых металлов и сплавов.

Таблица 3.1

Материал	Плотность г/см ³	Температура плавления °C	Предел прочности на разрыв кг/мм ²	Удельное сопротивление Ом·мм ² /м	Среднее значение температурного коэффициента от 0 до 100°C 1/град.
Алюминий	2,7	657	14+22	0,029	0,004
Бронза	8,8+8,9	900	50-60	0,021-0,4	0,004
Вольфрам	18,7	3370	415	0,056	0,00464
Константан	8,8	1200	40	0,4-0,51	0,00005
Латунь	8,1	900	40	0,07-0,08	-
Манганин	8,1	960	55	0,42	0,00006
Медь	8,8	1083	25-40	0,0175	0,004
Нихром	8,2	1360	70	1,1	0,00015
Сталь	7,8	1400	80-150	0,13-0,25	0,006
Фехраль	7,6	1450	-	1,4	0,00028
Хромель	7,1	1500	80	1,3	0,00004

3.3. Проводниковые материалы

В электротехнике применяются твердые, жидкие и газообразные проводники. Твердые проводники — это металлы и гра-

фит, жидкие проводники — это электролиты и расплавленные металлы. В ионных приборах в качестве проводника используют газ. Металлические проводники можно разделить на две группы. К первой группе относятся материалы с низким удельным сопротивлением, ко второй — материалы с сравнительно высоким удельным сопротивлением. К первой группе относятся такие химически чистые, металлы как медь и алюминий.

Медь как проводниковый материал наиболее широко применяется вследствие небольшого удельного сопротивления, хорошей обрабатываемости и достаточной механической прочности и стойкости к коррозии. В электротехнике применяют твердую медь марки МТ и мягкую ММ. Твердая медь применяется для контактных проводов, коллекторных пластин и т.д. Мягкая медь применяется для обмоточных проводов, из которых изготавливают обмотки электрических машин, электромагнитных аппаратов и приборов.

Кроме чистой меди применяются ее сплавы — бронза, латунь. Например, кадмиевая бронза применяется для коллекторных пластин и контактных проводов. Бериллиевая бронза применяется для токоведущих пружин, скользящих контактов, шеткодержателей. Латунь широко применяется для изготовления деталей электрических аппаратов и приборов.

Алюминий несмотря на то, что обладает худшими электрическими свойствами по сравнению с медью, также широко применяется в электротехнике. Основная причина этого — значительно меньший вес. Поэтому на воздушных судах широко применяется алюминий. Для линий электропередачи применяются алюминиевые сплавы (например алдрей). Применяются также сталеалюминевые провода, у которых внутренние проволоки стальные, а наружные — алюминиевые.

Сталь обладает значительным удельным сопротивлением и малой стойкостью к коррозии. По этой причине она используется для проводов воздушных линий передачи малой мощности (например, в городской радиосети).

Ко второй группе проводниковых материалов относятся материалы с высоким удельным сопротивлением — нихром, фехраль, манганин, константан. Нихром и фехраль применяются для изготовления обмоток нагревательных приборов и реостатов. Манганин и константан из-за их малого температурного коэффициента сопротивления применяются для изготов-

ления шунтов, добавочных сопротивлений и образцовых катушек. Электротехнический уголь используют для изготовления щеток электрических машин, угольных электродов электролитических ванн и сварки, непроволочных сопротивлений, деталей электровакуумных приборов.

3.4. Электрическая цепь и её элементы

Совокупность электрических устройств на пути прохождения электрического тока называется электрической цепью. Всякая электрическая цепь состоит из источника тока, приемников электроэнергии, коммутационной аппаратуры и проводов. Источник тока совершает работу, приводя в движение электрические заряды по замкнутому контуру. Работа, совершаемая источником тока по перемещению отдельного положительного заряда в замкнутом контуре, называется электродвижущей силой (э.д.с.). Размерность э.д.с. — Вольт (В).

$$1 \text{ В} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}}$$

Виды источников э.д.с.:

1. Гальванические элементы.
2. Аккумуляторы.
3. Электрические генераторы.
4. Полупроводниковые кремниевые фотоэлементы (солнечные батареи).

Приемниками электроэнергии являются электродвигатели, преобразующие электроэнергию в механическую, осветительные лампы, нагревательные приборы и т.д. К коммутационной аппаратуре относятся выключатели, кнопки, реле, автоматические выключатели и предохранители. Кроме вышеуказанных устройств в электрическую цепь могут войти измерительные приборы: амперметры, вольтметры, счетчики и т.д. На рис 3.2. приведена про-

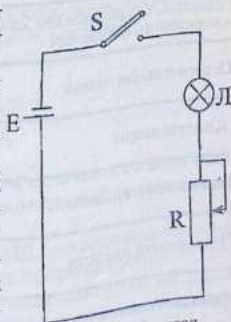


Рис. 3.2. Простая электрическая цепь.

стейшая схема соединения осветительной лампы. Это схема состоит из источника тока E , выключателя S , реостата R и осветительной лампы L .

Таблица 3.2

Условные обозначения некоторых элементов электрической цепи

Элемент	Условное обозначение
Однополюсный выключатель	
Двухполюсный выключатель	
Плавкий предохранитель	
Гальванический элемент, аккумулятор	
Резистор постоянного сопротивления	
Резистор переменного сопротивления	
Резистор, сопротивление которого зависит от напряжения (варистор)	
Осветительная лампа	
Конденсаторы	
Постоянной емкости	
Переменной емкости	
Электролитический	

2.5. Закон Ома (рис. 3.3)

1. Закон Ома для полной цепи: во всяком замкнутом контуре ток прямо пропорционален э.д.с. и обратно пропорционален сумме внешнего и внутреннего сопротивлений этого контура:

$$I = \frac{E}{R + r_0} \quad (3.4)$$

или

$$E = I \cdot R + I \cdot r_0 = U + U_0,$$

где r_0 — внутреннее сопротивление источника тока;

R — внешнее сопротивление цепи;

$U_0 = I \cdot r_0$ — падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника тока;

$U = I \cdot R$ — напряжение между зажимами источника тока.

I — ток.

При обрыве электрической цепи (рис 3.3.) ток будет равен $I=0$. Поэтому э.д.с. источника будет равна напряжению между его зажимами:

$$E = U$$

Если сопротивление R замкнуть коротким проводом, то его сопротивление будет почти равно 0. Поэтому

$$U = I \cdot R = 0.$$

В этом случае

$$E = U_0 + U = U_0.$$

Так как внутреннее сопротивление источника очень мало, то в цепи появится большой ток, называемый током короткого замыкания.

Для повышения мощности и КПД источников тока необходимо уменьшать их внутреннее сопротивление r_0 .

2. Закон Ома для участка цепи: величина тока на участке прямо пропорциональна напряжению этого участка и обратно пропорциональна его сопротивлению:

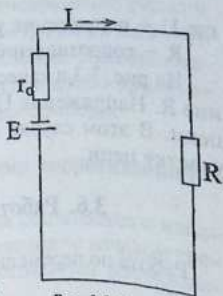


Рис. 3.3. Замкнутая электрическая цепь.

$$I = \frac{U}{R} \quad (3.7)$$

где U — напряжение участка цепи;
 R — сопротивление.

На рис. 3.3 в качестве участка цепи будет сопротивление R . Напряжение U полностью расходуется на участке цепи. В этом случае говорят о падении напряжения на участке цепи.

3.6. Работа, энергия и мощность

Работа по перемещению зарядов в электрической цепи равна:

$$A = E \cdot I \cdot t. \quad (3.8)$$

Подставив в эту формулу значение E из формулы 3.4, получим

$$A = I \cdot t (U + U_0) = U \cdot I \cdot t + U_0 \cdot I \cdot t = W + W_0, \quad (3.9)$$

где $W_0 = I \cdot U_0 \cdot t$ — энергия, теряемая в источнике на его нагрев;
 $W = I \cdot U \cdot t$ — энергия, расходуемая во внешней цепи.

Скорость выполнения работы называется мощностью:

$$P = \frac{A}{t} = E \cdot I \quad (Вт) — \text{мощность источника}; \quad (3.10)$$

$$P = \frac{W}{t} = U \cdot I \quad (Вт) — \text{мощность потребителя электроэнергии}; \quad (3.11)$$

$$P = \frac{W_0}{t} = U_0 \cdot I \quad (Вт) — \text{мощности потерь}. \quad (3.12)$$

3.7. Закон Джоуля — Ленца

Электрические заряды при своем движении в проводнике сталкиваются с ионами или молекулами вещества и передают им часть своей кинетической энергии, вследствие чего происходит нагревание проводника. Количество электрической энергии, преобразованной в тепло за время t :

$$W = I^2 \cdot R \cdot t \quad \text{Дж}$$

или

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t \text{ кал.} \quad (3.13)$$

Эта зависимость была получена одновременно русским академиком Ленцем Э.Х. и английским физиком Джоулем. Поэтому и называется закон Джоуля-Ленца. Преобразование электрической энергии в тепловую широко применяется в нагревательных и осветительных приборах.

3.8. Последовательное соединение сопротивлений

Если конец одного сопротивления соединяется с началом второго, конец второго сопротивления — с началом третьего и т.д., то такое соединение называется последова-

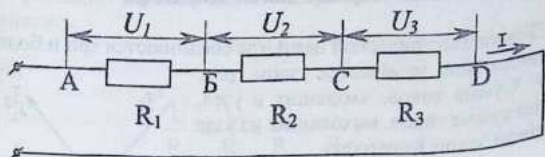


Рис. 3.4. Последовательное соединение резисторов.

тельным (рис. 3.4). При этом через все сопротивления протекает одинаковой ток. Согласно закону Ома падения напряжения на сопротивлениях равны:

$$U_1 = I \cdot R_1; U_2 = I \cdot R_2; U_3 = I \cdot R_3.$$

Откуда: $U_1; U_2; U_3 = R_1; R_2; R_3$.

Таким образом, падения напряжения на последовательно соединенных сопротивлениях пропорциональны величинам сопротивлений.

Напряжения на сопротивлениях можно выразить через разности потенциалов на их зажимах (рис. 34):

$$U_1 = \phi_A - \phi_B; U_2 = \phi_B - \phi_C; U_3 = \phi_C - \phi_D.$$

Складывая почленно левые и правые части уравнений, получим:

$$U_1 + U_2 + U_3 = \phi_A - \phi_B + \phi_B - \phi_C + \phi_C - \phi_D = \phi_A - \phi_D = U. \quad (3.15)$$

Т.е. сумма падений напряжения на последовательно соединенных сопротивлениях равно напряжению на зажимах цепи.

Разделив правую и левую части уравнения 3.15 на ток, получим:

$$\frac{U_1 + U_2 + U_3}{I} = \frac{U}{I} \quad (3.16)$$

или

$$R_1 + R_2 + R_3 = R, \quad (3.17)$$

где R — общее (эквивалентное) сопротивление цепи.

Таким образом, при последовательном соединении сопротивлений их общее сопротивление равно сумме этих сопротивлений.

3.9. Первый закон Кирхгофа

Точка электрической цепи, где соединяются три и более проводников, называется узлом (рис. 3.5). Сумма токов, входящих в узел, равна сумме токов, выходящих из узла (первый закон Кирхгофа).

$$I_1 = I_2 + I_3 + I_4$$

Если все токи перенести в одну сторону, получим:

$$I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0.$$

В общем виде

$$\Sigma I = 0,$$

т.е. алгебраическая сумма токов в узле равно нулю. При составлении уравнения токи, втекающие в узел, записываются со знаком плюс, а вытекающие — со знаком минус.

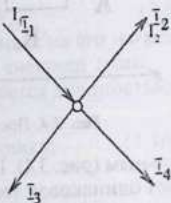


Рис. 3.5. Первый Закон Кирхгофа.

3.10. Параллельное соединение сопротивлений

При параллельном соединении два и более сопротивлений присоединяются к одним и тем же двум узлам (рис. 3.6).

Так как сопротивления присоединены к одним и тем же узлам, то они находятся под одинаковым напряжением:

$$U = U_1 = U_2 = U_3,$$

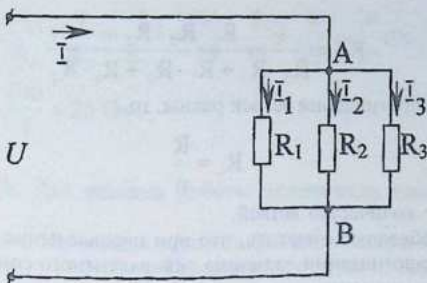


Рис. 3.6. Параллельное соединение резисторов.

Согласно первому закону Кирхгофа для узла А можно написать:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (3.20)$$

или

$$\frac{U}{R_s} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}, \quad (3.21)$$

где R_s — эквивалентное сопротивление.

Сократив уравнение на U , получим:

$$\frac{1}{R_s} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (3.22)$$

или

$$g_s = g_1 + g_2 + g_3, \quad (3.23)$$

где g_s — эквивалентная проводимость.

Таким образом, при параллельном соединении сопротивлений их эквивалентная (общая) проводимость равна сумме проводимостей всех параллельных ветвей.

Формула 3.22. даёт возможность определить эквивалентное сопротивление (в данном случае при трёх ветвях):

$$\frac{1}{R_s} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}.$$

Оно равно:

$$R_1 = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2}$$

Если сопротивления ветвей равны, то

$$R_1 \approx \frac{R}{n}$$

где n — количество ветвей.

Необходимо отметить, что при параллельном соединении сопротивлений величина эквивалентного сопротивления меньше меньшего.

3.11. Смешанное соединение сопротивлений

При смешанном соединении сопротивления участков цепи могут соединяться параллельно и последовательно. Поэтому для расчета эквивалентного сопротивления всей цепи применяются правила и параллельного и последовательного соединений. Рассмотрим пример (рис 3.7).

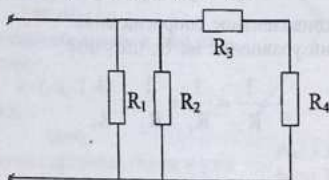


Рис. 3.7. Смешанное соединение резисторов.

Пример. На рис. 3.7 $R_1=25$ Ом, $R_2=50$ Ом, $R_3=40$ Ом, $R_4=60$ Ом. Определить эквивалентное сопротивление всей цепи.

Решение: Резисторы R_3 и R_4 соединены между собой последовательно. Поэтому их общее сопротивление равно:

$$R_{3,4} = R_3 + R_4 = 40 + 60 = 100 \text{ Ом.}$$

Резисторы R_1 , R_2 и $R_{3,4}$ соединены между собой параллельно. Поэтому, эквивалентное сопротивление цепи определяется следующим образом:

$$\frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{3,4}} = \frac{1}{25} + \frac{1}{50} + \frac{1}{100} = \frac{4}{100} \text{ Ом}^{-1}$$

$$R_3 = \frac{100}{4} = 25 \text{ Ом.}$$

3.12. Два режима работы источников тока

На практике встречаются электрические цепи с двумя и более источниками тока. При этом некоторые из них могут работать в режиме генератора, а другие — в режиме потребителя (например при зарядке аккумуляторов). Такая цепь показана на рис. 3.8. Пусть их э.д.с. направлены встречно и $E_1 > E_2$. Поэтому источник E_1 будет работать в режиме генератора, а E_2 — в режиме потребителя. Ток в цепи — по часовой стрелке. Определим напряжения между зажимами источников. Согласно закону Ома для полной цепи ток цепи равен:

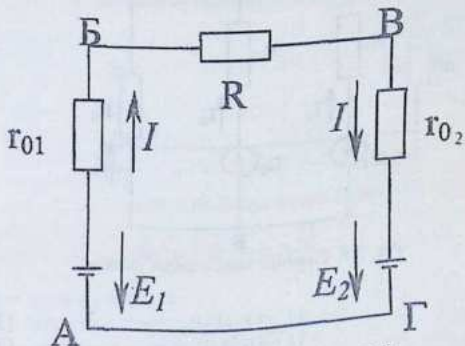


Рис. 3.8. Цепь с двумя источниками тока.

$$I = \frac{E_1 - E_2}{r_{01} + R + r_{02}},$$

где r_{01} и r_{02} — внутренние сопротивления источников.

(3.24)

Участок БА цепи состоит из источника E_1 и внутреннего сопротивления r_{01} . Потенциал точки Б равен:

$$\varphi_B = \varphi_A + E_1 - I \cdot r_{01} \text{ или } \varphi_B - \varphi_A = \varphi_{BA} = E_1 - I \cdot r_{01}. \quad (3.25)$$

Следовательно, при работе источника тока в режиме генератора напряжение между его зажимами равно разности э.д.с. источника и падения напряжения внутри него. Потенциал точки Г равен:

$$\varphi_r = \varphi_B - I \cdot r_{02} - E_2 \text{ или } \varphi_B - \varphi_r = \varphi_{Br} = E_2 + I \cdot r_{02}. \quad (3.26)$$

Следовательно, при работе источника в режиме потребителя напряжение между его зажимами равно сумме э.д.с. источника и падения напряжения на нем.

3.13. Второй закон Кирхгофа

На рис. 3.9. э.д.с. источников E_1 и E_2 направлены одинаково. Определим величину напряжения между точками А и Б.

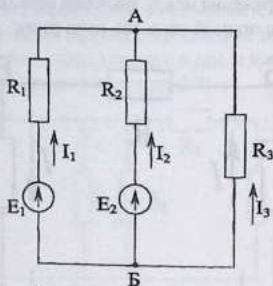


Рис. 3.9. Сложная цепь с двумя узлами.

$$U_{BA} = E_1 - I_1 \cdot R_1; \quad (3.27)$$

$$U_{BA} = E_2 - I_2 \cdot R_2. \quad (3.28)$$

Приравняв правые части, получим:

$$E_1 - I_1 \cdot R_1 = E_2 - I_2 \cdot R_2 \quad (3.29)$$

или

$$E_1 - E_2 = I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2. \quad (3.30)$$

В общем виде

$$\Sigma E = \Sigma I \cdot R. \quad (3.31)$$

Последнее уравнение известно как выражение второго закона Кирхгофа: во всяком замкнутом контуре алгебраическая сумма э.д.с. источников равна сумме падений напряжения на всех участках этого контура.

Если направления э.д.с. и тока совпадают с направлением обхода контура, то знаки э.д.с. и тока будут «+», если не совпадают, то знак «-».

3.14. Падение напряжения в линиях передачи электрической энергии

При передаче электрической энергии в проводах происходит падение напряжения. При коротких проводах это падение напряжения можно не учитывать. При длинных линиях падение напряжения становится достаточно большим и его надо учитывать (рис. 3.10). Падение напряжения равно:

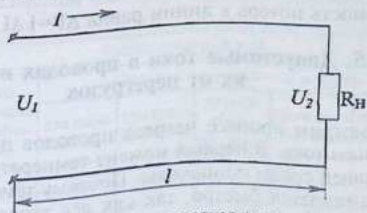


Рис. 3.10. Двухпроводная линия.

$$\Delta U = I \cdot R_{\text{л}} = I \cdot \rho \frac{2l}{S}, \quad (3.32)$$

где l — длина линии, м;

ρ — удельное сопротивление провода;

S — сечение провода, мм².

Разница напряжений начала и конца линии равна падению напряжения в линии:

$$U_1 - U_2 = \Delta U = I \cdot R_{\text{л}}. \quad (3.33)$$

При неизменном напряжении в начале линии напряжение в конце линии зависит от тока нагрузки: чем больше ток I , тем больше падение напряжения ΔU и тем меньше напряжение в конце линии

$$U_2 = U_1 - \Delta U.$$

сог

Изменение напряжения на потребителях должно быть в допустимых пределах: для маломощных потребителей падение напряжений допускается в пределах $-2,5+5\%$, а для мощных потребителей $\pm 5\%$.

ге-

сти

те-

При известном значении допустимого падения напряжения исходя из формулы 3.32 можно определить сечение провода:

би

ис

$$S = I \cdot \rho \frac{2l}{\Delta U}. \quad (3.35)$$

Коэффициент полезного действия линии равен:

во.

$$\eta = \frac{U_2}{U_1} = \frac{U_1 - \Delta U}{U_1} = 1 - \frac{\Delta U}{U_1}. \quad (3.36)$$

Мощность потерь в линии равна $\Delta P = I \cdot \Delta U$.

3.15. Допустимые токи в проводах и защита их от перегрузок

или

Рассмотрим процесс нагрева проводов при прохождении по ним тока. В первый момент температура провода и окружающей среды одинаковы. Поэтому температура провода поднимается быстро, так как все тепло практически идет на его нагрев. С ростом температуры провода увеличивается разность температуры провода и окружающей среды, что ведет к увеличению тепла, отдаваемого проводом, и рост его температуры замедляется. При некоторой температуре устанавливается тепловое равновесие: количество тепла, выделяющегося в проводе равно количеству тепла, отдаваемого в окружающую среду. Температура провода достигает установившегося значения. Достижение установившегося значения температуры у различных устройств длится неодинаково. Например, для ламп накаливания это время равно долям секунды, а для мощных электрических машин — до нескольких часов. Нагрев проводов допускается до температуры $60-80^\circ\text{C}$. Ток, при котором нагревание достигает предельно допустимых значений температуры называется допустимым (номинальным) током.

Коротким замыканием называется непосредственное соединение двух проводов (клемм) с разными потенциалами или через ничтожно малое сопротивление. Токи короткого замыкания могут достигать очень больших значений и превышать нормальный ток в 18–20 раз.

Для защиты электрических цепей и устройств от токов перегрузки и коротких замыканий применяются плавкие предохранители и автоматические выключатели. При перегрузках плавкая вставка предохранителя расплавляется и разрывает цепь, отключая защищаемый участок. Следовательно, предохранители нельзя повторно использовать. Автоматические выключатели после их охлаждения можно повторно использовать.

Таблица 3.3

Длительно допустимые токовые нагрузки для медных проводов с резиновой или полихлорвиниловой изоляцией

Сечение провода, мм ²	Токовые нагрузки, А					
	Провода, проведенные на открытом воздухе	Провода, проведенные в трубах				
		два одно- жильных	три одно- жильных	четыре одно- жильных	один двух- жильный	один трех- жильный
0,5	11	-	-	-	-	-
0,75	15	-	-	-	-	-
1,0	17	16	15	14	15	14
1,5	23	19	17	16	18	15
2,5	30	27	25	25	25	21
4,0	41	38	35	30	32	27
6,0	50	46	62	40	40	34
10	80	70	80	50	55	50
16	100	85	80	75	80	70
25	140	115	100	90	100	85
35	170	135	125	115	125	100
50	215	185	170	150	160	135
70	270	225	210	185	195	175
95	330	275	255	225	245	215
120	385	315	290	260	295	250
150	440	360	330	-	-	-

Если напряжение, ток и мощность электрической цепи соответствуют расчетным, то такой режим называется номинальным. Параметры номинального режима даются в инструкции к устройству.

Таблица 3.4

Длительно допустимые токовые нагрузки для алюминиевых проводов с резиновой или полихлорвиниловой изоляцией

Сечение провода, мм ²	Провода, проведенные в открытом воздухе	Токовые нагрузки, А провода		
		Провода, проложенные в трубе		
		два одно- жильных	три одно- жильных	четыре одно- жильных
2,5	24	20	19	19
4,0	32	28	28	23
6,0	39	36	32	30
10,0	55	50	47	39
16,0	80	60	60	55
25	105	85	80	70
35	130	100	95	85
50	165	140	130	120
70	210	175	165	140
95	255	215	200	175
120	295	245	220	200
150	340	275	255	-

3.16. Расчет сложных электрических цепей

Выше нами были рассмотрены простейшие электрические цепи, состоящие из одного источника тока и нескольких сопротивлений (потребителей электроэнергии). Однако, на практике часто встречаются сложные электрические цепи, состоящие из нескольких источников тока. Для расчетов таких цепей применяются различные методы.

1. Метод суперпозиции (метод наложения). Сущность этого метода заключается в том, что ток в какой-либо ветви с постоянными сопротивлениями является алгебраической суммой токов, создаваемых в этой ветви всеми поочередно действующими источниками тока.

Для примера рассмотрим электрическую цепь, приведенную на рис. 3.8. При действии только первого источника ток в цепи равен:

$$I_1 = \frac{E_1}{r_{01} + R + r_{02}}. \quad (3.37)$$

Направление этого тока совпадает с направлением э.д.с. E_1 . При действии только второго источника ток в цепи равен:

$$I_2 = \frac{E_2}{r_{01} + R + r_{02}}. \quad (3.38)$$

Направление этого тока совпадает с направлением э.д.с. E_2 . Если E_1 и E_2 направлены одинаково, то общий ток цепи будет равен

$$I = I_1 + I_2 = \frac{E_1 + E_2}{r_{01} + R + r_{02}}. \quad (3.39)$$

Если E_1 и E_2 направлены встречно, то общий ток цепи будет равен

$$I = I_1 - I_2 = \frac{E_1 - E_2}{r_{01} + R + r_{02}}. \quad (3.40)$$

Если $E_1 \neq E_2$ и они направлены встречно, то направление общего тока совпадает с направлением большей э.д.с.

2. Метод узловых и контурных уравнений. При этом методе применяются первый и второй законы Кирхгофа. Для расчета должны быть заданы схема, величины всех сопротивлений, э.д.с. и их направления. В результате расчета должны быть найдены токи всех ветвей и их направления.

При составлении уравнений необходимо выполнить следующие условия:

а) число уравнений должно быть равно числу неизвестных токов (числу ветвей);

б) число уравнений, составленных для узлов, должно быть на одно меньше, чем число узлов;

в) остальные уравнения составляются по второму закону Кирхгофа. Для этого надо выбирать простые контуры с наименьшим числом сопротивлений и источников тока. Кроме

того, каждый новый контур должен содержать не менее одной ветви, не входившей в ранее составленные уравнения, что обеспечивает получение независимых уравнений;

г) направления токов берутся произвольно — эти направления будут положительными. Если после составления уравнений и их решения будет получено отрицательное значение для какого-либо из токов, то этот ток в действительности будет проходить в направлении, противоположном выбранному.

Пример. Пользуясь методом узловых и контурных уравнений, определить токи I_1, I_2, I_3 в схеме рис 3.10.1.

Дано: $R_1=4$ Ом, $R_2=6$ Ом,
 $R_3=R_4=R_5=10$ Ом $E_1=50$ В $E_2=10$ В.

Решение. Схема имеет два узла: В и Д. Поэтому составляем одно узловое уравнение для узла В: $I_1+I_3=I_2$. Так как число неизвестных токов равно трем, то составляем еще два контурных уравнения: для контура АВД

$$E_1=I_1 \cdot R_2+I_3 \cdot R_3+I_1 \cdot R_1.$$

Для контура ВСД уравнение имеет вид

$$E_2=I_2 \cdot R_4+I_3 \cdot R_3+I_1 \cdot R_5.$$

Так как $I_3=I_1+I_2$, то:

$$E_1=I_1 \cdot R_2+(I_1+I_2)R_3+I_1 \cdot R_1=I_1(R_1+R_2+R_3)+I_2 \cdot R_3;$$

$$E_2=I_2(R_4+R_5+R_3)+I_1 \cdot R_3.$$

Отсюда:

$$I_1 = \frac{E_2 - I_2(R_3 + R_4 + R_5)}{R_3} = 1 - 3 \cdot I_2.$$

Подставив значение I_1 во второе контурное уравнение, получим

$$E_1=(1-3I_2)(R_1+R_2+R_3)+I_2 \cdot R_3, \text{ откуда } I_2 = -\frac{30}{50} = -0,6 \text{ А.}$$

$$I_1=1-3I_2=1-(3 \cdot -0,6)=1+1,8=2,8 \text{ А;}$$

$$I_3=I_1+I_2=-0,6+2,8=2,2 \text{ А.}$$

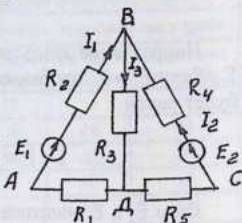


Рис. 3.10.1. для темы 3.15.2.

3. Метод узловых напряжений. Этот метод применяется в схемах с двумя узлами (рис. 3.9). За положительное направление токов примем от узла Б к узлу А. Напряжение между узлами Б и А называется узловым напряжением.

$$U = \varphi_A - \varphi_B, \quad (3.41)$$

где φ_A и φ_B — потенциалы узлов.

Согласно закону Ома ток первой ветви равен

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{R_1} = (E_1 - U)g_1, \quad (3.42)$$

где R_1 и g_1 — сопротивление и проводимость первой ветви.

При этом, внутренние сопротивления источников тока не приняты во внимание. Аналогично токи остальных ветвей равны:

$$I_2 = (E_2 - U)g_2; \quad (3.43)$$

$$I_3 = (0 - U)g_3 = -Ug_3. \quad (3.44)$$

По первому закону Кирхгофа для узла А имеем:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0. \quad (3.45)$$

Подставив в это уравнение значения токов ветвей, получим

$$(E_1 - U)g_1 + (E_2 - U)g_2 + (-U)g_3 = 0. \quad (3.46)$$

Раскрыв скобки, найдем величину узлового напряжения:

$$U = \frac{E_1 \cdot g_1 + E_2 \cdot g_2}{g_1 + g_2 + g_3}. \quad (3.47)$$

$$\text{В общем виде: } U = \frac{\sum E \cdot g}{\sum g}. \quad (3.48)$$

3.17. Химические источники тока

1. Гальванические (первичные) элементы.

В химических источниках тока химическая энергия превращается в электрическую.

1. Солевые марганцево-цинковые элементы (рис. 3.11). Эти элементы изготавливаются двух конструкций: стаканчиковой и галетной. В элементах стаканчиковой конструкции отрицательный (цинковый) электрод является одновременно и сосудом элемента, имеющим прямоугольную или цилинд-

рическую форму. Внутри цинкового стакана расположен соответствующей формы положительный электрод в виде стержня с угольным токоотводом. Активным веществом положительного электрода является двуокись марганца с добавками графита и ацетиленовой сажи. Электролитом служит раствор хлористого аммония с различными добавками.

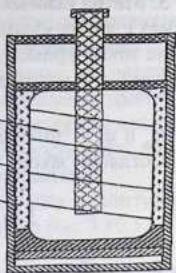


Рис. 3.11. Стаканчиковый марганцево-цинковый элемент:
1-положительный электрод;
2-отрицательный электрод;
3-электролит.

2. Галетные марганцево-цинковые элементы (рис. 3.12). Положительным электродом является прессованная галета из двуокиси марганца, отрицательный электрод — цинковая пластина.

Электроды отделены друг от друга пористой перегородкой, выполненной из бумаги или картона и пропитанной электролитом. Элемент стягивается хлорвиниловым кольцом. Галетные элементы можно соединять последовательно, установив их друг на друга. Э.д.с. марганцево-цинковых элементов примерно равна 1,6 В.

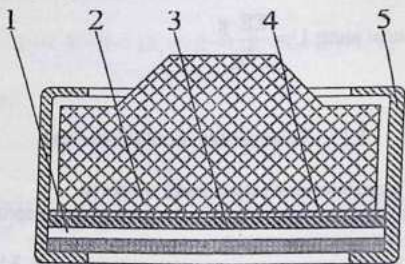


Рис. 3.12. Галетный марганцево-цинковый элемент:
1-отрицательный электрод; 2-положительный электрод;
3-пористая перегородка; 4-бумажная обертка;
5-хлорвиниловое кольцо.

3. Марганцево-цинковые элементы с щелочным электролитом. (рис.3.13). Положительным электродом служит смесь двуокиси марганца с графитом, запрессованная в цилиндрическую стальную форму небольшой высоты. Отрицательным электродом является амальгированный порошкообразный цинк. Между электродами имеется сепарация, состоящая из нескольких слоев высокопористого картона, пропитанного 30%-ным раствором едкого кали, насыщенного цинком. Эти элементы выпускаются 4-х типов МЦ-1К, МЦ-2К, МЦ-3К, МЦ-4К. Их э.д.с. примерно равна 1,5 В.

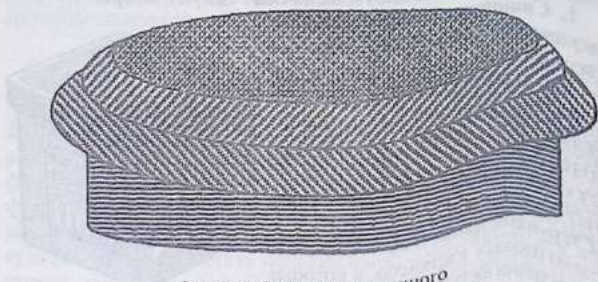


Рис. 3.13. Общий вид щелочного марганцево-цинкового элемента.

4. Ртутно-цинковые элементы (рис. 3.14). Положительным электродом служит смесь красной окиси ртути и графита, запрессо-



Рис. 3.14. Ртутно-цинковый элемент: 1-крышка; 2-отрицательный электрод; 3-корпус; 4-положительный электрод; 5-резиновое кольцо; 6-бумажный сепаратор; 7-бумажная диафрагма.

ванная в стальной никелированный корпус под давлением 2000 кг/см². Отрицательным электродом служит цинковый порошок. В качестве электролита используется щелочной калиевый раствор плотностью 1,4, насыщенный окисью цинка. Электролит в основном заключен в порах электродов и сепараторной бумаги. Э.д.с. ртутно-цинковых элементов 1,36 В.

2. Аккумуляторы (вторичные элементы)

Первичные элементы после разрядки теряют свою работоспособность. Аккумуляторы после перезарядки можно повторно использовать. В настоящее время широко применяются кислотные (свинцовые) и щелочные аккумуляторы.

1. Свинцовые (кислотные) аккумуляторы (рис. 3.15). Электролитом служит 25-30%-ный водной раствор серной кислоты (H_2SO_4). Положительные пластины изготовляются из металлического свинца, для увеличения поверхности соприкосновения с электролитом они имеют ребристую форму. Отрицательные пластины состоят из свинцовых каркасов, в которые впрессована активная масса. Напряжение заряженного аккумулятора равно 2,2 В.



Рис. 3.15. Свинцовый (кислотный) аккумулятор.

Напряжение при разряде быстро уменьшается до 2 В, а затем медленно—до 1,8 В. При дальнейшем уменьшении напряжения аккумулятора разряд нужно прекратить во избежание его повреждения.

Количество электричества, которое можно получить от заряженного аккумулятора называется его емкостью и измеряется в ампер-часах. При постоянном токе разряда $I_p = \text{const}$ емкость аккумулятора определяется по формуле:

$$Q_p = I_p \cdot t_p, \quad (3.49)$$

где t_p — время разряда.

Если ток разряда $I_p \neq \text{const}$, емкость можно определить по формуле:

$$Q_p = \int_0^{t_p} i_p \cdot dt. \quad (3.50)$$

Однако для этого необходим график разряда.

Отношение отданного аккумулятором количества электричества при разряде Q_p к полученному им при заряде называется коэффициентом отдачи:

$$\eta_o = \frac{Q_p}{Q_z} \quad (3.51)$$

Коэффициент отдачи свинцовых аккумуляторов 0,9–0,95. Отношение энергии W_p , полученной от аккумулятора при разряде, к затраченной при заряде W_z , называется коэффициентом полезного действия:

$$\eta = \frac{W_p}{W_z} \quad (3.52)$$

КПД свинцового аккумулятора равен 0,75–0,8. При неправильной эксплуатации аккумулятора может наступить сульфитация пластин: они покрываются белым налетом сульфата цинка ($PbSO_4$). Это увеличивает внутреннее сопротивление аккумулятора и он может выйти из строя. Причиной сульфитации может стать неправильное соединение их при заряде, неполная заряженность, хранение незаряженного аккумулятора, уменьшение уровня электролита.

Аккумулятор без электролита можно хранить в незаряженном состоянии. Аккумулятор, заполненный электролитом, нужно хранить только в заряженном состоянии. Однако, при этом один раз в месяц необходимо заряжать аккумулятор. При понижении температуры работоспособность аккумулятора снижается. Причиной этого является замедление диффузии.

2. Щелочные аккумуляторы (рис. 3.16). Электролитом в этих аккумуляторах служит 21%-ный водный раствор едкого кали (KOH) или едкого натра (NaOH). Аккумулятор состоит из двух блоков пластин, погруженных в стальной сосуд с электролитом. Электроды аккумуляторов представляют собой стальные рамки с вставленными в них полосками прямоугольными коробочками из перфорированной стальной массы. У кадмий-никелевых элементов активная масса отрицательных пластин состоит из губчатого кадмия, а у железо-никелевых — из губчатого железа. В обоих типах аккумуля-

муляторов активная масса положительных пластин состоит из гидрата окиси никеля $\text{Ni}(\text{OH})$. Напряжение аккумулятора примерно равно 1,25 В. Внутреннее сопротивление щелочных аккумуляторов больше чем у свинцовых и поэтому их КПД составляет 0,5–0,6. Они не очень чувствительны к коротким замыканиям, работоспособны при низких температурах и имеют большой срок службы (до 20 лет).

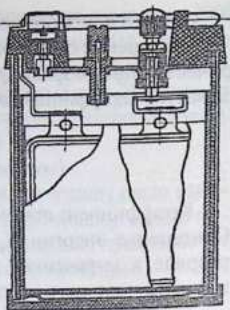


Рис. 3.16. Щелочной аккумулятор.

3. **Серебряно-цинковые аккумуляторы.** Электролитом служит водный раствор едкого кали плотностью 1,4. Положительным электродом служит окись серебра Ag_2O , отрицательным — цинк Zn . Электроды изготовлены в виде пористых пластин.

Серебряно-цинковые аккумуляторы обладают рядом положительных свойств:

1. Большой удельной емкостью и мощностью. Например, удельная мощность свинцовых аккумуляторов равна 2,5 Вт/кг, а у серебряно-цинковых — (10–15) Вт/кг.

2. В процессе работы напряжение не изменяется.

3. Можно получить кратковременно большой ток. Например, аккумулятор весом 4,5 кг допускает разрядный ток до 1500 А.

4. У них высокий КПД $\eta=0,85$ и ничтожный саморазряд.

Недостатками этих аккумуляторов являются высокая стоимость, малый срок службы и плохая работоспособность при низких температурах.

Задачи

Задача 3.1. Диаметр медного провода $d=0,3$ мм, сопротивление $R=82$ Ома. Определить длину проволоки.

Решение: Сечение провода равно:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14(0,3)^2}{4} = 0,0706 \text{ мм}^2.$$

Длину провода найдем из формулы

$$R = \rho \frac{l}{S};$$

$$l = \frac{R \cdot S}{\rho} = \frac{82 \cdot 0,0706}{0,0175} = 330 \text{ м},$$

где $\rho = 0,0175$ — удельное сопротивление меди.

Задача 3.2. Сопротивление провода из манганина при температуре $T_1 = 20^\circ\text{C}$ равно $R_1 = 500$ Ом, при $T_2 = 280^\circ\text{C}$ $R_2 = 500,8$ Ом. Определить температурный коэффициент манганина.

Решение: Из формулы 3.3. найдем выражение температурного коэффициента:

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{(T_2 - T_1) R_1} = \frac{500,8 - 500}{(280 - 20) \cdot 500} = \frac{0,8}{260 \cdot 500} = 0,000006.$$

Задача 3.3. Ток короткого замыкания источника $I_k = 48$ А.

Если к нему подключить резистор $R = 19,5$ Ом, то ток уменьшается до 1,2 А. Определить э.д.с. и внутреннее сопротивление источника

Решение: Э.д.с. короткозамкнутого источника равна

$$E = I \cdot r_0 = 48 \cdot r_0.$$

При подключении резистора $R = 19,5$ Ом

$$E = I \cdot r_0 + I \cdot R = 1,2 \cdot r_0 + 1,2 \cdot 19,5.$$

Правые части обеих формул равны друг другу:

$$48 \cdot r_0 = 1,2 \cdot r_0 + 1,2 \cdot 19,5;$$

$$46,8 \cdot r_0 = 23,4;$$

$$r_0 = 0,5 \text{ Ом}.$$

Э.д.с. источника равна

$$E = 48 \cdot r_0 = 48 \cdot 0,5 = 24 \text{ В}.$$

Задача 3.4. Внутреннее сопротивление источника э.д.с. равно $r_0 = 0,1$ Ом. Через потребитель, присоединенный к нему, ток равен $I = 0,75$ А, и за один час выделяется 729 кал. тепла. Определить э.д.с. источника.

Решение: Пользуясь формулой 3.13, найдем сопротивление потребителя:

$$R = \frac{Q}{0,24 \cdot I^2 \cdot t} = \frac{729}{0,24(0,75)^2 \cdot 3600} = 1,5 \text{ Ом.}$$

Пользуясь законом Ома для полной цепи, находим э.д.с.
 $E = I \cdot r_0 + I \cdot R = 0,75 \cdot 0,1 + 0,75 \cdot 1,5 = 1,875 \text{ В.}$

Задача 3.5. Э.д.с. источника постоянного тока $E = 125 \text{ В}$. К нему последовательно подсоединены $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 30 \text{ Ом}$, $R_3 = 120 \text{ Ом}$. Определить ток цепи, падения напряжения на резисторах и мощность.

Решение: Общее сопротивление цепи равно:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 100 + 30 + 120 = 250 \text{ Ом.}$$

Величина тока на всех резисторах одинакова и равна:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{125}{250} = 0,5 \text{ А.}$$

Падение напряжения на резисторах и мощность равны:

$$U_1 = I \cdot R_1 = 0,5 \cdot 100 = 50 \text{ В; } U_2 = I \cdot R_2 = 0,5 \cdot 30 = 15 \text{ В;}$$

$$U_3 = I \cdot R_3 = 0,5 \cdot 120 = 60 \text{ В;}$$

$$P_1 = I \cdot U_1 = 0,5 \cdot 50 = 25 \text{ Вт; } P_2 = I \cdot U_2 = 0,5 \cdot 15 = 7,5 \text{ Вт;}$$

$$P_3 = I \cdot U_3 = 0,5 \cdot 60 = 30 \text{ Вт.}$$

Задача 3.6. (рис. 3.17). В линию с линейным напряжением $U = 220 \text{ В}$ подключены двигатель постоянного тока мощностью $P_1 = 4,4 \text{ кВт}$ и осветительная лампа мощностью $P_2 = 300 \text{ Вт}$. Определить ток линии и общее сопротивление потребителей.

Решение: Ток двигателя равен:

$$I_1 = \frac{P_1}{U} = \frac{4400}{220} = 20 \text{ А.}$$

Ток лампы равен

$$I_2 = \frac{P_2}{U} = \frac{300}{220} = 1,36 \text{ А.}$$

На основании первого закона Кирхгофа находим ток линии:

$$I = I_1 + I_2 = 20 + 1,36 = 21,36 \text{ А.}$$

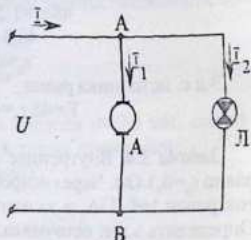


Рис. 3.17. Рисунок к задаче 3.6.

Сопротивления потребителей равны

$$R_1 = \frac{U}{I_1} = \frac{220}{20} = 11 \text{ Ом}; \quad R_2 = \frac{U}{I_2} = \frac{220}{1,36} = 161 \text{ Ом}.$$

Общая проводимость равна:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{11} + \frac{1}{161,7} = \frac{172,7}{1778,7} \text{ Ом}^{-1}.$$

Общее сопротивление равно:

$$R = \frac{1778,7}{172,7} = 10,3 \text{ Ом}.$$

Задача 3.7. Длина двухпроводной медной линии равна $l=1200$ м, ток $I=15$ А, диаметр провода $d=5$ мм, мощность $P=3$ кВт. Определить мощность потребителя, мощность потери в линии и КПД линии.

Решение:

$$\text{Сечение провода линии: } S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 5^2}{4}.$$

Сопротивление линии равно:

$$R_{\text{л}} = \rho \cdot \frac{2l}{S} = 0,0175 \cdot \frac{2 \cdot 1200 \cdot 4}{3,14 \cdot 5^2} = 2,08 \text{ Ом}.$$

Потеря напряжения в линии равно $\Delta U = I \cdot R_{\text{л}} = 15 \cdot 2,08 = 31,2$ В.

Мощность потерь в линии равны: $\Delta P = \Delta U \cdot I = 31,2 \cdot 15 = 468$ Вт.

Мощность потребителя: $P_2 = P - \Delta P = 3000 - 468 = 2532$ Вт.

КПД линии

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{2532}{3000} \cdot 100\% = 84,4\%.$$

Задача 3.8. (рис. 3.18). В заданной схеме $E_1=250$ В, $E_2=220$ В, $R_1=5$ Ом, $R_2=8$ Ом, $R_3=10$ Ом, $r_{01}=0,02$ Ом, $r_{02}=0,02$ Ом. Определить токи цепи.

Решение: 1. Выберем положительные направления токов.

2. В этой цепи два узла. Согласно первому закону Кирхгофа применим уравнение для узла С:

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

3. На основании второго закона Кирхгофа составим уравнения для контуров ABCLA и LCDKL:

$$E_1 - E_2 = I_1(R_1 + r_{01}) - I_2(R_2 + r_{02});$$

$$E_2 = I_2(R_2 + r_{02}) + I_3 \cdot R_3.$$

4. Подставив в уравнения заданные значения, получим:

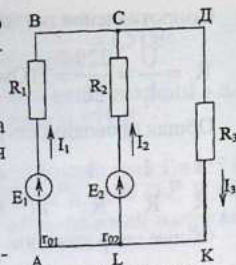


Рис. 3.18. Рисунок к задаче 3.8.

$$\left. \begin{aligned} I_1 + I_2 - I_3 &= 0 \\ 250 - 220 &= I_1 \cdot 5,02 - I_2 \cdot 8,02 \\ 220 &= I_2 \cdot 8,02 + I_3 \cdot 10 \end{aligned} \right\}$$

или

$$\left. \begin{aligned} I_1 + I_2 - I_3 &= 0 \\ 30 &= I_1 \cdot 5,02 - I_2 \cdot 8,02 \\ 220 &= I_2 \cdot 8,02 + I_3 \cdot 10 \end{aligned} \right\}$$

Из третьего уравнения

$$I_3 = \frac{220 - I_2 \cdot 8,02}{10}.$$

Из второго уравнения

$$I_1 = \frac{30 + I_2 \cdot 8,02}{5,02}.$$

Подставив I_1 и I_2 в первое уравнение, получим

$$\frac{30 + I_2 \cdot 8,02}{5,02} + I_2 - \frac{220 - I_2 \cdot 8,02}{10} = 0. \text{ Отсюда } I_2 = 4,7 \text{ A;}$$

$$I_3 = \frac{220 - 4,7 \cdot 8,02}{10} = 18,23 \text{ A; } I_1 = \frac{30 + 4,7 \cdot 8,02}{5,02} = 13,56 \text{ A.}$$

Следовательно, токи положительны. Источники E_1 и E_2 работают в режиме генераторов.

Задача 3.9. В схеме, приведенной на рис. 3.9, $E_1=120$ В, $E_2=110$ В, $R_3=4$ Ом, $R_1=2$ Ом, $R_2=2$ Ом. Определить токи.

Решение: Узловое напряжение равно

$$U = \frac{E_1 \cdot g_1 + E_2 g_2}{g_1 + g_2 + g_3} = \frac{120 \cdot \frac{1}{2} + 110 \cdot \frac{1}{2}}{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4}} = 92 \text{ В.}$$

Токи ветвей равны:

$$I_1 = (E_1 - U) \cdot g_1 = (120 - 92) \cdot \frac{1}{2} = 14 \text{ А.}$$

$$I_2 = (E_2 - U) \cdot g_2 = (110 - 92) \cdot \frac{1}{2} = 9 \text{ А.}$$

$$I_3 = -Ug_3 = -92 \cdot \frac{1}{4} = -23 \text{ А.}$$

Проверка:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0;$$

$$14 + 9 - 23 = 0.$$

ГЛАВА 4

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ПО ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ

4.1. Получение синусоидального переменного тока

Переменный ток — это периодическая величина, повторяющая свои значения и направление за время, называемое периодом. В технике применяется переменный ток, изменяющийся по закону синуса. На рис. 4.1. показана упрощенная схема генератора переменного тока. Между полюсами статора установлен цилиндрический якорь с обмоткой на его поверхности. Магнитные линии в воздушном промежутке между статором и ротором направлены радиально к якорю. Магнитным полюсам придана такая форма, что магнитная индукция в воздушном промежутке изменяется по закону синуса.

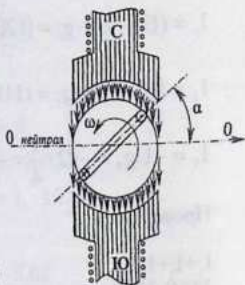


Рис. 4.1. Устройство простейшего генератора переменного тока.

$$B = B_m \cdot \sin \alpha \quad (4.1)$$

где B_m — максимальная магнитная индукция в центре полюса; α — угол между плоскостью OO , проходящей через ось якоря и плоскостью, проходящей через ось якоря и любую точку поверхности якоря.

При вращении якоря с постоянной скоростью $\omega = \alpha/t$ на активной стороне каждого витка якоря создается э.д.с.

$$e' = B \cdot l \cdot V = B_m \cdot l \cdot V \cdot \sin \alpha = B_m \cdot l \cdot V \cdot \sin \omega t \quad (4.2)$$

где l — длина якоря, м; V — линейная скорость якоря, м/с.

Активные стороны витка якоря соединены между собой последовательно и поэтому э.д.с. витка равна:

$$e = 2 \cdot e' = 2B_m \cdot l \cdot V \cdot \sin \omega t. \quad (4.3)$$

Если обмотка якоря состоит из ω витков, то э.д.с. якоря

$$e = 2 \cdot B_m \cdot l \cdot V \cdot \omega \cdot \sin \omega t. \quad (4.4)$$

При $\sin \omega t = 1$ э.д.с. будет максимальна

$$E_m = 2B_m \cdot l \cdot \omega \cdot V. \quad (4.5)$$

Таким образом, в каждый данный момент времени э.д.с. якоря равна:

$$e = E_m \cdot \sin \omega t. \quad (4.6)$$

4.2. Параметры синусоидального переменного тока

На рис 4.2 показан график синусоидального переменного тока, который имеет следующие основные параметры:

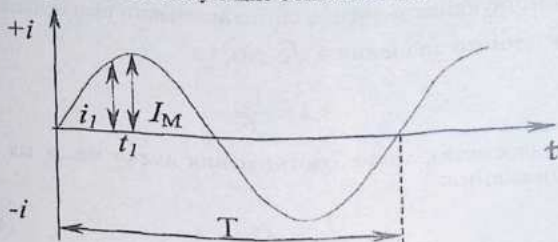


Рис. 4.2. График синусоидальной э.д.с.

1. Время одного полного колебания переменного тока называется периодом (T).

Число периодов в секунду называется частотой:

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{Герц (Гц)}, \quad (4.7)$$

где f — частота, Гц; T — период, с.

3. Значение переменной величины в любой момент времени называется мгновенным значением.

4. Самое большое значение переменной величины — половину периода называется амплитудным или максимальным значением.

5. Стрелочные электроизмерительные приборы из-за своей инерционности не могут измерять мгновенное или максимальное значения. Измеряемая ими величина называется действующим или эффективным значением переменной величины. Действующее значение переменного тока

равно значению такого эквивалентного постоянного тока, который, проходя через то же сопротивление, что и переменный ток, выделяет в нем за период то же количество тепла.

Мгновенное, максимальное и действующее значения переменных величин обозначаются:

– мгновенные значения – малыми буквами, например, i -ток, u -напряжения, e -э.д.с.;

– действующие значения – большими буквами, например, I -ток, U -напряжения, E -э.д.с.;

– максимальные значения обозначаются большими буквами с индексом «М», например, I_M -ток, U_M -напряжения, E_M -э.д.с.

Действующее значение синусоидального тока меньше его амплитудного значения в $\sqrt{2}$ раз, т.е.

$$I = \frac{I_M}{\sqrt{2}}.$$

Аналогично, такие соотношения имеют место для эдс и напряжения:

$$U = \frac{U_M}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot U_M; \quad (4.8)$$

$$E = \frac{E_M}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot E_M \quad (4.9)$$

6. Угловая частота. В двухполюсном генераторе (число пар полюсов $p=1$) одному обороту якоря соответствует один период э.д.с. При равномерном вращении якоря его угловая скорость будет равна:

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T} = \frac{1}{T} \cdot 2\pi = 2\pi f \text{ сек}^{-1}. \quad (4.10)$$

Если генератор имеет p пар полюсов, то один оборот якоря будет соответствовать p периодам и его угловая скорость составит:

$$\omega = \frac{p \cdot \alpha}{t} = \frac{p \cdot 2\pi}{p \cdot T} = \frac{1}{T} \cdot 2\pi = 2\pi f \text{ сек}^{-1}. \quad (4.11)$$

где $p \cdot \alpha$ – электрический угол;

$\omega = 2\pi f$ – угловая скорость или угловая частота.

На рис. 4.3. показан график переменного тока генератора с двумя парами полюсов. Если скорость вращения якоря равна n , то в секунду он сделает $n/60$ оборотов. При этом частота э.д.с. генератора с p парой полюсов будет равна:

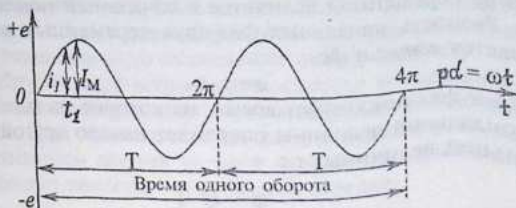


Рис. 4.3. График переменной э.д.с. генератора переменного тока с двумя парами полюсов.

$$f = \frac{n}{60} p \text{ Гц.}$$

(4.12)

7. Фаза, начальная фаза, сдвиг фаз.

Все витки обмотки якоря вращаются с одинаковой скоростью. Поэтому амплитуда и частота их э.д.с. будут одинаковы. Но так как на поверхности якоря витки установлены в разных местах, то создаваемых в них э.д.с. в данный момент времени будут различными. На показанных в рис. 4.4. дв

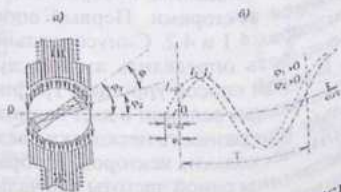


Рис. 4.4. Сдвиг фаз и начальная фаза переменного тока.

$e_1 = E_m \sin(\omega t + \varphi_1)$ и $e_2 = E_m \sin(\omega t + \varphi_2)$,
где $(\omega t + \varphi_1)$ и $(\omega t + \varphi_2)$ — фазные углы или фазы.

В начальный момент времени э.д.с. витков равны:

$$e_1 = E_m \cdot \sin \varphi_1, \text{ и } e_2 = E_m \cdot \sin \varphi_2, \quad (4.13)$$

где φ_1 и φ_2 — начальные фазы — это углы, определяющие значение переменной величины в начальный момент времени. Разность начальных фаз двух переменных величин называется *сдвигом фаз*.

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (4.14)$$

Сдвиг фаз показывает время, на которое начало одной синусоидальной величины опережает начало другой синусоидальной величины, т.е.

$$t = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{\varphi \cdot T}{2\pi}. \quad (4.15)$$

Если синусоидальная величина, пройдя через ноль, становится положительной, то этот момент считается началом периода. Та величина, у которой начало периода или положительная амплитуда достигаются раньше, чем у другой считается опережающей по фазе. Та величина, у которой те же значения достигаются позже считается отстающей по фазе.

Две синусоидальные величины с одинаковыми начальными фазами совпадают по фазе. Две синусоидальные величины, угол сдвига фаз которых равен 180° изменяются в противофазе.

4.3. Векторная диаграмма

Синусоидальные величины изображают синусоидами или вращающимися векторами. Первый способ был рассмотрен в параграфах 4.1 и 4.2. Синусоидальное изображение дает возможность определить амплитуду, начальную фазу и период. Второй способ упрощает графическое изображение синусоидальных величин и дает возможность найти графически сумму или разность нескольких величин. Совокупность двух или нескольких векторов, изображающих синусоидальные величины одной частоты в начальный момент времени для данной цепи называется векторной диаграммой. Векторная диаграмма наглядно показывает действующие значения электрических величин цепи, их начальные фазы, сдвиг фаз между ними. Следовательно, при вращении векторов их взаимное положение не изменяется.

Порядок построения векторной диаграммы:

1. Вначале в масштабе в любом направлении откладывается самый общий параметр цепи. Например, для цепи, в которой элементы соединены последовательно общим параметром является ток. Если элементы цепи соединены параллельно, то общим параметром будет напряжение. В других цепях первым можно откладывать любой параметр.

2. Другие параметры откладываются в масштабе в направлении с учетом сдвига фаз между ним и общим параметром. При этом начальная фаза опережающего вектора откладывается против часовой стрелки, а начальная фаза отстающего вектора — по часовой стрелке.

4.4. Сложение и вычитание векторных величин

1. Если синусоидальные величины изображены на векторной диаграмме, то их сложение и вычитание производится по правилу параллелограмма (рис. 4.5 и 4.6).

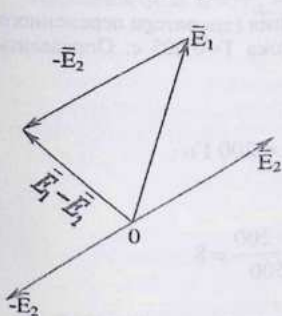


Рис. 4.5. Вычитание векторов.

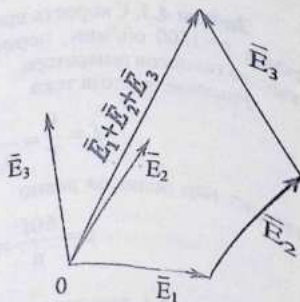


Рис. 4.6. Сложение векторов.

2. Если синусоидальные величины изображены при помощи синусоид, то для их сложения или вычитания необходимо складывать или вычитать их ординаты.

Задачи

Задача 4.1. На воздушных аппаратах применяется переменный ток частотой $f=400$ Гц. Определить период этого тока.

Решение:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{400} = 0,0025 \text{ сек.}$$

Задача 4.2. Угловая частота переменного тока равна $\omega=3140$ сек⁻¹. Определить период и частоту.

Решение: $\omega=2\pi f$, отсюда

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{3140}{2 \cdot 3,14} = 500 \text{ Гц}$$

Период равен:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{500} = 0,002 \text{ сек.}$$

Задача 4.3. Скорость вращения генератора переменного тока $n=1500$ об/мин, период тока $T=0,005$ с. Определить число полюсов генератора

Решение: частота тока

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,005} = 200 \text{ Гц;}$$

исло пар полюсов равно

$$p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 200}{1500} = 8.$$

Задача 4.4. Амплитуда напряжения равна $U_m=120$ В. Начальная фаза $\varphi = \pi/4$. Определить действующее значение напряжения и написать формулу мгновенного значения. Решение: действующее значение:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{120}{0,707} = 85 \text{ В.}$$

Формула мгновенного значения имеет вид:

$$u = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) = 120 \sin(\omega t + 45^\circ).$$

Задача 4.5. Мгновенные значения э.д.с. $e = 8,45 \sin(1256t + \pi/4)$.
Определить амплитуду и действующее значение э.д.с., период и начальную фазу.

Решение: Общая формула мгновенного значения эдс имеет вид:

$$e = E_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

Поэтому

$$E_m = 8,45 \text{ В}; \quad E = \frac{8,45}{\sqrt{2}} = 6 \text{ В};$$

угловая частота $\omega = 1256 \text{ сек}^{-1} = 2\pi f$. Отсюда

$$f = \frac{\omega}{2\pi}; \quad T = \frac{1}{f} = \frac{1}{\omega/2\pi} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{6,28}{1256} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

Начальная фаза $\varphi = \pi/4 = 45^\circ$.

ГЛАВА 5

ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

5.1. Введение

Любая электрическая цепь может состоять из активно-го сопротивления R , индуктивности L и емкости C . В цепях постоянного тока при неизменном напряжении ток, мощность, энергия электрического и магнитного полей также не изменяются. Если напряжение изменяется, то ток, энергия электрического и магнитного полей, мощность будут также изменяться. В технике встречаются цепи, в которых преобладает один из параметров (R , L или C), тогда как другие выявлены слабо и их влиянием можно пренебречь.

Например, цепь с нагревательным прибором, осветительной лампочкой можно считать как сопротивление, так как их емкостью и индуктивностью из-за их малого значения можно пренебречь. Цепь ненагруженного трансформатора можно рассматривать как индуктивность, а кабель, работающий без нагрузки — как емкость.

5.2. Цепь с активным сопротивлением (рис. 5.1.)

Мгновенное значение напряжения цепи:

$$u = U_m \cdot \sin \omega t \quad (5.1)$$

Согласно закону Ома мгновенное значение тока:

$$i = \frac{U}{R} = \frac{U_m \cdot \sin \omega t}{R} = I_m \cdot \sin \omega t, \quad (5.2)$$

где $I_m = \frac{U_m}{R}$ — амплитудное значение тока.

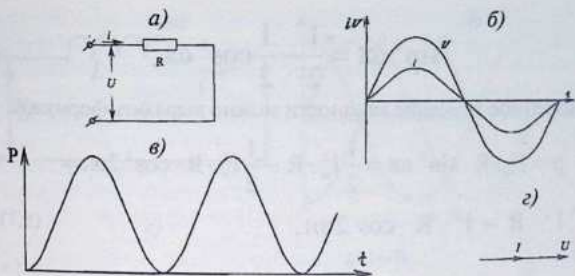


Рис. 5.1. Цепь с активным сопротивлением:
а) схема; б) графики токов и напряжений;
в) график мощности; г) векторная диаграмма.

Действующие значения тока и напряжения

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \sin \omega t; \quad (5.3)$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \sin \omega t. \quad (5.4)$$

Следовательно, закон Ома действителен и для действующих значений:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (5.5)$$

Так как ток и напряжение изменяются пропорционального $\sin \omega t$ (см. формулы 5.1 и 5.2), то сдвиг фаз между ними будет равен нулю (рис. 5.1 б, г)

Мгновенное значение мощности равно

$$p = i \cdot u = i^2 \cdot R = I_m^2 \cdot R \cdot \sin^2 \omega t. \quad (5.6)$$

Согласно этой формуле мощность пропорциональна квадрату тока. Отсюда следует, что мощность всегда положительна, что означает то, что на активном сопротивлении электрическая энергия полностью преобразуется в тепло (рис. 5.1. в).

Принимая во внимание то, что

$$\sin^2 \omega t = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos^2 \omega t,$$

мгновенное значение мощности можно выразить формулой

$$p = I_m^2 \cdot R \cdot \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} I_m^2 \cdot R - \frac{1}{2} I_m^2 \cdot R \cdot \cos^2 2\omega t = \\ I^2 \cdot R - I^2 \cdot R \cdot \cos 2\omega t, \quad (5.7)$$

где

$$\frac{1}{2} I_m^2 = \left(\frac{I_m}{\sqrt{2}} \right)^2 = I^2.$$

Постоянная составляющая $I^2 \cdot R$ определит среднее значение мощности за период и называется активной мощностью

$$P = I^2 \cdot R = I \cdot U. \quad (5.8)$$

5.3. Цепь с индуктивностью (рис. 5.2)

Под действием синусоидального напряжения в цепи проходит синусоидальный ток

$$i = I_m \cdot \sin \omega t.$$

В результате на индуктивности возникает переменное магнитное поле и э.д.с. самоиндукции:

$$e_L = -L \frac{di}{dt}. \quad (5.9)$$

Так как индуктивность считаем идеальной, то активное сопротивление ее $R=0$. Поэтому все приложенное к цепи напряжение будет израсходовано на преодоление э.д.с. самоиндукции. Кроме того, согласно второму закону Кирхгофа имеем:

$$U + e_L = 0, \text{ откуда}$$

$$U = -e_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_m \cdot \sin \omega t)}{dt} = L \cdot I_m \cdot \omega \cdot \cos \omega t = \\ = L \cdot I_m \cdot \omega \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_m \cdot \sin(\omega t + \pi/2). \quad (5.10)$$

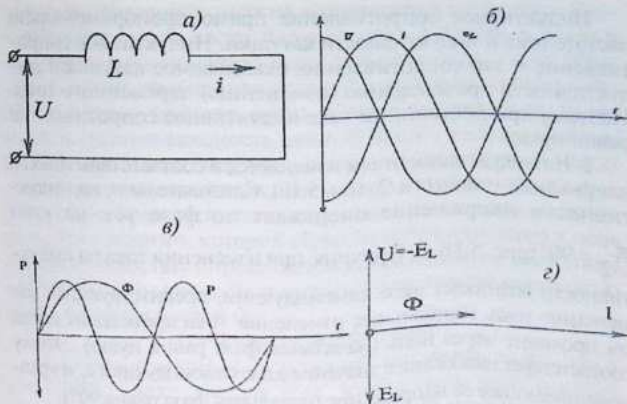


Рис. 5.2. Цепь с индуктивностью: а) схема; б) график тока напряжения и эдс; в) график мощности; г) векторная диаграмма.

Из последнего выражения следуют следующие выводы:

$$1) \quad U_m = I_m \cdot L \cdot \omega. \quad (5.11)$$

Для действующих значений также имеем

$$U = I \cdot L \cdot \omega. \quad (5.12)$$

откуда значение тока будет равно

$$I = \frac{U}{L \cdot \omega} = \frac{U}{2\pi f \cdot L}, \quad (5.13)$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота.

Выражение $L \cdot \omega = 2\pi f \cdot L = X_L$ называется индуктивным сопротивлением или реактивным сопротивлением катушки. Индуктивное сопротивление также измеряется в омах, так как

$$X_L = \omega L = \frac{1}{\text{сек}} \cdot \text{ом} \cdot \text{сек} = \text{ом}.$$

Индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте тока и индуктивности катушки. Индуктивное сопротивление — это сопротивление, оказываемое катушкой индуктивности прохождению (изменению) переменного тока. Поэтому при постоянном токе индуктивное сопротивление равно нулю.

2. На индуктивности ток изменяется в соответствии $\sin \omega t$, а напряжение — $\sin(\omega t + \pi/2)$ (см. 5.10). Следовательно, на индуктивности напряжение опережает по фазе ток на угол

$\pi/2 = 90^\circ$ (рис. 5.2 б, г). Причина: при изменении тока на индуктивности возникает э.д.с. самоиндукции, препятствующая изменению тока. Наибольшее изменение тока происходит когда он проходит через ноль (начальная фаза равна нулю). Этому соответствует наибольшее значение э.д.с. самоиндукции e_L и уравновешивающее ее напряжение (начальная фаза равна 90°).

Закон Ома в цепи с индуктивностью применим только для действующих и амплитудных значений тока и напряжения и не может применяться для мгновенных их значений, так как $i \neq u/X_L$.

В цепи с индуктивностью мгновенное значение мощности:

$$\begin{aligned} p &= i \cdot u = I_m \cdot \sin \omega t \cdot U_m \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= I_m \cdot U_m \cdot \sin \omega t \cdot \cos \omega t = I \cdot U \cdot \sin 2\omega t, \end{aligned} \quad (5.14)$$

где $\sin 2\omega t = 2 \sin \omega t \cdot \cos \omega t$, $U_m = \sqrt{2} U$, $I_m = \sqrt{2} \cdot I$.

Следовательно, в цепи с индуктивностью мощность изменяется с двойной частотой (рис. 5.2 в).

В течение первой и третьей частей периода на индуктивности энергия магнитного поля увеличивается от нуля до максимального значения:

$$W_m = \frac{L I_m^2}{2} = L \cdot I^2 \text{ Дж.} \quad (5.15)$$

Эта энергия берется от генератора. Следовательно, в эти части периода цепь работает в режиме потребителя и ее мощность будет положительной.

Во вторую и четвертую части периода энергия магнитного поля уменьшается от максимального значения до нуля,

при этом запасенная энергия возвращается генератору. Следовательно, в эти части периода цепь работает в режиме генератора и его мощность будет отрицательной. Таким образом, энергия, полученная цепью с индуктивностью за каждую половину периода, равна нулю. Следовательно, равна нулю и средняя мощность цепи. В цепи с индуктивностью происходит только периодический обмен энергией между генератором и магнитным полем цепи. Электрическая энергия не преобразуется в тепловую или другие виды энергии. Величина энергии, которой обмениваются генератор и цепь с индуктивностью определяется максимальным значением мощности. Эта мощность называется реактивной мощностью и обозначается буквой Q .

$$Q_L = U \cdot I = I^2 \cdot L = \omega \cdot W_m \text{ (Var)}.$$

Единица измерения реактивной мощности та же, что и активной — ватт. Но для того, чтобы было ясно о какой мощности идет речь, единицу реактивной мощности называют вар-вольт-ампер реактивный.

5.4. Поверхностный эффект

Оказывается сопротивление проводника переменному току, называемое активным сопротивлением, больше сопротивления того же проводника постоянному току. Причиной этого является различная плотность переменного тока по сечению проводника. На поверхности проводника плотность тока будет больше, чем при постоянном токе, а в центре меньше. При высоких частотах плотность тока в центре практически равна нулю, и ток проходит только в поверхностном слое, толщина которого уменьшается с повышением частоты. Поэтому это явление называется поверхностным эффектом (рис. 5.3).

Для объяснения поверхностного эффекта представим, что цилиндрический проводник состоит из большого числа элементарных проводников одинакового сечения, распо-

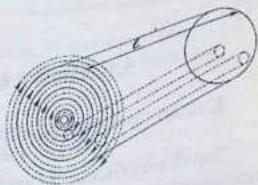


Рис. 5.3. Магнитное поле цилиндрического проводника.

ложенных плотными concentрическими слоями. Переменный ток вокруг каждого такого проводника создаёт магнитное поле. Элементарные проводники, расположенные в центре или близко к нему, сцепляются с наибольшим магнитным потоком. Поэтому их индуктивность и индуктивное сопротивление будут больше, чем у проводников, расположенных в поверхностном слое. Это ведет к тому, что плотность тока уменьшается от периферии к оси проводника. Эта разница возрастает с увеличением диаметра проводника, его проводимости, магнитной проницаемости и частоты тока. Коэффициент поверхностного эффекта определяется формулой:

$$\epsilon = \frac{R}{R_0}, \quad (5.17)$$

где R — активное сопротивление проводника;

R_0 — сопротивление проводника постоянному току.

На рис 5.4 показан график зависимости коэффициента поверхностного эффекта от коэффициента

$$\alpha = d \sqrt{g \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot f},$$

где: g — проводимость материала; $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная постоянная; d — диаметр провода; f — частота тока.

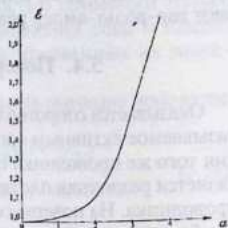


Рис. 5.4. График определения коэффициента поверхностного эффекта.

5.5. Цепь с емкостью (рис. 5.5)

К цепи приложим напряжение

$$U = U_m \cdot \sin \omega t. \quad (5.18)$$

Заряд на обкладках конденсатора будет изменяться пропорционально напряжению:

$$q = C \cdot u = C \cdot U_m \cdot \sin \omega t. \quad (5.19)$$

Ток конденсатора изменяется пропорционально скорости изменения заряда:

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(C \cdot U_m \cdot \sin \alpha t)}{dt} = C \cdot U_m \cdot \omega \cdot \cos \alpha t = I_m \cdot \sin\left(\alpha t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (5.20)$$

Из этого выражения можно сделать следующие выводы:

1. Ток на конденсаторе изменяется по закону $\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$,

а напряжение — $\sin \omega t$. Следовательно на конденсаторе ток по фазе опережает напряжение на угол $\frac{\pi}{2} = 90^\circ$. Причина: чтобы установить напряжение между обкладками конденсатора надо его зарядить, а чтобы зарядить, надо пропустить ток. Наибольшее изменение напряжения происходит, когда он проходит через ноль (начальная фаза равна нулю). Этому соответствует наибольший ток (рис 5.5. б, г).

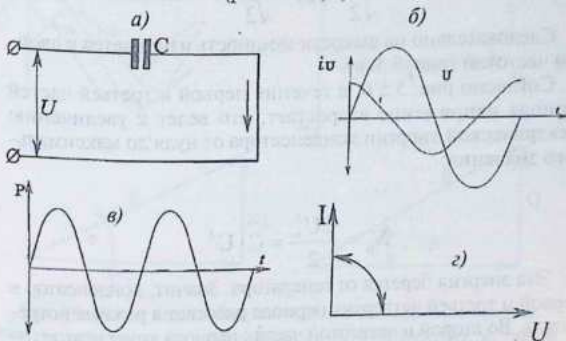


Рис. 5.5. Емкостная цепь: а) схема; б) графики тока и напряжения; в) график мощности; г) векторная диаграмма.

2. Амплитудное значение тока:

$$I_m = C \cdot \omega \cdot U_m, \quad (5.21)$$

Действующее значение

$$I = C \cdot \omega \cdot U = \frac{U}{1/C \cdot \omega} = \frac{U}{X_c}. \quad (5.22)$$

ложе
ток
Эле
к не
этом
боле
слое
пере
чени
проп
эфф

Эта формула выражает закон Ома для емкостной цепи.

$$\text{Величина } X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \text{ (Ом)}$$

называется реактивным сопротивлением конденсатора или емкостным сопротивлением.

Мгновенное значение мощности:

$$\begin{aligned} p &= i \cdot u = I_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \cdot U_m \cdot \sin \omega t = I_m \cdot \cos \omega t \cdot U_m \cdot \sin \omega t = \\ &= \frac{I_m \cdot U_m}{2} \cdot \sin 2\omega t = I \cdot U \cdot \sin 2\omega t, \end{aligned} \quad (5.24)$$

так как действующие значения тока и напряжения:

где I
I
I

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (5.25)$$

Следовательно на емкости мощность изменяется с двойной частотой (рис. 5.5. в).

завис
верхи
фиши

Согласно рис. 5.5 б, в течение первой и третьей частей периода напряжение возрастает, что ведет к увеличению электрической энергии конденсатора от нуля до максимального значения:

где: g
ла; μ²
янна
часто

$$W = \frac{CU_m^2}{2} = C \cdot U^2.$$

Эта энергия берется от генератора. Значит, конденсатор в первой и третьей четвертях периода работает в режиме потребителя. Во второй и четвертой частях периода конденсатор отдает накопленную энергию. Значит во второй и четвертой частях периода конденсатор работает в режиме генератора. В течение половины периода энергия конденсатора равна нулю.

В этой цепи также происходит только периодический обмен энергии между генератором и конденсатором без превращения ее в тепловую или другую энергию. Величина энергии, которой обмениваются генератор и конденсатор определяется максимальным значением мощности этой цепи:

Тс

ти изм

$$Q_c = U \cdot I = C\omega U^2 = W_c \cdot \omega \text{ вар.}$$

5.6. Цепь с индуктивностью и активным сопротивлением

На схеме рис. 5.6 L — индуктивность катушки, R — активное сопротивление катушки. Через катушку проходит ток, мгновенное значение которого равно:

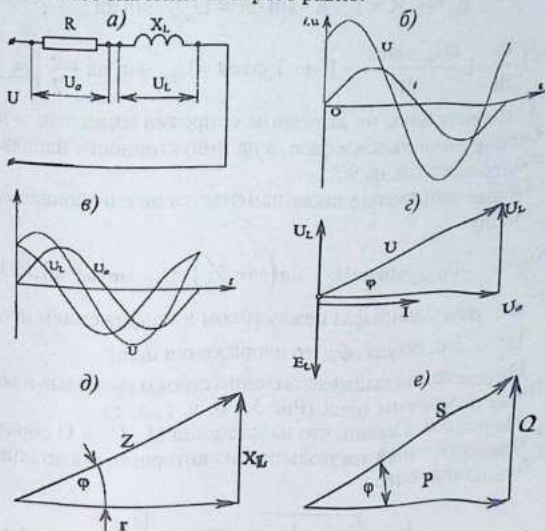


Рис. 5.6. Цепь с индуктивностью и активным сопротивлением: а) электрическая схема; б) график общего тока и напряжения; в) график активного, индуктивного и общего напряжения; г) векторная диаграмма; д) треугольник сопротивлений; е) треугольник мощностей.

$$i = I_m \cdot \sin \omega t.$$

Согласно второму закону Кирхгофа имеем:

$$u + e_L = i \cdot R, \quad (5.27)$$

откуда:

$$u = i \cdot R - e_L = i \cdot R + L \frac{di}{dt} = u_R + u_L, \quad (5.28)$$

где $u_a = i \cdot R$ – активное напряжение;

$u_L = L \frac{di}{dt}$ – индуктивное напряжение.

Если в рассматриваемой цепи проходит синусоидальный ток, то:

$$u_a = i \cdot R = I_m \cdot R \cdot \sin \omega t = U_{a.m.} \cdot \sin \omega t;$$

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_m \cdot \sin \omega t)}{dt} = L \cdot \omega \cdot I_m \cos \omega t = U_{L.m.} \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (5.29)$$

Следовательно, на активном сопротивлении ток и напряжение изменяются в фазе, а на индуктивности напряжение опережает ток на 90° .

Общее напряжение также изменяется по синусоидальному закону:

$$u = u_a + u_L = U_{a.m.} \cdot \sin \omega t + U_{L.m.} \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_m \cdot \sin (\omega t + \varphi), \quad (5.30)$$

где: φ – угол сдвига фаз между током и напряжением цепи;

U_m – амплитуда общего напряжения цепи.

На основании вышеизложенного строим волновые и векторные диаграммы цепи (Рис 5.6 б, в, г, д, е).

На рис 5.6. г видно, что напряжения U_a , U_L и U образуют прямоугольный треугольник, из которого можно найти общее напряжение:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}; \quad \cos \varphi = \frac{U_a}{U}. \quad (5.31)$$

$$\text{По закону Ома } U_a = I \cdot R; \quad U_L = I \cdot X_L. \quad (5.32)$$

Значит:

$$U = \sqrt{(I \cdot R)^2 + (I \cdot X_L)^2} = I \cdot \sqrt{R^2 + X_L^2} = I \cdot Z, \quad (5.33)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ – общее сопротивление цепи.

Активное R , индуктивное X_L , полное Z сопротивления также образуют прямоугольный треугольник, из которого:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{X_L}{Z}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L}{R}. \quad (5.34)$$

Мощность цепи равна

$$p = i \cdot u = I_m \cdot \sin \omega t \cdot U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) = \frac{I_m \cdot U_m}{2} \cos \varphi - \frac{I_m \cdot U_m}{2} \cos(2\omega t + \varphi) \\ = U \cdot I \cdot \cos \varphi - U \cdot I \cdot \cos(2\omega t + \varphi), \quad (5.35)$$

где $U \cdot I \cdot \cos \varphi$ — постоянная составляющая мощности;

$U \cdot I \cdot \cos(2\omega t + \varphi)$ — переменная составляющая мощности.

Переменная составляющая изменяется по гармоническому закону с двойной частотой, и среднее её значение за период равно нулю. Поэтому среднее значение мощности за период равно постоянной составляющей и называется активной мощностью:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad (5.36)$$

Множитель $\cos \varphi$ называется коэффициентом мощности, так как при неизменных значениях напряжения и тока активная мощность изменяется в зависимости от $\cos \varphi$.

Энергия обмена между генератором и цепью определяет реактивную энергию цепи:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ вар.}$$

Произведение полных значений напряжения и тока называется полной мощностью

$$S = I \cdot U \text{ вольт-ампер (ва).}$$

Активная, реактивная и полная мощности также образуют прямоугольный треугольник, из которого следует:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}; \sin \varphi = \frac{Q}{S}; \operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}.$$

5.7. Цепь с активным сопротивлением и емкостью (рис. 5.7)

Если в заданной цепи проходит синусоидальный ток $i = I_m \sin \omega t$, то мгновенное значение напряжения на активном сопротивлении:

$$U_R = i \cdot R = U_m \cdot \sin \omega t \quad (5.40)$$

изменяется в фазе с током.

Напряжение на емкости отстает от тока на 90° :

$$U_C = U_m \cdot (\sin \omega t - \frac{\pi}{2}). \quad (5.41)$$

На основании этих формул построим векторную диаграмму (рис. 5.7. г). Из векторной диаграммы находим общее напряжение:

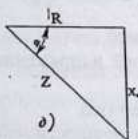
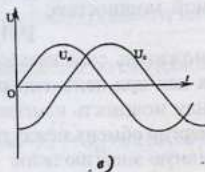
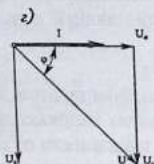
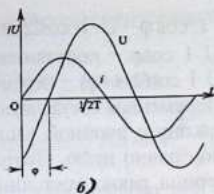
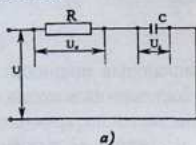


Рис. 5.7. Цепь с ёмкостью и активным сопротивлением: а) электрическая схема; б) графики общего тока и напряжения; в) графики активного и ёмкостного напряжений; г) векторная диаграмма; д) треугольник сопротивлений.

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} = \sqrt{(I \cdot R)^2 + (I \cdot X_C)^2} = I \cdot \sqrt{R^2 + X_C^2} = I \cdot Z \quad (5.42)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$ — полное сопротивление цепи

Амплитудное значение общего напряжения

$$U_m = \sqrt{U_{am}^2 + U_{cm}^2} \quad (5.43)$$

Ток опережает общее напряжение на угол ϕ . Поэтому

$$u = U_m \sin(\omega t - \phi) \quad (5.44)$$

Активное, реактивное (ёмкостные) и общее сопротивления также образуют прямоугольный треугольник. Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = \frac{U_a}{U} = \frac{R}{Z}. \quad (5.45)$$

Мгновенное значение мощности:

$$p = i \cdot u = I_m \sin \omega t \cdot U_m \sin(\omega t - \pi/2) = U \cdot I \cos\varphi - U \cdot I \cos(2\omega t - \varphi), \quad (5.46)$$

где $U \cdot I \cos(2\omega t - \varphi)$ — переменная составляющая мощности, в течение периода равна нулю.

$U \cdot I \cos\varphi$ — постоянная составляющая мощности, определяет среднюю активную мощность цепи:

$$P = U \cdot I \cos\varphi. \quad (5.47)$$

Энергия обмена между электрическим полем конденсатора и генератором называется реактивной мощностью.

$$Q = U \cdot I \sin\varphi \text{ вар.} \quad (5.48)$$

Полная мощность цепи

$$S = I \cdot U. \quad (5.49)$$

5.8. Цепь с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью. Резонанс напряжений (рис. 5.8)

Так как активное сопротивление, индуктивность и емкость соединены последовательно, то в цепи проходит одинаковый ток:

$$i = I_m \sin \omega t. \quad (5.50)$$

На активном сопротивлении ток и напряжение изменяется одинаково:

$$u_a = U_{am} \sin \omega t, \quad (5.51)$$

где $U_a = I \cdot R$ — действующее значение активного напряжения.

На индуктивности напряжение опережает ток на 90° :

$$u_L = U_{Lm} \sin(\omega t + \pi/2). \quad (5.52)$$

$U_L = I \cdot X_L$ — действующее значение индуктивного напряжения. На емкости ток опережает напряжение на 90° .

$$U_C = U_{Cm} \sin(\omega t - \pi/2). \quad (5.53)$$

где $U_C = I \cdot X_C$ — действующее значение емкостного напряжения.

Исходя из условия $X_L > X_C$ строим векторную диаграмму. На векторной диаграмме видно, что активное напряжение U_a , реактивное напряжение $U_L - U_C$ и общее напряжение U образуют прямоугольный треугольник, из которого на основании теоремы Пифагора находим общее напряжение (рис. 5.8.6).

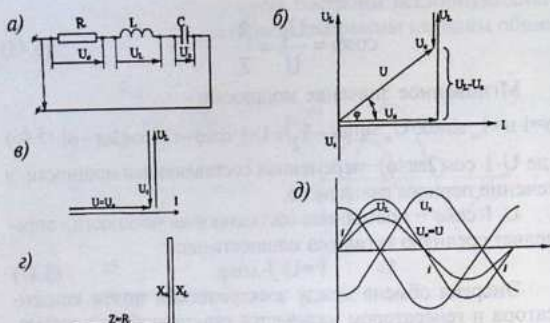


Рис. 5.8. Цепь с последовательным соединением активного сопротивления индуктивности и ёмкости: а) электрическая схема; б) векторная диаграмма; в) векторная диаграмма при резонансе напряжений; г) треугольник сопротивлений при резонансе напряжений; д) графики токов и напряжений при резонансе.

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{(I \cdot R)^2 + (I \cdot X_L - I \cdot X_C)^2} = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = I \cdot Z, \quad (5.54)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ — общее сопротивление цепи;

$X = (X_L - X_C)$ — реактивное сопротивление цепи.

Для цепи, в которой $X_L > X_C$ реактивное сопротивление положительно и носит индуктивный характер. При $X_L < X_C$ реактивное сопротивление цепи отрицательно и носит емкостный характер.

Угол сдвига фаз между общим током и напряжением находим по формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R} = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{U_L - U_C}{U_R}. \quad (5.55)$$

Согласно формулам 5.30 и 5.44 при $X_L > X_C$ общее напряжение $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$, при $X_L < X_C$ общее напряжение $u = U_m \cdot \sin(\omega t - \varphi)$. Поэтому мгновенное значение мощности:

$$p = i \cdot u = I \cdot U \cdot \cos \varphi = I \cdot U \cdot \cos(2\omega t \pm \varphi) \quad (5.56)$$

В соответствии с этим активная, реактивная и полная мощности равны:

$$P = I \cdot U \cdot \cos \varphi; Q = I \cdot U \cdot \sin \varphi; S = \sqrt{P^2 + Q^2} = I \cdot U.$$

При $X_L = X_C$ наступает резонанс напряжений. При этом общее сопротивление цепи станет равным активному сопротивлению

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R. \quad (5.57)$$

Соответственно:

$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2} = U_a. \quad (5.58)$$

Следовательно, при резонансе напряжений общее напряжение равно активному и поэтому сдвиг фаз между током и напряжением $\varphi = 0$. При резонансе индуктивное и емкостное напряжения равны друг другу, изменяются в противофазе (рис. 5.8 в) и каждое в отдельности намного больше общего напряжения. Поэтому это явление называется резонансом напряжений.

Отношение индуктивного или емкостного напряжений к общему напряжению при резонансе называется добротностью контура:

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{I_p X_L}{I_p R} = \frac{I_p X_C}{I_p R} = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R}, \quad (5.59)$$

где I_p — резонансный ток;

Q — добротность контура.

Так как во время резонанса напряжения на емкости и индуктивности равны и противоположны по знаку, то мгновенные значения их мощностей также равны и противоположны друг другу

$$p_L = i \cdot U = -p_C = -i \cdot U_C. \quad (5.60)$$

При резонансе напряжений периодически происходит равный обмен энергии электрического поля конденсатора и энергии магнитного поля катушки индуктивности.

Исходя из условия резонанса

$$X_L = X_C; \omega L = \frac{1}{\omega C}; 2\pi f \cdot L = \frac{1}{2\pi f \cdot C}$$

находим резонансную частоту:

$$f_{\text{рс}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} = f_0, \quad (5.61)$$

где f_0 — частоты собственных колебаний контура.

Следовательно, для того чтобы в контуре наступил резонанс, необходимо, чтобы частота тока источника и частота собственных колебаний контура были равны друг другу.

5.9. Расчет разветвленной цепи методом проводимостей (рис. 5.9)

При этом методе ток каждой ветви состоит из активной и реактивной составляющих. Общим параметром данной цепи является напряжение. Активный ток по фазе совпадает с общим напряжением. Реактивные составляющие тока по сравнению с общим напряжением сдвинуты на угол $\pm \pi/2$. В

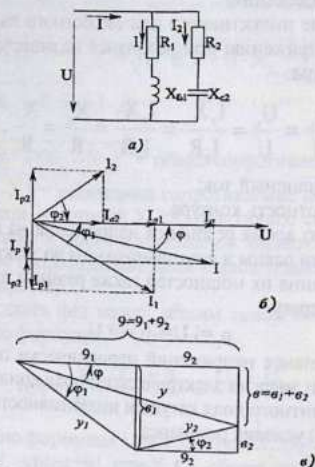


Рис. 5.9. Разветвленная цепь: а) схема; б) векторная диаграмма; в) треугольник проводимостей.

соответствие с этим определяем активные и реактивные токи в ветвях:

$$I_{a1} = I_1 \cdot \cos \varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \cdot \frac{R_1}{Z_1} = U \cdot \frac{R_1}{Z_1^2} = U \cdot g_1; \quad (5.62)$$

$$I_{a2} = I_2 \cdot \cos \varphi_2 = \frac{U}{Z_2} \cdot \frac{R_2}{Z_2} = U \cdot \frac{R_2}{Z_2^2} = U \cdot g_2; \quad (5.63)$$

$$I_{p1} = I_1 \cdot \sin \varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \cdot \frac{X_1}{Z_1} = U \cdot \frac{X_1}{Z_1^2} = U \cdot \sigma_1; \quad (5.64)$$

$$I_{p2} = I_2 \cdot \sin \varphi_2 = \frac{U}{Z_2} \cdot \frac{X_2}{Z_2} = U \cdot \frac{X_2}{Z_2^2} = U \cdot \sigma_2, \quad (5.65)$$

где $\frac{R_1}{Z_1^2} = g_1$ и $\frac{R_2}{Z_2^2} = g_2$ — активные проводимости ветвей;

$\frac{X_1}{Z_1^2} = \sigma_1$ и $\frac{X_2}{Z_2^2} = \sigma_2$ — реактивные проводимости ветвей;

$X_1 = X_{L1} - X_{C1} = X_{L1}$ — реактивное сопротивление первой ветви $X_{C1} = 0$;

$X_2 = X_{L2} - X_{C2} = X_{C2}$ — реактивное сопротивление второй ветви $X_{L2} = 0$.

$I_1 = \frac{U}{Z_1}$ и $I_2 = \frac{U}{Z_2}$ — токи ветвей.

На основании вышеизложенного строим векторную диаграмму. Так как в данной цепи общим параметром является напряжение U , то первым в масштабе в горизонтальном направлении откладываем его величину. Затем в том же направлении в масштабе откладываем активные токи I_{a1} , I_{a2} , перпендикулярно им I_{p1} , I_{p2} находим I_1 , I_2 , I . Величина общего тока:

$$I = \sqrt{(I_{a1} + I_{a2})^2 + (I_{p1} + I_{p2})^2} = U \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (\sigma_1 + \sigma_2)^2} = U \cdot y,$$

где $\sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (\sigma_1 + \sigma_2)^2} = y$ — полная проводимость цепи.

Токи ветвей равны:

$$I_1 = U \sqrt{g_1^2 + \sigma_1^2} = U \cdot y_1; \quad (5.67)$$

$$I_2 = U \sqrt{g_2^2 + \sigma_2^2} = U \cdot y_2, \quad (5.68)$$

где $y_1 = \sqrt{g_1^2 + \sigma_1^2}$ и $y_2 = \sqrt{g_2^2 + \sigma_2^2}$ — это полное проводимости первой и второй ветвей.

Из рис. 5.9 б и в можно получить

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sigma}{g}; \quad \cos \varphi = \frac{g}{y}. \quad (5.69)$$

Активная мощность цепи

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I \cdot \frac{g}{y} = U \cdot I \cdot Z \cdot g = U^2 \cdot g. \quad (5.70)$$

Реактивная мощность:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = U \cdot I \cdot \frac{\sigma}{y} = U \cdot I \cdot Z \cdot \sigma = U^2 \cdot \sigma. \quad (5.71)$$

Полная мощность:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = U^2 \sqrt{g^2 + \sigma^2} = U^2 \cdot y, \quad (5.72)$$

где: $g = g_1 + g_2$ — полная активная проводимость цепи;
 $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$ — полная реактивная проводимость цепи.

$$Z = \frac{1}{y} \text{ — полное сопротивление цепи.}$$

5.10. Резонанс токов

На рис 5.10 показан колебательный контур. Здесь L — катушка индуктивности, R — активное сопротивление катушки, C — емкость. Так как активное сопротивление емкости мало, то оно в расчет не принимается.

Условием резонанса токов является совпадение по фазе общего тока и напряжения. Для этого необходимо, чтобы реактивная проводимость цепи была равна нулю:

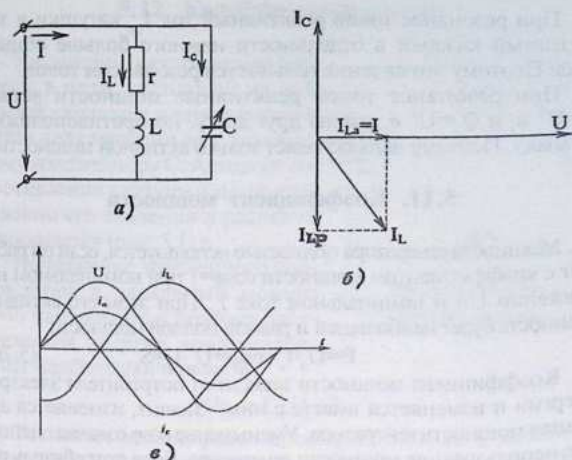


Рис. 5.10. Резонанс токов: а) схема; б) векторная диаграмма; в) графики токов и напряжений.

$$\vartheta = \vartheta_1 + \vartheta_2 = 0,$$

где: $\vartheta = \vartheta_1 = \frac{X_L}{Z_1^2} = \frac{X_L}{R^2 + X_L^2}$ — реактивная проводимость первой ветви.

$\vartheta_2 = -\vartheta_c = -\frac{1}{X_c}$ — реактивная проводимость второй ветви.

Следовательно, условие резонанса можно выразить так:

$$\vartheta_1 = -\vartheta_2 = \vartheta_c, \quad (5.73)$$

$$\frac{\omega L}{R^2 + (\omega L)^2} = \omega C. \quad (5.74)$$

Реактивные токи катушки I_{LP} и конденсатора I_c равны друг другу и противоположно направлены. Поэтому общий ток цепи будет равен активному току (рис. 5.10 б):

$$I = U \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (\vartheta_1 + \vartheta_2)^2} = U \cdot g_1 = I_{1a}. \quad (5.75)$$

При резонансе токов реактивный ток I_{Lp} катушки и ток I_c , взятый каждый в отдельности намного больше общего тока. Поэтому это явление называется резонансом токов.

При резонансе токов реактивные мощности ветвей $Q=U^2 \cdot \sigma_1$ и $Q_2=U^2 \cdot \sigma_2$ равны друг другу, но противоположны по знаку. Поэтому цепь обладает только активной мощностью.

5.11. Коэффициент мощности

Мощность генератора полностью используется, если он работает с коэффициентом мощности $\cos\varphi=1$ при номинальном напряжении U_n и номинальном токе I_n . При этом его активная мощность будет наибольшей и равной полной мощности.

$$P=U_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi=U_n \cdot I_n=S_n. \quad (5.76)$$

Коэффициент мощности зависит от потребителя электроэнергии и изменяется вместе с ним. Значит, изменяется активная мощность генератора. Уменьшение $\cos\varphi$ означает неполное использование мощности генератора. Если потребитель работает при постоянной активной мощности и неизменном напряжении, его ток обратно пропорционален $\cos\varphi$:

$$I = \frac{P}{U} \cdot \frac{1}{\cos\varphi} = \text{const} \cdot \frac{1}{\cos\varphi}. \quad (5.77)$$

Уменьшение $\cos\varphi$ ведет к увеличению тока в проводах и источнике тока, что ведет к росту потерь мощности

$$\Delta P=I^2 \cdot R. \quad (5.78)$$

Таким образом, для более полного использования генератора надо увеличивать $\cos\varphi$ потребителей электроэнергии. Для этого необходимо, чтобы потребители электроэнергии переменного тока работали при как можно большей мощности, так как, например, двигатели переменного тока на холостом ходу имеют $\cos\varphi=0, -0,3$, а при номинальной нагрузке $\cos\varphi=0,83-0,85$. Можно параллельно двигателю или группе двигателей включать конденсаторы. В этом случае энергия магнитного поля двигателя частично или полностью накапливается за счет энергии электрического поля конденсатора, т.е. провода разгружаются от обменной энергии. То же самое происходит, если параллельно линии электропередачи подключить синхронный компенсатор, являющийся источником реактивной энергии.

5.12. Колебательный контур

Рассмотрим электрические процессы в цепи, состоящей из идеальной катушки с индуктивностью L при подключении ее к заряженному конденсатору C . Активное сопротивление r катушки из-за ничтожного его значения в расчет не принимается (рис. 5.11).

Напряжение заряженного конденсатора в начальный момент ($t=0$) наибольшее и поэтому электрическая энергия конденсатора будет наибольшей и равной

$$W_c = CU_M^2 / 2.$$

Ток в этот момент равен нулю (рис. 5.12, а). С момента включения конденсатор начнет разряжаться через катушку и в цепи возникнет ток. Одновременно с этим в катушке появится магнитный поток и э.д.с. самоиндукции. Согласно второму закону Кирхгофа можно написать:

$$u_c + e_l = 0 \text{ т.е. } u_c = -e_l = L \frac{di}{dt}$$

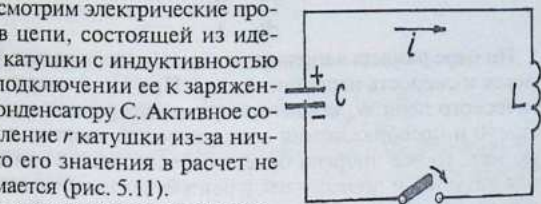


Рис. 5.11. Колебательный контур.

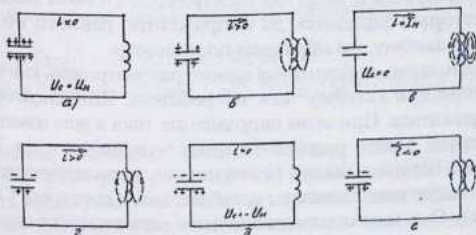


Рис. 5.12. Процесс колебаний в контуре.

Ток в это время увеличивается со скоростью:

$$\frac{di}{dt} = \frac{u_c}{L}. \quad (5.79)$$

По мере разряда напряжение конденсатора падает, уменьшается и скорость нарастания тока. При $U_c = 0$ энергия электрического поля W_c конденсатора станет равной нулю. Так как $r=0$ и преобразования электрической энергии в тепловую нет, то вся энергия будет сосредоточена в магнитном поле катушки и поэтому ток в цепи будет максимальным. В этот момент энергия магнитного поля катушки будет максимальной и равной максимальной энергии электрического поля конденсатора (рис 5.12 в):

$$LI_m^2/2 = CU_m^2/2,$$

отсюда

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{L/c}} = \frac{U_m}{Z_B}, \quad (5.80)$$

где Z_B — волновое сопротивление контура.

Начиная с этого момента катушка становится источником питания, её ток начинает уменьшаться, но сохранит прежнее направление (рис 5.12 г). Этот процесс продолжается до тех пор, пока ток не уменьшится до нуля (рис 5.12 д). При этом вся энергия магнитного поля катушки преобразуется в энергию электрического поля конденсатора, который зарядится до напряжения, равного по величине начальному, но обратной полярности.

Теперь вновь конденсатор можно рассматривать как источник питания, а катушку — как потребитель. Конденсатор начнет разряжаться. При этом направление тока в нем изменяется на обратное. После разряда он снова заряжается и т.д. Таким образом, в цепи возникают незатухающие периодические колебания и такую цепь называют колебательным контуром. Согласно закону Ома максимальное значение напряжения равно

$$U_m = \omega_0 \cdot L \cdot I_m = X_L \cdot I_m.$$

Исходя из этой формулы, а также формулы 5.80, найдем частоту собственных колебаний контура:

$$\frac{U_m}{I_m} = \omega_0 \cdot L = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (5.81)$$

откуда

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{или} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}.$$

В реальном контуре катушка обладает определенным активным сопротивлением. Поэтому процесс разряда конденсатора через индуктивность сопровождается непрерывным преобразованием электрической энергии в тепловую. Вследствие этого имеет место затухающий колебательный процесс.

Колебательные контуры используются в радиотехнике для приема и генерации гармонических колебаний.

Задачи

Задача 5.1. На катушку индуктивности $L=0,2$ Гн подаю напряжение $U=36$ В, частотой $f=150$ Гц и начальной фазой $\varphi=0$. Определить действующее значение тока и написать закон изменения его.

Решение: 1. Индуктивное сопротивление катушки:

$$X_L = 2\pi f \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 150 \cdot 0,2 = 188,4 \text{ Ом.}$$

2. Действующее значение тока:

$$I = U/X_L = 36/188,4 = 0,19 \text{ А.}$$

3. Амплитуда тока и закон его изменения:

$$I_m = I \cdot \sqrt{2} = 0,19 \cdot 1,41 = 0,268 \text{ А;}$$

$$i = I_m \cdot \sin \omega t = 0,268 \cdot \sin 2 \cdot 3,14 \cdot 150 t = 0,268 \cdot \sin 942 t.$$

Задача 5.2. Действующее значение тока и напряжения катушки равны $I=1,25$ А, $U=36,5$ В, частота $f=25$ Гц. Определить индуктивность катушки и написать выражения мгновенных значений тока и напряжения.

Решение: 1. Ток катушки равен:

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{2\pi f \cdot L}$$

2. Откуда индуктивность:

$$L = \frac{U}{I \cdot 2\pi f} = \frac{36,5}{1,25 \cdot 2 \cdot 14 \cdot 25} = 0,19 \text{ Гн.}$$

3. Выражения мгновенных значений тока и напряжения:

$$i = I_m \cdot \sin \omega t = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \omega t = \sqrt{2} \cdot 1,25 \cdot \sin 2\pi f \cdot t = 1,86 \cdot \sin 157 \cdot t$$

$$u = U_m \cdot \sin(\omega t + \pi/2) = U \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \pi/2) = \\ = 51,5 \cdot \sin(157t + \pi/2) = 51,5 \cdot \sin(157t + \pi/2)$$

Задача 5.3. Действующее значение тока через конденсатор $C=0,1$ мкФ равно $I=50$ мА, частота $f=500$ Гц.

Определить реактивное сопротивление конденсатора и действующее значение напряжения.

Решение: 1 Реактивное сопротивление конденсатора

$$X_c = \frac{1}{2\pi f \cdot c} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 500 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} = 3200 \text{ Ом.}$$

1. Амплитудное и действующие значения напряжения

$$U = I \cdot X_c = 50 \cdot 10^{-3} \cdot 3200 = 160 \text{ В.}$$

$$U_m = U \cdot \sqrt{2} = 160 \cdot 1,41 = 226 \text{ В.}$$

Задача 5.4. На два последовательно соединенных конденсатора подано напряжение $U=300$ В. Ток цепи $I=1,25$ А, напряжение на конденсаторе C_1 равно $U_1=144$ В, емкость $C_2=1,5$ мкФ. Определить емкость конденсатора C_1 и реактивную мощность цепи:

$$Q = U \cdot I = 300 \cdot 1,25 = 375 \text{ вар.}$$

2. Напряжение на C_2 равно

$$U_2 = U - U_1 = 300 - 144 = 156 \text{ В.}$$

3. При последовательном соединении конденсаторов их заряды равны. Поэтому $U_1 \cdot C_1 = U_2 \cdot C_2$. Откуда:

$$C_1 = \frac{U_2 \cdot C_2}{U_1} = \frac{156 \cdot 1,5}{144} = 1,63 \text{ мкФ.}$$

Задача 5.5. На два параллельно соединенных конденсатора подано напряжение $U=106$ В с $f=50$ Гц. Общий ток равен $I=0,15$ А, $C_2=2C_1$. Определить емкости и токи конденсаторов, общую мощность цепи и мощность на каждом конденсаторе.

Решение: 1. По закону Ома

$$I = \frac{U}{X_c} = \frac{U}{\frac{1}{2\pi f \cdot C}} = U \cdot 2\pi f \cdot C$$

Следовательно, общая емкость цепи равна:

$$C = \frac{I}{U \cdot 2\pi f} = \frac{0,15}{106 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50} = \frac{0,15}{106 \cdot 314} = 4,5 \text{ мкФ}.$$

2. При параллельном соединении конденсатор их общая емкость равна сумме емкостей конденсаторов.

Исходя из этого, а также из того, что $C_2=2C_1$, находим:

$$C = C_1 + C_2 = C_1 + 2C_1 = 3C_1 = 4,5;$$

$$C_1 = \frac{4,5}{3} = 1,5 \text{ мкФ};$$

$$C_2 = 2C_1 = 2 \cdot 1,5 = 3 \text{ мкФ}.$$

3. Токи конденсаторов пропорциональны их емкостям, поэтому: $I_2=2I_1$; $I=I_1+I_2=3I_1=0,15$ А.

Отсюда $I_1=0,05$ А, $I_2=0,1$ А.

4. Общая мощность и мощность на каждом конденсаторе равны:

$$Q_1 = -U \cdot I_1 = -106 \cdot 0,05 = -5,13 \text{ вар};$$

$$Q_2 = -U \cdot I_2 = -106 \cdot 0,1 = -10,6 \text{ вар};$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = -15,9 \text{ вар}.$$

Задача 5.6. В цепи с последовательно соединенными резистором и конденсатором мгновенное значение тока $i=0,4 \sin 8792t$ А. Напряжение на резисторе $u=180 \sin 8792t$ В. Емкость конденсатора равна $C=0,18$ мкФ, начальная фаза напряжения равна $\varphi=0$. Определить: 1) действующее значение входного напряжения; 2) сопротивление резистора и общее сопротивление цепи; 3) активную, реактивную и полную мощности цепи; 4) построить векторную диаграмму цепи.

Решение: 1) Активное сопротивление цепи:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{180}{0,4} = 450 \text{ Ом.}$$

2. Частота тока: $\omega = 2\pi f = 8792 \cdot t = 2\pi f$,
отсюда

$$f = \frac{8792}{6,28} = 1400 \text{ Гц.}$$

3. Реактивное сопротивление конденсатора

$$X_c = \frac{1}{2\pi f \cdot c} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1400 \cdot 0,18 \cdot 10^{-6}} = 632 \text{ Ом}$$

4. Полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + X_c^2} = \sqrt{450^2 + 632^2} = 780 \text{ Ом.}$$

5. Напряжение на конденсаторе

$$U_c = i \cdot X_c = 0,4 \cdot \sin 8792 \cdot t \cdot 632 = 253 \sin 8792 \cdot t.$$

6. Действующие напряжения на резисторе и на конденсаторе равны:

$$U_R = \frac{U_{RM}}{\sqrt{2}} = \frac{180}{\sqrt{2}} = 125 \text{ В;}$$

$$U_c = \frac{U_{cM}}{\sqrt{2}} = \frac{253}{\sqrt{2}} = 175,5 \text{ В;}$$

Входное напряжение равно:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_c^2} = \sqrt{125^2 + 175,5^2} = 220 \text{ В.}$$

7. Полная мощность равна:

$$S = U \cdot I = 220 \cdot \frac{0,4}{\sqrt{2}} = 62,6 \text{ ВА;}$$

реактивная мощность

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = -U_c \cdot I = 175,5 \cdot \frac{0,4}{\sqrt{2}} = -51 \text{ вар ;}$$

активная мощность

$$P = U_R \cdot I = 125 \frac{0,4}{\sqrt{2}} = 36 \text{ Вт}.$$

8. Построение векторной диаграммы. Общим параметром данной цепи является ток. На резисторе ток и напряжение направлены одинаково. На конденсаторе ток опережает напряжение на угол 90° . Масштаб $1 \text{ см} = 0,1 \text{ А}$, напряжение $1 \text{ см} = 60 \text{ В}$. (рис. 5.13).

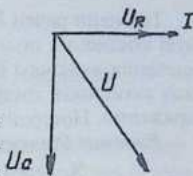


Рис. 5.13. Рисунок к задаче 5.6.

Задача 5.7. Резистор с $R=6,5 \text{ Ом}$ и катушка индуктивности с $L=20 \text{ мГн}$, конденсатор $C=30 \text{ мкФ}$ соединены последовательно. Они подключены на напряжение $U=30 \text{ В}$ частотой $f=150 \text{ Гц}$. Определить полное сопротивление цепи, действующее значение тока, полную мощность и коэффициент мощности.

Решение: 1. Индуктивное сопротивление катушки:

$$X_L = 2\pi f \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 150 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 18,84 \text{ Ом}$$

Емкостное сопротивление конденсатора:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 150 \cdot 30 \cdot 10^{-6}} = 38,9 \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{6,5^2 + (38,9 - 18,84)^2} = 20,7 \text{ Ом}.$$

3. Действующее значение тока равно:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{30}{20,7} = 1,45 \text{ А}.$$

3. Полная мощность: $S = U \cdot I = 30 \cdot 1,45 = 43,5 \text{ ВА}$.

4. Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{6,5}{20,7} = 0,314.$$

Задача 5.8. Резистор $R=35 \text{ Ом}$, катушка $L=30 \text{ мГн}$, конденсатор $C=15 \text{ мкФ}$ соединены последовательно.

Ток цепи равен $I = 1,5 \sin(1884t - 30^\circ)$. Определить: полную мощность, полное сопротивление цепи, действующие значения входного напряжения и тока. Написать выражения активного, индуктивного, емкостного и входного напряжений. Постройте векторную диаграмму.

Решение: Индуктивное сопротивление катушки

$$X_L = 2\pi f \cdot L = \omega \cdot L = 1884 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 56,5 \text{ Ом.}$$

Емкостное сопротивление равно:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f \cdot C} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{1884 \cdot 15 \cdot 10^{-6}} = 35,3 \text{ Ом};$$

полное сопротивление

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{35^2 + (56,5 - 35,3)^2} = 41 \text{ Ом}$$

2. Действующее значение тока

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{1,5}{\sqrt{2}} = 1,07 \text{ А.}$$

3. Действующее значение напряжения

$$U = I \cdot Z = 1,07 \cdot 41 = 43,9 \text{ В.}$$

4. Полная мощность

$$S = U \cdot I = 43,9 \cdot 1,07 = 47 \text{ ВА.}$$

5. Выражение мгновенного значения напряжения на резисторе

$$U_R = I_m \cdot R \sin(\omega t - \varphi) = 1,5 \cdot 35 \sin(1884t - 30^\circ) = 52,5 \sin(1884t - 30^\circ) \text{ В;}$$

на катушке

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \frac{L \cdot d[(1,5 \cdot \sin(1884t - 30^\circ))]}{dt} = \omega L \cdot 1,5 \cdot$$

$$\sin(1884t - 30^\circ + 90^\circ) = X_L \cdot I_m \cdot \sin(1884t + 60^\circ) = 85,75 \sin(1884t + 60^\circ) \text{ В;}$$

на конденсаторе ток опережает напряжение на 90°

$$u_C = I \cdot X_C \sin(1884t - 30^\circ - 90^\circ) = 52,95 \sin(1884t - 120^\circ) \text{ В.}$$

6. Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{35}{41} = 0,85 \quad \varphi = 31^\circ.$$

7. Выражение входного напряжения

$$u = U_M \cdot \sin(\omega t - 30^\circ + 31^\circ) = 43,9\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - 30^\circ + 31^\circ) = 61,5 \cdot \sin(1884t + 1^\circ) \text{ В.}$$

8. Построение векторной диаграммы. По отношению к горизонтальной линии под углом 30° откладываем вектор U_R напряжения. После этого под углами 60° и -30° к горизонтальной откладываем векторы U_L и U_C . Векторная сумма U_R и U_C дают вектор общего напряжения. Для построения векторной диаграммы используем действующие значения: $I = 1,0$ А.

$$U_R = \frac{U_{RM}}{\sqrt{2}} = \frac{52,5}{1,41} = 36,7 \text{ В; } U_L = \frac{U_{LM}}{\sqrt{2}} = \frac{85,7}{1,41} = 60,8 \text{ В.}$$

$$U_C = \frac{U_{CM}}{\sqrt{2}} = \frac{52,95}{1,41} = 36,8 \text{ В.}$$

Масштаб: тока — 1 см = 1 А;

напряжения — 1 см = 10 В (рис. 5.14).

Задача 5.9. К катушке с индуктивностью $L = 0,1$ Гн и активным сопротивлением $R = 300$ Ом параллельно подключен конденсатор $C = 10$ мкФ. Напряжение источника тока, подключенного к цепи $U = 20$ В, частота $f = 1000$ Гц. Определить методом проводимостей следующие параметры цепи, ток, активную, реактивную и полную мощности цепи.

Решение: 1. Индуктивное сопротивление:

$$X_L = \omega L = 2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 0,1 = 628 \text{ Ом}$$

Полное сопротивление катушки:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_L^2} = \sqrt{300^2 + 628^2} = \sqrt{485000}$$

$$Z_1^2 = 485000 \text{ Ом}^2.$$

2. Для первой ветви

активная проводимость

$$g_1 = \frac{R_1}{Z_1^2} = \frac{300}{485000} = 6,18 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1};$$



Рис. 5.14
к задаче 5.9

реактивная проводимость

$$b_1 = \frac{X_L}{Z_1^2} = \frac{628}{485000} = 13 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1};$$

полная проводимость

$$y_1 = \sqrt{g_1^2 + b_1^2} = \sqrt{(6,18 \cdot 10^{-4})^2 + (13 \cdot 10^{-4})^2} = 14,4 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1};$$

$$\text{активный ток: } I_{a1} = U \cdot g_1 = 20 \cdot 6,18 \cdot 10^{-4} = 12,36 \cdot 10^{-3} \text{ А};$$

$$\text{реактивный ток: } I_{p1} = U \cdot b_1 = 20 \cdot 13 \cdot 10^{-4} = 26 \cdot 10^{-3} \text{ А};$$

$$\text{полный ток } I_1 = U \cdot y_1 = 20 \cdot 14,4 \cdot 10^{-4} = 28,8 \cdot 10^{-3} \text{ А};$$

коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = \frac{g_1}{y_1} = \frac{6,18 \cdot 10^{-4}}{14,4 \cdot 10^{-4}} = 0,43 \quad \varphi = 64^\circ.$$

3. Для второй ветви:

полная проводимость равна реактивной проводимости:

$$y_2 = b_2 = -b_c = -\omega C = 6280 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = -628 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1}.$$

Ток второй ветви состоит только из реактивной составляющей:

$$I_2 = -U \cdot y_2 = -20 \cdot 628 \cdot 10^{-4} = 1,256 \text{ А}.$$

4. Для цепи:

полная проводимость

$$y = \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_1 + b_2)^2} = \sqrt{(6,18 \cdot 10^{-4})^2 + (13 \cdot 10^{-4} - 628 \cdot 10^{-4})^2} = 615,1 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1};$$

активная проводимость: $g = g_1 + g_2 = 6,18 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1};$

реактивная проводимость:

$$b = b_1 + b_2 = 13 \cdot 10^{-4} + (-628 \cdot 10^{-4}) = -615 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1};$$

$$\text{ток: } I = U \cdot y = 20 \cdot 615,1 \cdot 10^{-4} = 1,23 \text{ А};$$

$$\text{активная мощность: } P = U^2 \cdot g = 20^2 \cdot 6,18 \cdot 10^{-4} = 24,72 \cdot 10^{-2} \text{ Вт};$$

$$\text{реактивная мощность: } Q = U^2 \cdot b = 20^2 \cdot (-615 \cdot 10^{-4}) = -24,6 \text{ вар};$$

$$\text{полная мощность: } S = U^2 \cdot y = 20^2 \cdot 615,1 \cdot 10^{-4} = 24,61 \text{ ВА};$$

коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = \frac{g}{y} = \frac{6,18 \cdot 10^{-4}}{615,1 \cdot 10^{-4}} = 0,01 \quad \varphi = -89^\circ 30'.$$

ГЛАВА 6

ТРЕХФАЗНЫЙ ТОК

Многофазной системой электрических цепей называется система, состоящая из нескольких синусоидальных цепей переменного тока одной частоты, сдвинутых относительно друг друга на одинаковый угол и вырабатываемых одним генератором. Отдельные цепи многофазной системы сокращенно называются фазами. По числу фаз бывают двухфазные, трехфазные, шестифазные и т.д. монофазные системы. В настоящее время самое широкое распространение получила трехфазная система. Причинами этого являются:

1. Применение трехфазной системы вместо трех однофазных систем даёт экономию меди.

2. При помощи трехфазного тока можно легко получить вращающееся магнитное поле, которое широко применяется в асинхронных электродвигателях.

3. Один трехфазный генератор удобнее использовать, чем три однофазных. Это касается также трехфазных двигателей и трехфазных трансформаторов.

4. Дает возможность получения двух видов напряжений: линейного и фазного.

Трехфазный ток изобрел русский инженер М. О. Доливо-Добровольский. Им созданы трехфазный генератор, трехфазный двигатель, трехфазный трансформатор и впервые осуществлена передача электроэнергии трехфазного тока.

6.1. Получение трехфазного тока

На рис. 6.1 показана упрощенная схема трехфазного генератора. На статоре расположены под углом $2\pi/3$ друг к другу три обмотки, называемые фазами. Каждая обмотка показана как один виток. Начало обмоток обозначены буквами А, В, С, а концы Х, У и Z. Ротор и его обмотка

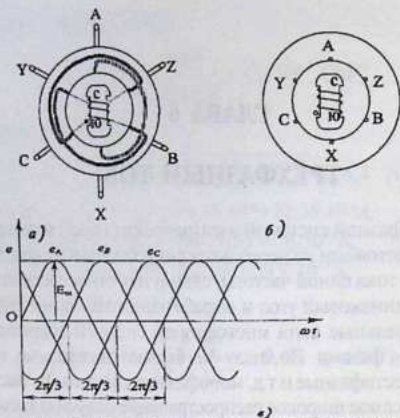


Рис. 6.1. Простейший генератор трехфазного тока:
а и б) устройство; в) графики э.д.с.

показаны в виде постоянного магнита. При вращении ротора его магнитное поле пересекает обмотки статора и наводит в них э.д.с. одинаковой частоты. При $t=0$ э.д.с., наводимую в фазе А, можно выразить ток:

$$E_A = E_M \cdot \sin \omega t. \quad (6.1)$$

Э.д.с. фазы В по отношению к э.д.с. фазы А сдвинута на $1/3$ периода, т.е.

$$e_B = E_M \cdot \sin(\omega t - 120^\circ); \quad (6.2)$$

э.д.с. фазы с отстает от э.д.с. фазы В на $1/3$ периода или опережает э.д.с. фазы А на $1/3$ периода:

$$e_C = E_M \cdot \sin(\omega t - 240^\circ) = E_M \cdot \sin(\omega t + 120^\circ). \quad (6.3)$$

На рис. 6.1 показаны графики э.д.с. обмоток генератора. Обычно положительные направления э.д.с. в обмотках генератора выбираются от концов обмоток к ее началам. Трехфазная система считается симметричной, если амплитуды э.д.с. обмоток равны и между ними одинаковые углы сдвига фаз. Обмотки генератора могут соединяться звездой или треугольником. Это дает возможность вместо шести проводов применить три или четыре провода.

6.2. Соединение обмоток генератора звездой

При соединении обмоток генератора звездой начала фаз А, В, С или концы Х, У, Z соединяются между собой. Узел, образующийся при этом, называется нейтральной точкой. Провод, отходящий от нейтральной точки, называется нейтральным проводом. Провода, отходящие от свободных концов фаз, называются линейными проводами. Напряжение между любыми двумя линейными проводами называется линейным напряжением и обозначается U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} или в общем виде U_l (рис. 6.2). Напряжение между любым линейным и нейтральным проводами называется фазным напряжением и обозначается U_A , U_B , U_C или в общем виде U_{ϕ} .

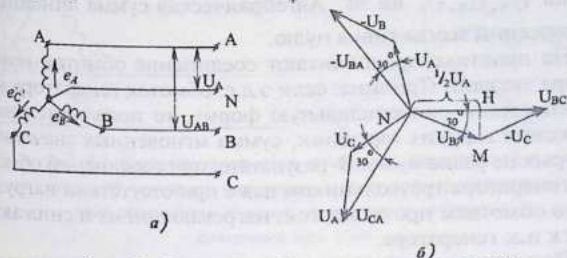


Рис. 6.2. Соединение обмоток генератора звездой:
а) схема; б) векторная диаграмма.

На основании второго закона Кирхгофа мгновенное значение линейного напряжения между фазами А и В равно

$$U_{AB} = U_A - U_B. \quad (6.4)$$

Аналогично, для двух других линейных напряжений можно написать

$$U_{BC} = U_B - U_C; \quad (6.5)$$

$$U_{CA} = U_C - U_A. \quad (6.6)$$

Следовательно, мгновенное значение любого линейного напряжения равно алгебраической разности мгновенных значений соответствующих фазных напряжений.

Аналогично, действующие значения линейных напряжений равны:

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A - \bar{U}_B; \quad \bar{U}_{BC} = \bar{U}_B - \bar{U}_C; \quad \bar{U}_{CA} = \bar{U}_C - \bar{U}_A. \quad (6.7)$$

Значит, вектор линейного напряжения равен разности векторов соответствующих фазных напряжений (рис. 6.2. б). Из прямоугольного треугольника NHM получаем:

$$\frac{1}{2} U_{\text{л}} = U_{\text{ф}} \cos 30^{\circ} = U_{\text{ф}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (6.8)$$

Следовательно, действующее значение линейного напряжения больше фазного в $\sqrt{3}$ раз.

Кроме того, из рис. 6.2. б. следует, что в симметричной трехфазной системе векторы линейных напряжений $\bar{U}_{AB}, \bar{U}_{BC}, \bar{U}_{CA}$ опережают соответствующие фазные напряжения $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$ на 30° . Алгебраическая сумма линейных напряжений всегда равна нулю.

На практике предпочитают соединение обмоток генератора звездой. Причина: если э.д.с. обмоток генератора не имеют строго синусоидальную форму, то появляются напряжения высших гармоник, сумма мгновенных значений которых не равна нулю. В результате, при соединении обмоток генератора треугольником даже при отсутствии нагрузки по обмоткам протекает ток, нагревающий их и снижающий к п.д. генератора.

При наличии нейтрального провода трехфазная система будет четырехпроводной, что дает возможность получения фазных и линейных напряжений.

6.3. Соединение обмоток генератора треугольником

Для соединения обмоток генератор треугольником надо конец фазы А соединить с началом фазы В, конец фазы В соединить с началом фазы С, конец фазы С соединить с началом фазы А (рис. 6.3). При этом линейные и фазные напряжения будут равны друг другу:

$$U_{AB} = U_A; \quad U_{BC} = U_B; \quad U_{CA} = U_C. \quad (6.9)$$

При таком соединении обмотки генератора образуют замкнутый контур с очень маленьким сопротивлением. При отсутствии потребителя электроэнергии ток в контуре равен нулю, так как сумма э.д.с. фаз равна нулю (рис. 6.3. б):

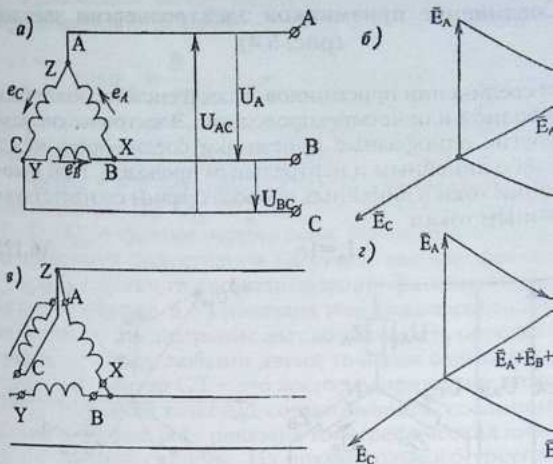


Рис. 6.3. Соединение обмоток генератора треугольником
а) схема; б) векторная диаграмма; в и г) пример неправильного соединения обмоток генератора и векторная диаграмма при этом.

$$\bar{E}_A + \bar{E}_B = -E_C$$

или

$$-\bar{E}_C + \bar{E}_C = 0.$$

Неправильное соединение обмоток генератора очень опасно. Например, перепутали начало и конец фазы С. При таком соединении алгебраическая сумма э.д.с. обмоток генератора будет равна удвоенной фазной э.д.с. (рис. 6.3 в, г):

$$E_A + E_B + (-E_C) = -E_C - E_C = -2E_C,$$

т.е. равна удвоенной фазной э.д.с., что равносильно короткому замыканию генератора.

6.4. Соединение приемников электроэнергии звездой (рис. 6.4)

При соединении приемников звездой система может быть трехпроводной или четырехпроводной. Электрические лампы и другие однофазные приемники соединяются между каким-либо линейным и нейтральным проводом. При таком соединении токи в линейных проводах равны соответствующим фазным токам

$$I_{\phi} = I_{\Delta} \quad (6.12)$$

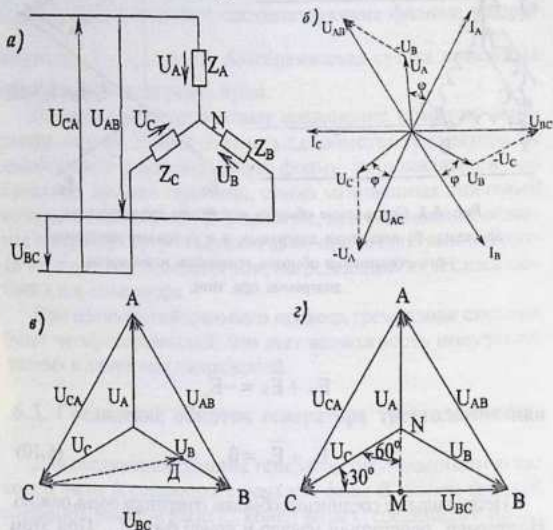


Рис. 6.4. Соединение приемников электроэнергии звездой: а) схема; б) векторная диаграмма; в) топографическая диаграмма; г) топографическая диаграмма симметричной системы.

Фазные токи равны:

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A}; I_B = \frac{U_B}{Z_B}; I_C = \frac{U_C}{Z_C} \quad (6.13)$$

Углы сдвига между фазными токами и напряжениями определяются из формул:

$$\cos \varphi_A = \frac{R_A}{Z_A}; \cos \varphi_B = \frac{R_B}{Z_B}; \cos \varphi_C = \frac{R_C}{Z_C}, \quad (6.14)$$

где $R_A, R_B, R_C, Z_A, Z_B, Z_C$ — активные и полные сопротивления приемников электроэнергии.

На рис. 6.4. б показана векторная диаграмма симметричной системы, где U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} — линейные напряжения, U_A, U_B, U_C — фазные напряжения. Приведенная диаграмма соответствует индуктивной нагрузке, так как фазные токи I_A, I_B и I_C отстают от соответствующих фазных напряжений на угол φ . На рис. 6.4 в показана топографическая диаграмма системы. Эта диаграмма дает возможность определить напряжение между любыми двумя точками схемы рис. 6.4 а. Например, вектор СД — это вектор напряжения между точкой С и средней точкой Д сопротивления, соединенного с фазой В. На рис. 6.4 г показана топографическая диаграмма симметричной системы. Из прямоугольного треугольника СОМ можно вывести, что

$$U_{BC} = \sqrt{3} \cdot U_c \text{ т.е. } U_A = \sqrt{3} \cdot U_\phi.$$

Согласно первому закону Кирхгофа мгновенное значение тока нейтрального провода равно алгебраической сумме фазных токов:

$$i_N = i_A + i_B + i_C. \quad (6.15)$$

В векторном изображении

$$\bar{I}_N = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C. \quad (6.16)$$

В большинстве случаев ток нейтрального провода меньше тока линейных проводов. Поэтому сечение нейтрального провода берется меньше или равным сечению линейного провода.

Роль нейтрального провода:

1. Нейтральный провод уравнивает напряжения фаз. В несимметричной системе при отсутствии нейтрального провода напряжение будет больше там, где больше сопротивление. В симметричной системе ток нейтрального провода равен нулю, поэтому его можно убрать.

2. Если при отсутствии нейтрального провода в одной из фаз произойдет короткое замыкание, то в оставшихся двух других фазах напряжение увеличится в $\sqrt{3}$ раз, так как линейный провод короткозамкнутой фазы оказывается присоединенным к нейтральной точке. В результате оставшиеся две фазы окажутся под линейным напряжением, которое больше фазного в $\sqrt{3}$ раз. По этим причинам для предотвращения обрыва нейтрального провода в нем не устанавливаются предохранители и автоматические выключатели. Расчет трехфазной системы при симметричной нагрузке сводится к расчету одной фазы. Фазное напряжение:

$$U_{\phi} = U_{\Delta} / \sqrt{3}. \quad (6.17)$$

Фазные и линейные токи:

$$I_{\phi} = U_{\phi} / Z_{\phi}, \quad (6.18)$$

где Z_{ϕ} — полное сопротивление фазы.

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = R_{\phi} / Z_{\phi}, \quad (6.19)$$

где R_{ϕ} — активное сопротивление фазы.

Активная мощность одной фазы:

$$P_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi. \quad (6.20)$$

Активная мощность трехфазной системы:

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\Delta} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi. \quad (6.21)$$

Реактивная мощность одной фазы:

$$Q_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \sin \varphi. \quad (6.22)$$

Реактивная мощность трехфазной системы:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_{\Delta} \cdot I_{\phi} \cdot \sin \varphi. \quad (6.23)$$

Полная мощность трехфазной системы:

$$S = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{\Delta} \cdot I_{\phi}.$$

При несимметричной нагрузке мощность трехфазной системы находится, как сумма мощностей всех трех фаз.

6.5. Соединение приемников электроэнергии треугольником

При соединении треугольником приемники электроэнергии подключаются непосредственно к линейным проводам. Поэтому линейные и фазные напряжения равны друг другу (рис. 6.5. а).

$$U_{AB} = U_A; U_{BC} = U_B; U_{CA} = U_C. \quad (6.24)$$

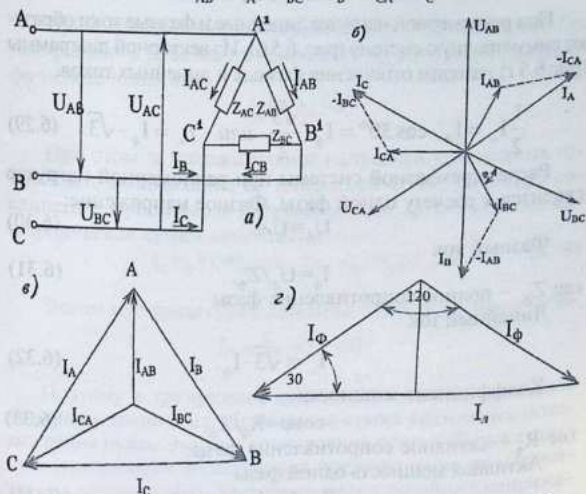


Рис. 6.5. Соединение приёмников электроэнергии треугольником:

- а) схема; б и в) векторные диаграммы токов и напряжений;
г) диаграмма определения соотношения линейных фазных токов.

За положительное направление линейных токов принимается направление от источника питания к нагрузке (рис. 6.5 а). Для мгновенных значений токов узла А согласно первому закону Кирхгофа можно написать:

$$i_A + i_{CA} = i_{AB} \text{ или } i_A = i_{AB} - i_{CA}. \quad (6.25)$$

Аналогично для узлов В и С:

$$i_B = i_{BC} - i_{AB}; \quad (6.26)$$

$$\vec{i}_c = \vec{i}_{CA} - \vec{i}_{AB}. \quad (6.27)$$

Таким образом, мгновенные значения линейных токов равны разности мгновенных значений токов двух фаз, соединенных с этим линейным проводом. Значит, вектор линейного тока равен векторной разности соответствующих фазных токов.

$$\vec{I}_A = \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{CA}, \vec{I}_B = \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{BC}, \vec{I}_C = \vec{I}_{CA} - \vec{I}_{BC}. \quad (6.28)$$

При равномерной нагрузке линейные и фазные токи образуют симметричную систему (рис. 6.5 б). Из векторной диаграммы (рис 6.5 г) находим отношения фазных и линейных токов.

$$\frac{1}{2} I_\Delta = I_\phi \cdot \cos 30^\circ = I_\phi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{или} \quad I_\Delta = I_\phi \cdot \sqrt{3}. \quad (6.29)$$

Расчет трехфазной системы при равномерной нагрузке сводится к расчету одной фазы. Фазное напряжение:

$$U_\phi = U_\Delta. \quad (6.30)$$

Фазный ток

$$I_\phi = U_\phi / Z_\phi, \quad (6.31)$$

где Z_ϕ — полное сопротивление фазы

Линейный ток

$$I_\Delta = \sqrt{3} \cdot I_\phi. \quad (6.32)$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = R_\phi / Z_\phi, \quad (6.33)$$

где R_ϕ — активное сопротивление фазы.

Активная мощность одной фазы

$$P_\phi = U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi. \quad (6.34)$$

Активная мощность трехфазной цепи

$$P = 3P_\phi = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} U_\Delta \cdot I_\Delta \cdot \cos \varphi. \quad (6.35)$$

Реактивная мощность трехфазной цепи

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_\Delta \cdot I_\Delta \cdot \sin \varphi, \quad (6.36)$$

так как

$$I_\phi = I_\Delta / \sqrt{3}. \quad (6.37)$$

Полная мощность системы

$$S = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \sqrt{3}U_{\Delta} \cdot I_{\Delta}. \quad (6.38)$$

Если нагрузка фаз неравномерна, то мощность системы определяется как сумма мощностей всех трех фаз.

6.6. Свойства линейных токов и линейных напряжений

При соединении приемников электроэнергии звездой без нейтрального провода на основании первого закона Кирхгофа можно написать:

$$i_A + i_B + i_C = 0.$$

При этом за положительное направление линейных токов взято направление от генератора к нагрузке. При соединении приемников электроэнергии треугольником алгебраическая сумма линейных токов:

$$i_A + i_B + i_C = i_{AB} - i_{CA} + i_{BC} - i_{AB} + i_{CA} - i_{BC} = 0. \quad (6.39)$$

Значит векторная сумма линейных токов будет равна нулю.

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0.$$

Поэтому в трехфазном кабеле намагничивающая сила линейных токов и алгебраическая сумма магнитных потоков равна нулю. Это дает возможность одеть кабель в стальную (свинцовую) оболочку для предохранения от механических повреждений. Векторная сумма линейных напряжений равна нулю и образует замкнутый треугольник

$$\bar{U}_{AB} + \bar{U}_{BC} + \bar{U}_{CA} = 0. \quad (6.40)$$

Пользуясь этим, в трехфазной системе можно при помощи вольтметра измерить сдвиг фаз между напряжениями. Если $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA}$, то система напряжений образует равносторонний треугольник, и угол сдвига фаз между смежными линейными напряжениями составляет 120° (рис.6.4.г). При неравных линейных напряжениях из них строится замкнутый треугольник и по нему определяются углы сдвига фаз.

6.7. Присоединение приемников электроэнергии к трехфазной сети

При этом надо учитывать три фактора: виды нагрузок, номинальное напряжение сети, номинальное напряжение приемника электроэнергии.

1. Напряжение сети (линейное) $U_{\epsilon}=380$ В, напряжение лампы—220 В. Определите схему подключения.

Так как напряжение ламп 220 В, то их необходимо подключить к фазному напряжению. Поэтому пользуемся схемой соединения звездой с нейтральным проводом.

2. Линейное напряжение сети $U_{\epsilon}=220$ В, напряжение ламп 220 В. В этом случае лампы необходимо подключить прямо на линейное напряжение. Значит, лампы надо подключить треугольником.

3. Номинальное напряжение электродвигателя $U=220$ В, напряжение сети 380 В. Обмотки двигателя образуют симметричную систему. Поэтому нейтральный провод не нужен. Если обмотки двигателя соединить треугольником, то каждая обмотка окажется под напряжением 380 В и они будут перегреваться. Следовательно обмотки двигателя надо соединить звездой.

6.8. Вращающееся магнитное поле трехфазного тока

Через катушку (рис. 6.6 а) проходит синусоидальный ток. Магнитное поле катушки характеризуется вектором магнитной индукции. Направление этого вектора зависит от направления тока в данный момент времени. Начало катушки обозначено буквой Н, конец — буквой К. За положительное направление тока принимается направление от начало катушки к концу (положительный полупериод синусоидального тока). При этом согласно правилу буравчика вектор магнитной индукции будет направлен вверх. В отрицательный полупериод вектор магнитной индукции будет направлен вниз. Следовательно, ось катушки является геометрическим местом концов векторов магнитной индукции. Такое магнитное поле называется пульсирующим магнитным полем. Теперь расположим три одинаковые катушки, чтобы их оси были сдвинуты между собой на 120° . Подключим катушки к симметричной трехфазной системе э.д.с. Магнитные индукции катушек равны.

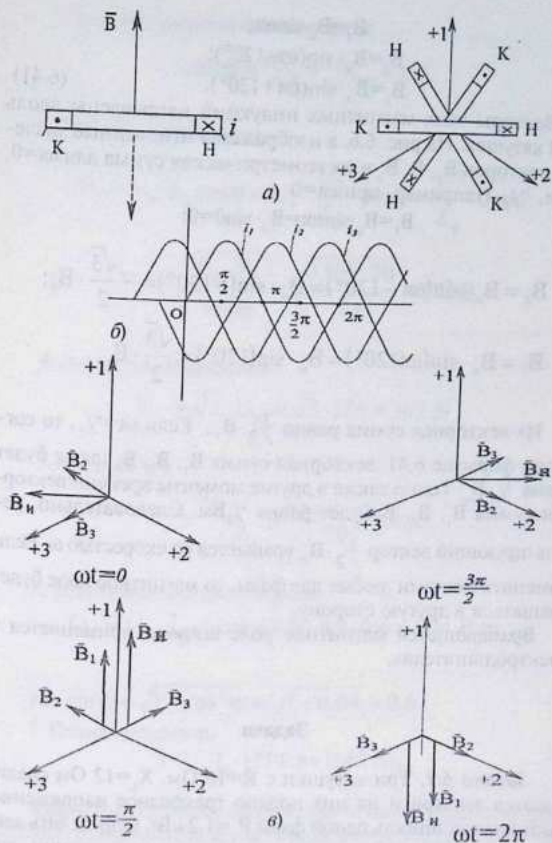


Рис. 6.6. Получение вращающегося магнитного поля:
 а) магнитная индукция пульсирующего магнитного поля;
 б) графики токов трёх одинаковых катушек; в) значения
 результирующего вектора магнитной индукции вращающегося
 магнитного поля для различных моментов времени.

$$\begin{aligned} B_1 &= B_m \cdot \sin \omega t; \\ B_2 &= B_m \cdot \sin(\omega t - 120^\circ); \\ B_3 &= B_m \cdot \sin(\omega t + 120^\circ). \end{aligned} \quad (6.41)$$

Векторы этих магнитных индукций направлены вдоль осей катушек. На рис. 6.6. в изображены мгновенные значения векторов B_1, B_2, B_3 и их геометрическая сумма для $\omega t = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$. Например, при $\omega t = 0$

$$B_1 = B_m \cdot \sin \omega t = B_m \cdot \sin 0 = 0;$$

$$B_2 = B_m \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) = B_m \cdot \sin(-120^\circ) = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_m;$$

$$B_3 = B_m \cdot \sin(\omega t + 120^\circ) = B_m \cdot \sin(120^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_m.$$

Их векторная сумма равно $\frac{3}{2} \cdot B_m$. Если $\omega t = \pi/2$, то согласно формуле 6.41. векторная сумма B_1, B_2, B_3 также будет равна $\frac{3}{2} \cdot B_m$. Точно также в другие моменты времени векторная сумма B_1, B_2, B_3 будет равна $\frac{3}{2} B_m$. Следовательно, результирующий вектор $\frac{3}{2} \cdot B_m$ вращается со скоростью ω . Если поменять местами любые две фазы, то магнитное поле будет вращаться в другую сторону.

Вращающееся магнитное поле широко применяется в электродвигателях.

Задачи

Задача 6.1. Три катушки с $R=16$ Ом, $X_L=12$ Ом соединяются звездой и на них подано трехфазное напряжение. Активная мощность одной фазы $P_\phi=1,2$ кВт. Определить действующие значения линейных и фазных напряжений, ток фазы, реактивную и полную мощность нагрузки.

Решение:

1. Полное сопротивление фазы:

$$Z_\phi = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{16^2 + 12^2} = \sqrt{256 + 144} = 20 \text{ Ом}.$$

2. Коэффициент мощности фазы

$$\cos \varphi = R/Z = 16/20 = 0,8.$$

3. Фазное напряжение

$$P_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi = U_{\phi} \cdot \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} \cdot \cos \varphi = \frac{U_{\phi}^2}{Z_{\phi}} \cdot \cos \varphi;$$

$$U_{\phi} = \sqrt{\frac{P_{\phi} \cdot Z_{\phi}}{\cos \varphi}} = \sqrt{\frac{1200 \cdot 20}{0,8}} = 175 \text{ В}.$$

4. Линейное напряжение

$$U_{\Delta} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi} = \sqrt{3} \cdot 175 = 302 \text{ В}.$$

5. Фазный ток

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = 175/20 = 8,8 \text{ А}.$$

6. Реактивная мощность фазы

$$Q_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \sin \varphi = 175 \cdot 8,8 \cdot 0,6 = 924 \text{ Вар},$$

$$\text{т.к. } \sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \sqrt{1 - 0,64} = 0,6.$$

7. Полная мощность

$$S = U_{\phi} \cdot I_{\phi} = 175 \cdot 8,8 = 1540 \text{ ВА}.$$

Задача 6.2. Линейное напряжение четырехпроводной трехфазной сети равно 220 В. Активная мощность равна: $P_{\Delta} = 3,8$ кВт, $P_{\text{В}} = 2,54$ кВт, $P_{\text{С}} = 0,76$ кВт, $\cos \varphi = 1$. Определить действующее значение тока нейтрального провода.

Решение:

1. Фазное напряжение равно

$$U_{\phi} = U_{\Delta} / \sqrt{3} = 220 / \sqrt{3} = 127 \text{ В}.$$

2. Фазные токи равны:

$$I_A = \frac{P_A}{U_\phi} = \frac{3,8 \cdot 10^3}{127} = 30 \text{ A};$$

$$I_B = \frac{P_B}{U_\phi} = \frac{2,54 \cdot 10^3}{127} = 20 \text{ A};$$

$$I_C = \frac{P_C}{U_\phi} = \frac{0,76 \cdot 10^3}{127} = 6 \text{ A}.$$

Действующее значение тока в нейтральном проводе находим из векторной диаграммы рис. 6.7. $I_N = 22 \text{ A}$.

Задача 6.3. Линейное напряжение четырехпроводной трехфазной сети равно 380 В, частота 50 Гц. К нему подключена нагрузка, соединенная звездой: в фазе А индуктивность с $L_A = 0,2 \text{ Гн}$ и $R_A = 60 \text{ Ом}$, в фазе В $R_B = 70 \text{ Ом}$, в фазе С конденсатор $C = 40 \text{ мкФ}$ и $R_C = 30 \text{ Ом}$. Определить линейные и фазные токи, а также полную мощность.

Решение:

1. Полные сопротивления фаз:

$$Z_A = \sqrt{R_A^2 + X_L^2} = \sqrt{60^2 + (62,8)^2} = 87 \text{ Ом},$$

где

$$X_L = 2\pi f \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,2 = 62,8 \text{ Ом};$$

$$Z_C = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} = \sqrt{30^2 + 80^2} = 85,4 \text{ Ом},$$

где

$$X_C = \frac{1}{2\pi f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = 80 \text{ Ом}.$$

2. Фазное напряжение

$$U_\phi = \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}.$$

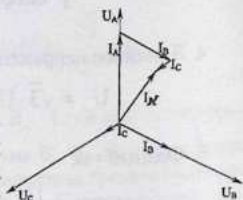


Рис. 6.7. Рисунок к задаче 6.2.

3. Фазные токи

$$I_A = \frac{U_\phi}{Z_A} = \frac{220}{87} = 2,53 \text{ A};$$

$$I_B = \frac{U_\phi}{Z_B} = \frac{220}{70} = 3,14 \text{ A}; \quad I_C = \frac{U_\phi}{Z_C} = \frac{220}{85,4} = 2,57 \text{ A}.$$

4. Активные мощности фаз

$$P_A = I_A^2 \cdot R_A = (2,53)^2 \cdot 60 = 384 \text{ Вт};$$

$$P_B = I_B^2 \cdot R_B = (3,14)^2 \cdot 70 = 690 \text{ Вт};$$

$$P_C = I_C^2 \cdot R_C = (2,57)^2 \cdot 30 = 198 \text{ Вт}.$$

5. Реактивные мощности фаз

$$Q_A = I_A^2 \cdot X_L = (2,53)^2 \cdot 62,8 = 402 \text{ Вар}$$

$$Q_B = 0$$

$$Q_C = (I_C)^2 \cdot X_C = (2,57)^2 \cdot 80 = -530 \text{ Вар}$$

6. Полная активная мощность

$$P = P_A + P_B + P_C = 384 + 690 + 198 = 1272 \text{ Вт}$$

7. Полная реактивная мощность

$$Q = Q_A + Q_C = 402 - 530 = -128 \text{ Вар}$$

8. Полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(1272)^2 + (-128)^2} = 1273 \text{ ВА}.$$

Задача 6.4. Три группы ламп соединены треугольником (в каждой фазе 40 ламп, соединенных параллельно, ток одной лампы $I=0,4 \text{ A}$). Они подключены к трехфазной сети с линейным напряжением $U_\Delta=127 \text{ В}$. Определить фазное напряжение, действующее значение линейного тока, полную мощность и сопротивление фазы.

Решение:

Фазное напряжение равно линейному

$$U_{\phi} = U_{\Delta} = 127 \text{ В.}$$

Сопротивление фазы

$$R_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{I_{\phi}} = \frac{127}{16} = 8 \text{ Ом;}$$

$$I_{\phi} = 40 \cdot 0,4 = 16 \text{ А.}$$

3. Линейный ток

$$I_{\phi} = I_{\phi} \cdot \sqrt{3} = 16 \cdot \sqrt{3} = 27,7 \text{ А.}$$

4. Полная мощность равна активной

$$S = P = 3I_{\phi} \cdot U_{\phi} = 3 \cdot 16 \cdot 127 = 6,1 \text{ кВт.}$$

Задача 6.5. К трехфазной сети с линейным напряжением $U_{\Delta} = 120 \text{ В}$ подключена нагрузка, соединенная треугольником. К фазам АВ и ВС подключены катушки с $R_A = 80 \text{ Ом}$ и $X_L = 140 \text{ Ом}$, к фазе СА подключен резистор с $R_C = 25 \text{ Ом}$ и конденсатор с $X_C = 25 \text{ Ом}$. Определить линейные токи, полные активные и реактивные мощности.

Решение:

1. Полные сопротивление фаз

$$Z_{AB} = Z_{BC} = \sqrt{R_A^2 + X_L^2} = \sqrt{80^2 + 140^2} = 161,2 \text{ Ом;}$$

$$Z_{CA} = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} = \sqrt{25^2 + 25^2} = 35,2 \text{ Ом;}$$

2. Фазные токи равны

$$I_{AB} = I_{BC} = \frac{U_{\phi}}{Z_{AB}} = \frac{U_{\phi}}{Z_{BC}} = \frac{120}{161,2} = 0,74 \text{ А;}$$

$$I_{CA} = \frac{U_{\phi}}{Z_{CA}} = \frac{120}{35,2} = 3,41 \text{ А.}$$

3. Коэффициент мощности

$$\cos \varphi_{AB} = \cos \varphi_{BC} = \frac{R_A}{Z_{AB}} = \frac{80}{161,2} = 0,5;$$

$$\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = 60^\circ;$$

$$\cos \varphi_{CA} = \frac{R_C}{Z_C} = \frac{25}{35,2} = 0,74 \quad \varphi_{CA} = 44^\circ.$$

Таким образом, в фазах АВ и ВС напряжение опережает ток на угол 60° , в фазе СА ток опережает напряжение на угол 44° . Исходя из этого строим векторную диаграмму. Масштабы: для напряжения $1\text{см}=20\text{ В}$, для тока $1\text{см}=1\text{А}$. Из векторной диаграммы находим значения линейных токов (рис. 6.8).

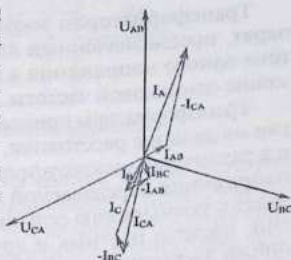


Рис. 6.8. Рисунок к задаче 6.5.

$$I_A = 3,75 \text{ А}, I_B = 1,3 \text{ А}, I_C = 2,75 \text{ А}$$

4. Активная мощность нагрузки

ки

$$P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA} = 44 + 44 + 289 = 377 \text{ Вт},$$

где:

$$P_{BC} = P_{AB} = I_{AB}^2 \cdot R_{AB} = (0,74)^2 \cdot 80 = 44 \text{ Вт};$$

$$P_{CA} = I_{CA}^2 \cdot R_C = (3,41)^2 \cdot 25 = 289 \text{ Вт}.$$

5. Реактивная мощность нагрузки

$$Q = Q_{AB} + Q_{BC} + (-Q_{CA}) = 77 + 77 - 289 = -135 \text{ Вар}$$

$$\text{где } Q_{AB} = Q_{BC} = (I_{AB})^2 \cdot X_L = (0,74)^2 \cdot 140 = 77 \text{ Вар};$$

$$Q_{CA} = (I_{CA})^2 \cdot X_C = -(3,41)^2 \cdot 25 = -289 \text{ Вар}.$$

6. Полная мощность нагрузки

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{377^2 + (-135)^2} = 400 \text{ ВА}.$$

ГЛАВА 7

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформатором называется электростатический аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения одинаковой частоты.

Трансформаторы применяются для передачи электроэнергии на дальние расстояния, распределения ее потребителям и в различных электроустройствах. С увеличением величины напряжения передаваемой мощности ток уменьшается. Это ведет к уменьшению сечения проводов, потерь электроэнергии, расхода цветных и других металлов на строительство линий электропередачи. Поэтому на электростанциях напряжение повышается при помощи трансформаторов и подается на линию электропередачи. В местах потребления напряжение линии электропередачи понижается при помощи трансформаторов до необходимого значения и подается на потребители.

Основные виды трансформаторов.

1. *Трехфазные и однофазные силовые трансформаторы* применяются для передачи электроэнергии на дальние расстояния и распределения ее между потребителями.

2. *Автотрансформаторы* — предназначены для изменения в небольших пределах напряжения потребителя или увеличения напряжения, начиная от нуля.

3. *Измерительные трансформаторы* — используются для измерения высоких напряжений и больших токов обычными приборами.

4. *Сварочные трансформаторы.*

7.1. Устройство и принцип работы трансформаторов

Любой трансформатор состоит из сердечника и обмоток (рис. 7.1). Ферромагнитный сердечник является магнитной

системой трансформатора, т.е. считается его магнитопроводом. Ферромагнитный сердечник уменьшает магнитное сопротивление контура, по которому проходит магнитный поток и усиливает электромагнитную связь между обмотками.

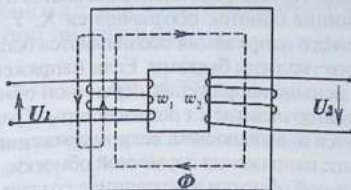


Рис. 7.1. Схема устройства трансформаторов.

Сердечники изготавливаются из тонких листов электро-технической стали или из стальной ленты. С целью уменьшения потерь электроэнергии из-за вихревых токов их толщина берется 0,35 или 0,5 мм. Для взаимной изоляции друг от друга листы с обеих сторон покрываются лаком. Величина вихревых токов, возникающих в листах, небольшая и поэтому сердечник не перегревается.

Сердечники однофазных трансформаторов бывают стержневые, кольцевые и броневые (рис. 7.2). В стержневых трансформаторах обмотки располагаются на двух стержнях, а в броневых — на среднем стержне. На сердечнике трансформатора рис. 7.1. расположены две обмотки (w_1 и w_2). Обмотка w_1 , подключаемая к источнику электроэнергии, называется первичной обмоткой. Обмотка w_2 , передающая электроэнергию потребителю, назы-

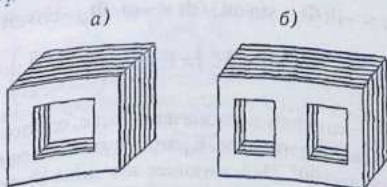


Рис. 7.2. Сердечники трансформаторов: а) стержневой сердечник; б) броневой сердечник.

вается вторичной обмоткой. В стержневых трансформаторах первичная и вторичная обмотки делятся на две одинаковые части, которые располагаются на обоих стержнях.

В броневом трансформаторе обе обмотки располагаются на среднем стержне. Начало обмоток обозначаются буквами А, В, С и а, б, с, концы обмоток обозначаются X, Y, Z и x, y, z. Обмотки высокого напряжения обозначаются большими буквами, а низкого — малыми буквами. Если напряжение вторичной обмотки меньше напряжения первичной обмотки, то такой трансформатор называется понижающим. Трансформатор будет называться повышающим, если напряжение вторичной обмотки больше напряжения первичной обмотки.

Ток первичной обмотки в сердечнике создает магнитный поток. Этот поток пересекает обе обмотки и создает в них переменную э.д.с. Поэтому вторичную обмотку можно считать источником переменной э.д.с. В соответствии с законом электромагнитной индукции (закон Фарадея) между концами проводника, движущегося в магнитном поле, появляется э.д.с. При этом безразлично, движется проводник или изменяется магнитное поле. В трансформаторе проводники неподвижны. Поэтому для появления в них эдс необходимо, чтобы изменялось магнитное поле. Значит, трансформаторы можно использовать только в цепях переменного тока. В соответствии с законом электромагнитной индукции э.д.с., наводимая в одном витке (формула 2.43), равна

$$e = -d\Phi/dt;$$

мгновенное значение магнитного потока

$$\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t,$$

где Φ_m — амплитудное значение магнитного потока

$$\begin{aligned} e &= -d(\Phi_m \cdot \sin \omega t)/dt = -\omega \cdot \Phi_m \cdot \cos \omega t = \\ \text{Поэтому} \quad \omega \cdot \Phi_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) &= E_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (7.1.)$$

где $E_m = \omega \cdot \Phi_m$ — амплитудное значение э.д.с. одного витка. Из формулы 7.1. видно, что э.д.с. E_m отстает по фазе от магнитного потока на угол 90° . Действующее значение этой э.д.с.

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{\omega \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot \Phi_m \cdot f. \quad (7.2)$$

Так как первичная и вторичная обмотки имеют w_1 и w_2 витков, то их э.д.с.

$$\begin{aligned} E_1 &= 4,44 w_1 \cdot f \cdot \Phi_m; \\ E_2 &= 4,44 w_2 \cdot f \cdot \Phi_m. \end{aligned} \quad (7.3)$$

Отношения э.д.с. или число витков обмоток называется коэффициентом трансформации

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (7.4)$$

Для понижающих трансформаторов $w_1 > w_2$ и $k > 1$, для повышающих — $w_1 < w_2$ и $k < 1$.

7.2. Холостой ход однофазного трансформатора

Работа трансформатора при отключенной нагрузке во вторичной обмотке называется холостым ходом.

При этом вторичная обмотка оказывается разомкнутой (рис. 7.3. а). Поэтому ток вторичной обмотки $I_2 = 0$. Холостой ход трансформатора аналогичен работе цепи с индуктивностью, подключенной на переменное напряжение. По первичной обмотке течет ток, называемый током холостого хода I_x . Он создает намагничивающую силу $w_1 \cdot I_x$ первичной обмотки. Эта сила создает магнитный поток Φ , который состоит из двух составляющих. Первая, основная составляющая, замыкается по магнитопроводу, сцепляется как с первичной, так и со вторичной обмотками и наводит в них э.д.с. (формулы 7.3). Вторая составляющая замыкается по воздуху и называется потоком рассеяния. Она сцепляется только с первичной обмоткой и создает в ней э.д.с. рассеяния E_{1p}

$$E_{1p} = I_x \cdot X_1, \quad (7.5)$$

где X_1 — индуктивное сопротивление первичной обмотки. Активное напряжение определяется падением напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки

$$U_{ax} = I_x \cdot R_1. \quad (7.6)$$

На холостом ходу напряжение вторичной обмотки равно ее э.д.с., т.е. $U_2 = E_2$.

Таким образом, напряжение, поданное на трансформатор уравнивается э.д.с. E_1 и падениями напряжения на индуктивном и активном сопротивлениях первичной обмотки:

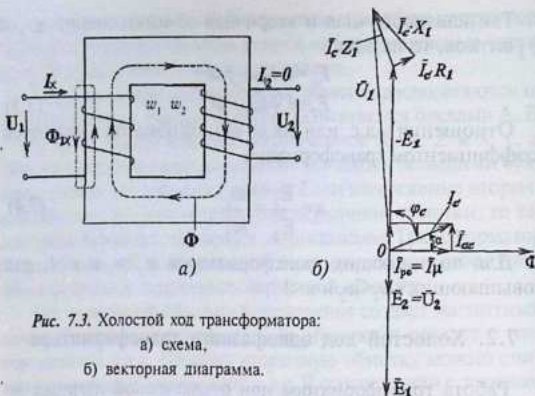


Рис. 7.3. Холостой ход трансформатора:
а) схема,
б) векторная диаграмма.

$$U_1 = E_1 + I_1 \cdot X_1 + I_1 \cdot R_1. \quad (7.7)$$

Исходя из этого уравнения, а также из того, что $U_2 = E_2$ и эдс обмоток отстают по фазе от магнитного потока на угол 90° , строим векторную холостого хода (рис. 7.3 б). Первым в масштабе в любом направлении, например, в горизонтальном, чертим вектор магнитного потока Φ . Ток холостого хода состоит из активной и реактивной составляющих. Активная составляющая I_{ax} определяется активной мощностью, которая расходуется на гистерезис и вихревые токи. Реактивная составляющая I_{px} является намагничивающим током. Он создает магнитный поток и совпадает с ним по фазе. На векторной диаграмме вектор этого тока чертим в направлении вектора магнитного потока. Активная составляющая I_{ax} тока холостого хода чертится под углом 90° к I_{px} . Исходя из векторной диаграммы ток холостого хода можно определить по формуле:

$$I_x = \sqrt{I_{ax}^2 + I_{px}^2}. \quad (7.8.)$$

Так как $\bar{E}_1$ и $\bar{E}_2$ отстают от Φ_m на 90° , то их векторы направляем вниз под углом 90° .

Вектор падения напряжения $\bar{I}_x \cdot R_1$ на активном сопротивлении первичной обмотки чертим от конца ($-E_1$) в направлении $\bar{I}_x$. Вектор падения напряжения $\bar{I}_x \cdot X_1$ на индуктивном сопротивлении первичной обмотки чертим от конца $\bar{I}_x \cdot R_1$ в направлении, перпендикулярном $\bar{I}_x$. Сложив векторы находим вектор полного падения напряжения $\bar{I}_x \cdot Z_1$ на первичной обмотке. Таким образом, напряжение U_1 , поданное на трансформатор, определяется векторной суммой $-\bar{E}_1$ и $\bar{I}_x \cdot Z_1$. Для получения вектора U_1 надо соединить конец вектора $\bar{I}_x \cdot Z_1$ с точкой О. Ток холостого хода небольшой и составляет 3–5% номинального тока. Поэтому потери мощности на нагрев первичной обмотки можно не учитывать. Мощность сети на холостом ходу практически полностью расходуется на создание гистерезисных и вихревых токов в сердечнике.

$$P_x = P_c + I_x^2 \cdot R_1 = P_c, \quad (7.9)$$

где P_c — потери в сердечнике.

7.3. Работа трансформатора под нагрузкой

При подключении нагрузки во вторичной цепи появится ток I_2 (рис. 7.4 а). Согласно принципу Ленца этот ток препятствует изменению магнитного потока сердечника трансформатора. Если ток I_1 направлен от начала к концу первичной обмотки, то ток I_2 будет направлен от конца к началу вторичной обмотки.

При увеличении I_2 соответственно растет I_1 . Магнитный поток создается совместным действием намагничивающих сил

$$\bar{F}_1 = I_1 \cdot w_1 \quad \text{и} \quad \bar{F}_2 = I_2 \cdot w_2, \quad \text{т.е.} \quad (7.10)$$

$$\bar{F}_1 + \bar{F}_2 = \bar{F}_c,$$

где $\bar{F}_c = I_x \cdot w_1$ — намагничивающая сила холостого хода.

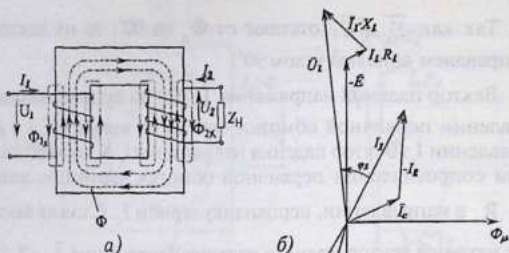


Рис. 7.4. Работа трансформатора под нагрузкой:
а) схема, б) векторная диаграмма.

$\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ — намагничивающие силы первичной и вторичной обмоток.

Согласно формуле 7.3. э.д.с. E_1 пропорциональна Φ_m . В трансформаторах даже при номинальном токе $I_1 = I_{\text{н}}$ первичной обмотки падение напряжения на ней составляет 2–2,5% и его можно не принимать во внимание. Поэтому, если первичное напряжение $U_1 = U_{\text{н}}$ и не изменяется в процессе работы, то можно считать, что магнитный поток Φ_m и намагничивающая сила F также не изменяются.

Кроме основного магнитного потока Φ_m в первичной и вторичной обмотках появляются потоки рассеяния Φ_{1p} и Φ_{2p} . Эти потоки определяются токами I_1 и I_2 и совпадают с ними по фазе. Потоки рассеяния Φ_{1p} и Φ_{2p} создают в обмотках э.д.с. рассеяния E_{1p} и E_{2p} , которые отстают на 90° от своих потоков.

$$X_1 \cdot I_1 = -E_{1p} \quad \text{и} \quad X_2 \cdot I_2 = -E_{2p}, \quad (7.11)$$

где $X_1 = \omega L_{1p}$, $X_2 = \omega L_{2p}$ — реактивные сопротивления рассеяния обмоток;

$L_{1p} = \Psi_{1p} / I_1$, $L_{2p} = \Psi_{2p} / I_2$ — индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток;

Ψ_{1p} , Ψ_{2p} — потокосцепления рассеяния первичной и вторичной обмоток.

Первичная обмотка трансформатора работает в режиме потребителя. Согласно второму закону Кирхгофа можно написать:

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 \cdot X_1 + \bar{I}_1 \cdot R_1, \quad (7.12)$$

где $I_1 \cdot R_1$, $I_1 \cdot X_1$ — активное и индуктивное падения напряжения на первичной обмотке.

Вторичная обмотка трансформатора работает в режиме генератора. Согласно второму закону Кирхгофа можно написать:

$$\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - \bar{I}_2 \cdot X_2 - \bar{I}_2 \cdot R_2, \quad (7.13)$$

где $\bar{I}_2 \cdot R_2$, $\bar{I}_2 \cdot X_2$ — активное и индуктивное падения напряжения на вторичной обмотке.

Падения напряжения в обмотках малы. Поэтому на практике их можно не учитывать. В этом случае:

$$U_1 = -E_1 \text{ и } U_2 = E_2. \quad (7.14)$$

На рис. 7.4 б приведена векторная диаграмма нагруженного трансформатора.

Если не принимать во внимание намагничивающая сила F_λ холостого хода, то:

$$\bar{F}_1 = \bar{F}_2 \text{ или } I_1 \cdot w_1 = I_2 \cdot w_2, \quad (7.15)$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{K}. \quad (7.16)$$

С увеличением тока вторичной обмотки происходит следующее.

1. Падение напряжения на вторичной обмотке увеличивается. Это ведет к уменьшению напряжения U_2 вторичной обмотки (однако, при емкостной нагрузке U_2 может и увеличиться).

2. Увеличиваются ток I_1 и падение напряжения в первичной обмотке. Если напряжение сети U не изменяется, то это может привести к уменьшению E_1 (формула 7.12). Это может быть только за счет уменьшения магнитного потока Φ_m . Однако, изменение магнитного потока Φ_m от холостого хода до номинальной нагрузки будет небольшим. Поэтому режим работы трансформатора не нарушается.

Процентное изменение напряжения от холостого хода до номинального напряжения равно:

$$\Delta U\% = \frac{U_{2x} - U_{2н}}{U_{2x}} \cdot 100\% , \quad (7.17)$$

где U_{2x} — напряжения холостого хода вторичной обмотки;
 $U_{2н}$ — напряжение вторичной обмотки при номинальной нагрузке.

7.4. Режим короткого замыкания трансформатора

В трансформаторах различают опыт короткого замыкания и аварийный режим короткого замыкания. На рис. 7.5 приведена схема проведения опыта короткого замыкания. Для проведения этого опыта вторичная обмотка замыкается очень маленьким сопротивлением или амперметром. На первичной обмотке напряжение при помощи автотрансформатора медленно повышается начиная от нуля. Даже при незначительном напряжении первичной обмотки токи в обмотках будут значительными. При известном напряжении токи обмоток достигают номинальных значений, т.е. $I_{1к} = I_{1н}$, $I_{2к} = I_{2н}$. Это напряжение первичной обмотки называется напряжением короткого замыкания U_k . Для силовых трансформаторов напряжение короткого замыкания считается важным параметром и указывается в его паспорте. С увеличением мощности и напряжения трансформатора растет напряжение короткого замыкания. В режиме короткого замыкания магнитный поток по сравнению с нормальным режимом будет очень маленьким и сердечник будет ненасыщенным. Вследствие этого мощность потерь в сердечнике будет очень

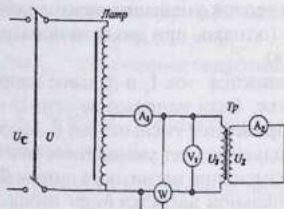


Рис. 7.5. Схема опыта короткого замыкания.

маленькой и в большинстве случаев в расчет не принимается. В этом режиме коэффициент полезного действия трансформатора равен нулю. Потери мощности в обмотках расходуются на их нагрев. Мощность, получаемая трансформатором от сети называется мощностью короткого замыкания:

$$P_k = P_o + P_c, \quad (7.18)$$

где P_o — потери мощности на нагрев обмоток; P_c — потери в сердечнике.

Из опыта короткого замыкания определяются следующие параметры:

а) относительное напряжение короткого замыкания:

$$U_k \% = \frac{U_k}{U_{1n}} \cdot 100\%, \quad (7.19)$$

где U_k — номинальное напряжение короткого замыкания; U_{1n} — номинальное напряжение первичной обмотки.

б) полное сопротивление:

$$Z_k = U_k / I_{1n} \text{ Ом}; \quad (7.20)$$

в) активное сопротивление:

$$R_k = P_c / I_{1n}^2 \text{ Ом}; \quad (7.21)$$

г) реактивное сопротивление:

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \text{ Ом}. \quad (7.22)$$

При аварийном коротком замыкании напряжение первичной обмотки равно номинальному напряжению. Поэтому в обмотках трансформатора возникают большие токи короткого замыкания, которые могут привести к его перегоранию.

7.5. Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициентом полезного действия трансформатора называется отношение мощности P_2 , передаваемой нагрузке, к мощности P_1 , получаемой от сети:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_c + P_o} \cdot 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_k} \cdot 100\%, \quad (7.23)$$

где $P_x = P_c$ — мощность потерь в сердечнике (определяется из опыта холостого хода); $P_o = P_k$ — мощность потерь на нагрев обмоток (определяется из опыта короткого замыкания).

Для любой нагрузки коэффициент полезного действия определяется по следующей формуле:

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_{2H} \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{2H} \cdot \cos \varphi_2 + P_x + \beta^2 \cdot P_o}, \quad (7.24)$$

где $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$ — коэффициент нагрузки.

$S_2 = U_{2H} \cdot I_{2H}$ — номинальная мощность трансформатора, В·А; $\cos \varphi_2$ — коэффициент мощности вторичной обмотки. Так как мощность потерь на нагрев обмоток пропорциональна квадрату тока, то в формуле 7.24. написано, что $P_k = \beta^2 \cdot P_o$. Наибольшее значение КПД соответствует нагрузке, при которой потери в сердечнике равны потерям на нагрев обмоток, т.е.

$$P_x = \beta^2 \cdot P_o \text{ или } \beta_n = \sqrt{P_x / P_o}. \quad (7.25)$$

В мощных трансформаторах КПД может достигать 96–99%. В маломощных трансформаторах (несколько ватт) КПД составляет 50–70%.

7.6. Трехфазные трансформаторы

Преобразование трехфазного напряжения можно осуществлять тремя однофазными трансформаторами, соединенными в одну трансформаторную группу (рис. 7.6 а) или

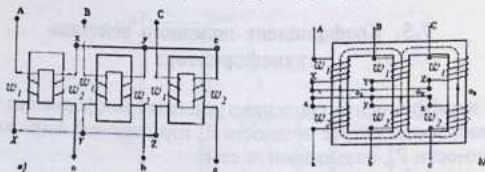
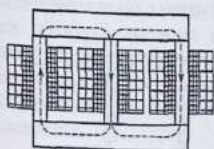


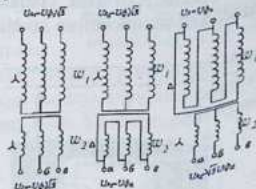
Рис. 7.6. Трехфазные трансформаторы: а) трехфазный трансформатор, созданный соединением трех однофазных трансформаторов;

б) трехфазный трансформатор.

одним трехфазным трансформатором (рис. 7.6. б). Из-за того, что размеры, вес и стоимость трех однофазных трансформаторов весьма велики, то такая группа может применяться на подстанциях большой мощности. Их магнитная система не взаимосвязана. На практике в трехфазных трансформаторах применяется трехстержневой ферромагнитный сердечник. На рис. 7.6. б показан двухобмоточный трехфазный трансформатор. На каждом стержне располагаются обмотки одной фазы. При этом обмотка пониженного напряжения располагается ближе к стержню (рис. 7.7. а). Первичная и вторичная обмотки могут соединяться в звезду (Y) или треугольник (Δ) (рис. 7.7.б). В большинстве случаев применяются три схемы: звезда-звезда с ну-



а)



б)

Рис. 7.7. Схема расположения обмоток трехфазного трансформатора (а) и их соединений (б)

лем (Y/Y₀), звезда-треугольник (Y/Δ), звезда с нулем — треугольник (Y₀/Δ). В этих обозначениях обмотки повышенного напряжения показаны в числителе, а обмотки пониженного напряжения — в знаменателе. После схемы соединения в виде цифр, например, Y/Y-12, Y/Δ-11 цифры 12 и 11 означают, что углы между векторами первичных и вторичных линейных э.д.с. равны углам между часовой и минутной стрелками часов в указанное время. При цифре 12 угол сдвига равен 0°, а при 11 — угол сдвига равен 30°. Значение группы соединений необходимо при параллельном соединении трансформаторов.

7.7. Измерительные трансформаторы

Для обеспечения безопасности при работе с измерительными приборами в высоковольтных цепях, расширения пределов измерения применяются измерительные трансформаторы.

Трансформатор напряжения (рис. 7.8)

Устройство и принцип работы трансформатора напряжения аналогичны рассмотренному ранее однофазному трансформатору. Первичная обмотка состоит из большого числа витков и к ней подключается высокое напряжение (рис. 7.8 а). Вторичная обмотка имеет небольшое число витков и к ней подключаются приборы с высоким внутренним сопротивлением (например, вольтметр, обмотки напряжения ваттметров и счетчиков). Поэтому по вторичной обмотке протекает небольшой ток. Следовательно, трансформатор напряжения как однофазный силовой трансформатор работает в режиме холостого хода. Трансформатор напряжения понижает высокое напряжение до 100 вольт.

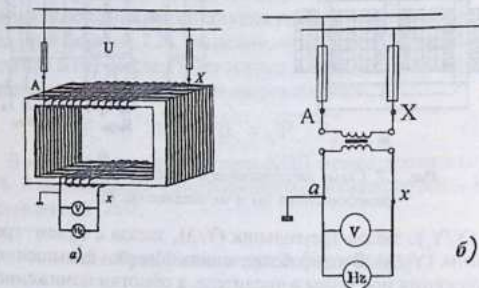


Рис. 7.8. Трансформатор напряжения: а) упрощенный вид; б) схема электрических соединений.

Поэтому к вторичной обмотке подключается вольтметр на 100 вольт. При этом первичное напряжение равно:

$$U_1 = K_u \cdot U_2, \quad (7.26)$$

где K_u — коэффициент трансформации

Трансформаторы напряжения бывают однофазными и трехфазными. Схема подключения однофазного трансформатора показана на рис. 7.8.б.

Для безопасности обслуживания вторичная обмотка трансформатора тщательно изолируется от первичной и заземляется с целью получения достаточно низкого напряжения от-

носителем земли. На рис. 7.9 показан измерительный трансформатор на 15 кВ.

Трансформатор тока

Трансформаторы тока применяются для измерения больших переменных токов. Их первичная обмотка состоит из одного-двух витков толстого провода, шины или является частью толстого проводника. Подключается первичная обмотка последовательно с нагрузкой. Вторичная обмотка состоит из большого числа витков, рассчитывается на 5 ампер (иногда на 10 ампер) и подключается параллельно амперметру, токовым обмоткам ваттметров, счетчиков (рис. 7.10). Коэффициент трансформации

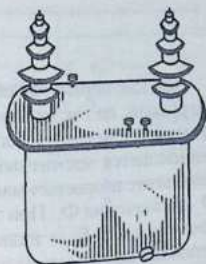


Рис. 7.9. Трансформатор напряжения на 15 кВ.

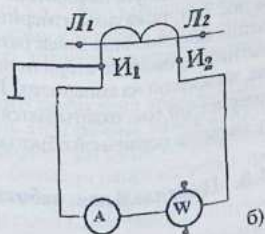
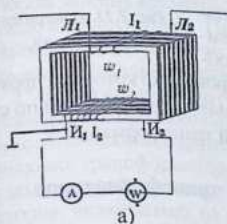


Рис. 7.10. Трансформатор тока: а) упрощенный вид; б) схема электрических соединений.

$$K_1 = \frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Если сопротивления соединительных проводов и приборов не превышают допустимых для трансформатора значений, то K_1 будет иметь постоянное значение и

$$I_1 = \frac{I_2}{K_1}.$$

Так как первичная обмотка подключена последовательно с нагрузкой, ее ток не зависит от тока вторичной обмотки. Поэтому с увеличением сопротивления цепи ток I_2 уменьшается, уменьшается магнитный поток Φ_2 и в результате возрастает магнитный поток Φ_m до значения Φ_1 . При этом резко возрастает э.д.с. E_2 и тепловые потери в сердечнике, что может привести к пробоя изоляции и представляет опасность для обслуживающего персонала. Поэтому при протекании тока по первичной обмотке нельзя разрывать цепь вторичной обмотки. Вторичная обмотка должна быть подключена к измерительному прибору или замкнута накоротко.

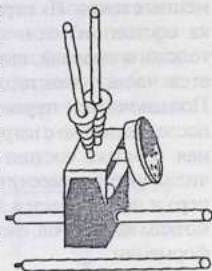


Рис. 7.11. Измерительные клещи.

На рис 7.11. показаны измерительные клещи, выполненные в виде разъемного магнитопровода со вторичной обмоткой, замкнутой на амперметр. Провод, по которому проходит измеряемый ток, охватывается магнитопроводом и по существу является первичной обмоткой трансформатора.

7.8. Параллельная работа трансформаторов

Для непрерывного обеспечения электроэнергией потребителей при изменении нагрузки в широких пределах возникает необходимость параллельной работы трансформаторов. На рис 7.12 показаны два параллельно соединенных однофазных трансформатора. Для параллельной работы трансформаторов необходимо выполнить следующие условия:

1. Напряжения первичных и вторичных обмоток трансформаторов, соединяемых параллельно, должны быть равны. При этом коэффициенты трансформации трансформаторов будут также равны. Если коэффициенты трансформации параллельно работающих трансформаторов будут разными, то

вторичные э.д.с. их будут также разными, в результате во вторичной замкнутой цепи появятся уравнивающие токи. Токи обмоток трансформаторов будут равны векторной сумме уравнивающих токов и токов нагрузки. При этом трансформатор с меньшим коэффициентом трансформации будет больше нагружен и может перегреться. Чтобы не допустить этого разница между коэффициентами трансформации должна быть не более 0,5%.

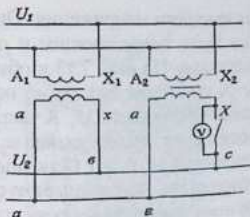


Рис. 7.12. Схема параллельного подключения однофазных трансформаторов.

На рис. 7.12 вольтметр соединен между одноименными концами вторичных обмоток трансформаторов. Если коэффициенты трансформации трансформаторов будут равны друг другу, то э.д.с. вторичных обмоток также будут равны. Однако, в любой момент времени эти э.д.с. будут направлены противоположно друг другу. Поэтому в момент, когда показание вольтметра будет равно нулю, трансформаторы можно включать на параллельную работу.

2. Напряжения короткого замыкания трансформаторов должны быть одинаковыми. При разных напряжениях короткого замыкания трансформаторы будут нагружены неодинаково: трансформатор с большим напряжением короткого замыкания будет нагружен меньше. Поэтому у трансформаторов, включаемых на параллельную работу, напряжения короткого замыкания не должны отличаться друг от друга более чем на 10%.

3. Для параллельной работы трехфазных трансформаторов кроме выполнения условий первого и второго пунктов необходимо, чтобы у них были одинаковые группы соединений. Только при выполнении этого условия вторичные напряжения U_2 будут совпадать по фазе.

7.9. Автотрансформаторы

Автотрансформатором называется трансформатор, у которого обмотка низшего напряжения является частью обмот-

ки высшего напряжения. Он может быть повышающим и понижающим. На рис. 7.13 к обмотке А-Х с числом витков w_1 подводится напряжение U_1 . К части обмотки а-х с числом витков w_2 подключается нагрузка. Основные соотношения, выведенные для однофазных трансформаторов справедливы и для автотрансформаторов. На холостом ходу отношение первичного напряжения к вторичному напряжению равно отношению обмоток w_1 и w_2 , т.е. коэффициенту трансформации.

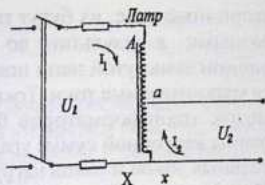


Рис. 7.13. Схема однофазного автотрансформатора.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = K. \quad (7.27)$$

Токи I_1 и I_2 сдвинуты по фазе на 180° и направлены в противоположные стороны. Поэтому по части обмотки а-х, которая является общей для первичной и вторичной цепей проходит ток, равный

$$I = I_2 - I_1. \quad (7.28)$$

Следовательно, эту часть обмотки можно выполнять из провода меньшего сечения.

В автотрансформаторах передача мощности от источника электрической энергии в нагрузку происходит электрическим и электромагнитным путем. Поэтому габариты и масса автотрансформатора меньше, чем у трансформатора той же мощности. Будут уменьшенными также электрические и магнитные потери, что ведет к повышению КПД.

Автотрансформаторы могут быть и трехфазными, обмотки которых соединяют в звезду.

В лабораторных условиях для плавного регулирования напряжения от нуля до подводимого значения, и даже несколько выше применяется лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), внешний вид которого показан на рис 7.14. В нем регулирование напряжения осуществляется при перемещении скользящего контакта по виткам обмотки.

Общим недостатком автотрансформаторов является наличие электрической связи между первичной и вторичной

цепями, что ведет к следующим недостаткам: большой ток короткого замыкания, необходимость выполнения изоляции обмоток на повышенное напряжение, опасность приложения высокого напряжения к обмотке низшего напряжения, что может привести к поражению током обслуживающего персонала.

7.10. Сварочные трансформаторы

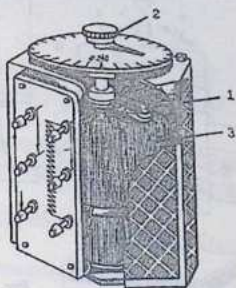


Рис. 7.14. Общий вид лабораторного автотрансформатора: 1, 2-ролик с держателем; 3-обмотка.

Трансформаторы, применяемые для сварки, являясь специальным аппаратом, применяются также для резки и плавления металлов электрической дугой. Напряжение вторичной обмотки этих трансформаторов равно 60—70 вольт, что легко позволяет создавать электрическую дугу. Они должны удовлетворять следующим требованиям: при подключении нагрузки ток практически не должен изменяться, при коротком замыкании рабочий ток не должен более чем на 40% превышать нормальный ток, легко регулировать сварочный ток.

Даже небольшое увеличение сварочного тока должно быть причиной резкого уменьшения вторичного напряжения (напряжения вторичной обмотки). Для уменьшения выходного напряжения надо увеличивать падение напряжения в обмотках трансформатора. Для этого надо увеличивать сопротивление обмоток трансформатора. Однако, увеличивать сопротивление обмоток нельзя, так как это увеличивает активные потери электроэнергии и перегрев трансформатора. Поэтому сварочные трансформаторы изготавливаются с регулируемым индуктивным сопротивлением обмоток. На рис. 7.15 показаны общий вид, схема и внешняя характеристика сварочного трансформатора СТН-500. Первичная обмотка рассчитана на 220 или 380 вольт. Напряжение вторичной обмотки на холостом ходу равно 60 вольт, а при нагрузке — 30 вольт. Магнитопровод состоит из основной и дополнительных частей. На основном сердечнике расположены первичная

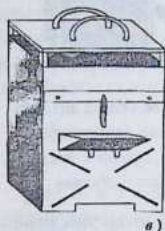
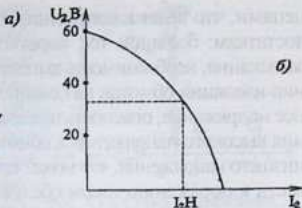
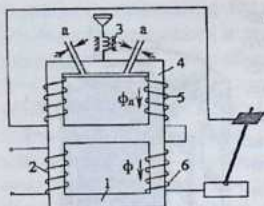


Рис. 7.15. Сварочный трансформатор СТН-500: а) схема соединений: 1-основной сердечник; 2-первичная обмотка; 3-винт; 4-дополнительный сердечник; 5-реактивная катушка; 6-вторичная обмотка; б) внешняя характеристика; в) общий вид.

вторичная обмотки. Дополнительный сердечник состоит из подвижной и неподвижной частей. Двигая при помощи винта подвижную часть, можно устанавливать необходимый воздушный зазор. Изменение воздушного зазора приводит к изменению индуктивного сопротивления реактивной катушки. Чем больше воздушный зазор a , тем больше сварочный ток.

На практике применяют также другие способы изменения индуктивного сопротивления. Например, в сварочных трансформаторах СТАН и СТШ между первичной и вторичной обмотками расположен подвижный стержень (магнитный шунт). Шунт, замыкая магнитные потоки обмотки, создает магнитные потоки рассеяния. В результате увеличивается индуктивное сопротивление обмоток (рис. 7.16).

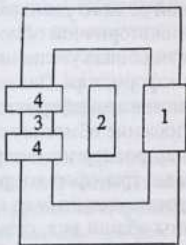


Рис. 7.16. Сварочные трансформаторы СТАН и СТШ: 1-реактивная катушка; 2-магнитный шунт; 4-первичная обмотка.

7.11. Расчет трансформаторов

1. Исходные параметры расчета:

а) напряжение сети переменного тока U_1 , В и частота f , Гц;

б) напряжения вторичных обмоток $U_2, U_3, \dots, U_n$ и токи $I_2, I_3, \dots, I_n$;

в) максимальная температура окружающей среды $T_{\text{окр. макс.}}$ °С; максимальная температура нагрева трансформатора $T_{\text{т. макс.}}$ °С.

2. Определяем габаритную (потребляемую нагрузкой) мощность P_r , В·А:

а) в общем случае и для однофазного мостового выпрямителя:

$$P_r = U_2 \cdot I_2 + U_3 \cdot I_3 + \dots + U_n \cdot I_n \quad (7.29)$$

б) для однополупериодного выпрямителя

$$P_r = 0,95 U_2 \cdot I_2 + U_3 \cdot I_3 + \dots + U_n \cdot I_n \quad (7.30)$$

в) для двухполупериодного выпрямителя с выводом нулевой точки:

$$P_r = 1,7 \cdot U_2 \cdot I_2 + U_3 \cdot I_3 + \dots + U_n \cdot I_n \quad (7.31)$$

В соответствии с частотой сети (50 Гц или 400 Гц) из табл. 7.1. находим следующие параметры:

а) марку стали сердечника трансформатора и соответствующую ему магнитную индукцию B , Тл;

б) плотность тока δ , А/мм²;

в) коэффициент полезного действия η ;

г) коэффициент заполнения окна медью K_m ;

д) из табл. 7.2. в соответствии с выбранным типом магнитопровода определяем коэффициент заполнения магнитопровода сталью K_c (рис. 7.17).

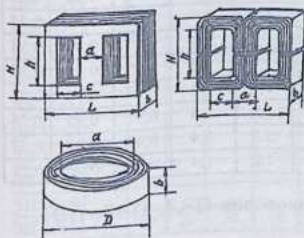


Рис. 7.17. Типовые магнитопроводы: а) броневые из штампованных пластин; б) броневые ленточные; в) тороидальные ленточные.

3. Находим исходную расчетную величину

$$S_c \cdot S_o = \frac{P_r \cdot 10^2}{1,11 \left(1 + \frac{1}{\eta}\right) \cdot f \cdot B \cdot \delta \cdot K_u \cdot K_c} \text{ см}^4, \quad (7.32)$$

где S_c – сечение стержня, мм²;

S_o – сечение окна сердечника, мм².

Таблица 7.1

Рекомендуемые значения B , δ , η , K_m

Р, В·А	Индукция в Тл				δ, А/мм²		η		Км
	для марок стали				50 Гц	400 Гц	50 Гц	400 Гц	
	1511	Э411	Э1521	Э1421					
	1512	Э412	Э1561	Э1422					
	1513	Э413	Э1562	Э1423					
	50 Гц		400 Гц						
10	1,1	1,2	1,0	1,15	4,8	7,2	0,85	0,78	0,22
20	1,26	1,4	1,08	1,23	3,9	6,0	0,89	0,83	0,26
40	1,37	1,55	1,13	1,47	3,2	5,0	0,92	0,86	0,28
70	1,39	1,6	1,14	1,51	2,8	4,2	0,94	0,88	0,3
100	1,35	1,6	1,12	1,5	2,5	3,8	0,95	0,9	0,31
200	1,25	1,51	1,02	1,4	2,0	3,1	0,96	0,92	0,32
400	1,13	1,43	0,92	1,3	1,6	2,5	0,97	0,94	0,33
700	1,05	1,35	0,83	1,2	1,3	2,1	0,97	0,95	0,34
1000	1,0	1,3	0,78	1,15	1,2	1,8	0,97	0,95	0,35
2000	0,9	1,2	0,68	1,05	1,1	1,5	0,97	0,95	0,36
4000	0,8	1,1	0,58	0,95	1,0	1,5	0,97	0,95	0,36
7000	0,72	1,02	0,5	0,87	1,0	1,4	0,97	0,95	0,37
10000	0,68	0,97	0,45	0,82	1,0	1,4	0,97	0,95	0,37

Значение K_m даны для проводов ПЭЛ, ПЭВ, ПЭТ.

Таблица 7.2

Рекомендуемые значения K_c

Марка стали	Толщина листа или ленты, мм	K _c для магнитопроводов	
		из пластин	ленточного
50 Гц			
1511, 1512, 1513	0,5	0,93	0,97
Э411 Э412 Э413	0,35	0,89	0,95
400 Гц			
1521, 1561, 1562	0,20,1	0,32-	0,930,88
Э421, Э422, Э423	0,05	-	0,75

Таблица 7.3

Броневые магнитопроводы из штампованных пластин

Обозначение	Размеры, мм						Площадь сечения стержня S_c , см ²	Сред- няя длина магнит- ной си- ловой линии, l_m , см	$S_c \cdot S_0$ см ⁴
	a	c	h	H	L	b			
Ш 9x9	9	9	22,5	31,5	36	9	0,74	7,72	1,62
Ш 9x12						12	0,98		2,16
Ш 12x10	12	12	30	42	48	10	1,09	10	4,30
Ш 12x12						12	1,31		5,20
Ш 12x16						16	1,75		6,80
Ш 12x20						20	2,18		8,60
Ш 12x25						25	2,73		10,80
Ш 12x32						32	3,49		13,70
Ш 16x10	16	16	40	56	64	10	1,31	13,7	10,2
Ш 16x12						12	1,75		12,1
Ш 16x16						16	2,33		16,6
Ш 16x20						20	2,91		20,5
Ш 16x25						25	3,64		25,6
Ш 16x32						32	4,66		32,6
Ш 16x40						40	5,82		41,0
Ш 20x12	20	20	50	70	80	12	2,18	17,14	24,0

Ш 20x16						16	2,91		32,0
Ш 20x20						20	3,64		40,0
Ш 20x25						25	4,55		50,0
Ш 20x32						32	5,82		64,0
Ш 20x40						40	7,28		80,0
Ш 20x50						50	9,10	-	100,0

Таблица 7.4

Броневые ленточные магнитопроводы

Обозначение	Размеры, мм						Площадь сечения стержня, S_c , см ²	Средняя длина магнитной силовой линии l_{Σ} , см	$S_c \cdot S_0$ См ⁴
	a	c	h	H	L	b			
Шл 5x5	5	5	12	17	20	5	0,208	4,2	0,15
Шл 5x6,5						6,5	0,270		0,195
Шл 5x8						8	0,332		0,24
Шл 5x10						10	0,415		0,3
Шл 6x6,5	6	6	15	21	24	6,5	0,32	5,1	0,140
Шл 6x8						8	0,40		0,173
Шл 6x10						10	0,50		0,216
Шл 6x12,5						12,5	0,62		0,270
Шл 8x8	8	8	26	28	32	8	0,53	6,8	0,41
Шл 8x10						10	0,67		0,51
Шл 8x12,5						12,5	0,83		0,64
Шл 8x16						16	1,06		0,82
Шл 10x10	10	10	25	35	40	10	0,84	8,5	2,5
Шл 10x12,5						12,5	1,06		3,12
Шл 10x16						16	1,35		4,0
Шл 10x20						20	1,69		5,0
Шл 12x12,5	12	12	30	42	48	12,5	1,28	10,2	5,4
Шл 12x16						16	1,64		6,9
Шл 12x20						20	2,05		8,7
Шл 12x25						25	2,56		10,8
Шл 16x16	16	16	40	56	64	16	2,20	13,6	16,6
Шл 16x20						20	2,75		20,5

Шл 16x25						25	3,44		25,6
Шл 16x32						32	4,4		32,6
Шл 20x20	20	20	50	70	80	20	3,47	17,1	40
Шл 20x25						25	4,34		50
Шл 20x32						32	5,56		64,0
Шл 20x40						40	6,95		80,0
Шл 25x25	25	26	62,5	87,5	100	25	5,44	21,3	116,5
Шл 25x32						32	6,95		148,0
Шл 25x40						40	8,56		184,0
Шл 25x50						50	10,90		233,0

Таблица 7.5

Тороидальные ленточные магнитопроводы типа ОЛ

Обозначение	Размеры, мм			Средняя длина магнитной силовой линии l , см	Толщина намотки $a=(D-d)/2$, мм	S_e , см ²
	b	d	D			
Ол 10/16-4	4	10	16	4	3	0,168
Ол 10/16-5	5					0,135
Ол 10/16-6,5	6,5					0,176
Ол 10/16-8	8					0,216
Ол 12/20-5	5	12	20	5	4	0,18
Ол 12/20-6,5	6,5					0,234
Ол 12/20-8	8					0,29
Ол 12/20-10	10					0,36
Ол 16/26-6,5	6,5	16	26	6,5	5	0,29
Ол 16/26-8	8					0,36
Ол 16/26-10	10					0,45
Ол 16/26-12,5	12,5					0,56
Ол 20/32-8	8	20	32	8,1	6	0,41
Ол 20/32-10	10					0,54
Ол 20/32-12,5	12,5					0,67
Ол 20/32-16	16					0,86
Ол 25/40-10	10	25	40	10,2	7,5	0,67
Ол 25/40-12,5	12,5					0,84
Ол 25/40-16	16					1,08
Ол 25/40-20	20					1,3
Ол 25/40-25	25					1,5

Ол 32/50-16	16	32	50	12,8	9	1,3
Ол 32/50-20	20					1,62
Ол 32/50-25	25					2,03
Ол 32/50-32	32					2,6

По найденному значению $S_c \cdot S_o$ из табл. 7.3, 7.4 или 7.5 выбираем магнитопровод трансформатора. При этом руководствуемся следующими рекомендациями:

а) для трансформаторов с напряжением менее 1000 В и мощностью до 100–200 В·А более подходящими являются броневого магнитопроводы как ленточные, так и из пластин;

б) стержневые трансформаторы с двумя катушками на ленточных магнитопроводах рекомендуется использовать при мощности несколько сотен вольт-ампер на частоте 50 Гц, а также при мощности несколько киловольт-ампер на частоте 400 Гц (рис. 7.17.б).

в) при необходимости минимального рассеяния или минимального объема при мощности 100–200 В·А и частоте 400 Гц целесообразно использовать тороидальные ленточные магнитопроводы (рис. 7.17 в). После выбора магнитопровода определяются следующие параметры: S_c — активное сечение стержня, см²;

б — толщина магнитпровода, мм; а — ширина стержня, мм; с — ширина окна, мм; h — высота окна, мм.

4. Определение числа витков обмоток производится по формулам:

$$w_1 = \frac{U_1 \left(1 - \frac{\Delta U_1 \%}{100} \right) \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot B \cdot S_c}; \quad (7.33)$$

$$w_2 = \frac{U_2 \left(1 + \frac{\Delta U_2 \%}{100} \right) \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot B \cdot S_c}, \quad (7.34)$$

где $\Delta U_1 \%$, $\Delta U_2 \%$ — согласно таблице 7.6 относительные падения напряжения.

Если вторичная обмотка расположена непосредственно на первичной ΔU_2 берется на 10–20% меньше, а для наружных обмоток $\omega_3, \omega_4, \dots, \omega_n$ — на 10–20% больше указанных в табл. 7.6.

5. Ток первичной обмотки определяем из выражения:

$$I_1 = K_x \frac{P_r}{\eta \cdot U_1}, \quad (7.35)$$

где P_r — габаритная мощность, В.А.

Таблица 7.6
Относительные падения напряжения в обмотках

Частоты, Гц	$\Delta U, \%$	Габаритная мощность P_r , В.А				
		15-50	50-150	150-300	300-1000	1000-2500
50	ΔU_1	15-5	5-4	4-3	3-1	-
	ΔU_2	20-10	10-8	8-6	6-2	-
400	ΔU_1	8-4	4-1,5	1,5-1	1-0,5	0,5
	ΔU_2	10-5	5-2	2-1,2	1,2-0,5	0,5

η — коэффициент полезного действия (берется из табл. 7.1)

K_x — коэффициент, учитывающий ток холостого хода и коэффициент мощности.

Если: P_r до 100 В.А, то $K_x = 1,12$;

$P_r = (100-1000)$ В.А, то $K_x = 1,1$;

$P_r = (1000-5000)$ В.А, то $K_x = 1,05$;

6. Сечение проводов обмоток находим по следующей формуле:

$$S_w = \frac{I}{\delta} \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}, \quad (7.36)$$

где δ — плотность тока (берется из табл. 7).

По полученному значению S_w из табл. 7.7. находим ближайшее (большее) стандартное сечение и диаметр провода.

7. Определяем возможность размещения обмоток в окне выбранного магнитопровода, для чего:

а) определяем число витков в одном слое первичной обмотки

$$\omega_{1c} = (\eta - 2\Delta_1) / d_1,$$

где h — высота окна магнитопровода, мм;

Δ_1 — расстояние между обмоткой и ярмом, обычно;

$$\Delta_1 = 2 \div 5 \text{ мм};$$

d_1 — диаметр провода обмотки, мм.

Полученное значение w_{1c} округляется до ближайшего меньшего целого значения.

б) Число слоев обмотки:

$$m_1 = \frac{w_1}{w_{1c}}.$$

Полученное значение m_1 округляется до ближайшего большего числа.

в) определяется толщина обмотки:

$$\alpha_1 = m_1 (d_1 + \gamma_1),$$

где γ_1 — толщина изоляционной прокладки, которая применяется, если напряжение между слоями превышает 50В ($\gamma_1 = 0,01-0,01$) мм.

Аналогично определяется толщина других обмоток;

г) необходимая ширина окна магнитопровода:

$$C_{\text{н}} = K(\Delta_2 + \alpha_1 + \alpha_{1,2} + \alpha_2 + \alpha_{2,3} + \dots + \alpha_{n-1} + \alpha_{n-1} + n + \Delta_3) + \Delta_4,$$

где K — коэффициент, учитывающий неплотность прилегания слоев, $K = 1,2 \div 1,3$;

Δ_2 — толщина изоляции между обмотками и стержнем
 $\Delta_2 = (1,0 \div 2,0)$ мм;

$C_{\text{н}}$ — необходимая ширина окна;

$\alpha_{1,2}, \alpha_{2,3}, \dots, \alpha_{n-1}$ — толщина изоляции между обмотками, обычно $\alpha = (0,5 \div 1,0)$ мм;

Δ_3 — толщина наружной изоляции обмотки, $\Delta_3 = (0,5-1,0)$ мм;

Δ_4 — расстояние от катушки до второго стержня, $\Delta_4 = (1 \div 4)$ мм.

Найденное значение $C_{\text{н}}$ сравнивается с шириной C окна выбранного магнитопровода

$$C \geq C_{\text{н}}.$$

Пример:

Рассчитать силовой трансформатор по следующим исходным данным: напряжение сети $U_1 = 220$ В, частота $f = 50$ Гц, вторичная обмотка имеет следующие параметры:

Таблица 7.7

Номинальные данные обмоточных проводов круглого сечения

Диаметр провода без изоляции, мм	Сечение провода без изоляции, мм ²	Диаметр провода с изоляцией, мм				Диаметр провода без изоляции, мм	Сечение провода без изоляции, мм ²	Диаметр провода с изоляцией, мм			
		ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭТ	ПЭ-ШО			ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭТ	ПЭ-ШО
0,020	0,0003	0,035	-	-	-	0,630	0,311	0,680	0,700	0,71	0,76
0,025	0,0005	0,040	-	-	-	0,710	0,394	0,760	0,790	0,79	0,85
0,032	0,0008	0,045	-	-	-	0,750	0,441	0,810	0,840	0,83	0,90
0,040	0,00126	0,055	-	-	-	0,800	0,503	0,860	0,890	0,89	0,95
0,050	0,00196	0,070	0,080	-	0,14	0,850	0,56	0,910	0,940	0,94	1,00
0,063	0,00314	0,085	0,090	0,093	0,16	0,900	0,636	0,960	0,990	0,99	1,05
0,071	0,00295	0,095	0,100	0,10	0,16	0,950	0,708	1,010	1,040	1,04	1,10
0,080	0,00502	0,105	0,110	0,11	0,17	1,00	0,785	1,070	1,100	1,09	1,16
0,090	0,00686	0,115	0,120	0,12	0,18	1,060	0,883	1,130	1,160	1,16	1,22
0,100	0,00785	0,125	0,13	0,13	0,19	1,120	0,985	1,190	1,220	1,22	1,28
0,112	0,00985	0,135	0,14	0,14	0,20	1,180	0,094	1,260	1,280	1,28	1,34
0,125	0,0123	0,150	0,155	0,155	0,22	1,250	1,210	1,330	1,350	1,35	1,41
0,140	0,0158	0,165	0,170	0,17	0,23	1,320	1,370	1,400	1,420	1,42	1,48
0,160	0,0201	0,190	0,200	0,20	0,25	1,400	1,540	1,480	1,510	1,51	1,56
0,180	0,0254	0,210	0,220	0,22	0,27	1,500	1,770	1,580	1,610	1,61	1,68
0,200	0,0314	0,230	0,240	0,24	0,30	1,600	0,015	1,680	1,710	1,71	-
0,224	0,0394	0,260	0,270	0,27	0,33	1,700	2,26	1,780	1,810	1,81	-
0,250	0,0440	0,290	0,300	0,30	0,35	1,800	2,54	1,89	1,92	1,92	-
0,280	0,0567	0,320	0,330	0,33	0,40	1,900	2,82	1,990	2,02	2,02	-
0,315	0,0768	0,355	0,365	0,365	0,44	2,00	3,14	2,090	2,120	2,12	-
0,355	0,0990	0,395	0,415	0,415	0,48	2,120	3,53	2,210	2,240	2,24	-
0,400	0,126	0,440	0,460	0,46	0,52	2,240	3,92	2,340	2,370	2,37	-
0,450	0,159	0,490	0,510	0,51	0,59	2,300	4,37	2,460	2,490	2,49	-
0,500	0,196	0,550	0,570	0,57	0,63	2,50	4,9	2,600	2,650	2,63	-
0,560	0,248	0,610	0,630	0,63	0,69						

$U_2=12$ В, $I_2=2,5$ А, $U_3=24$ В, $I_3=2$ А.

1. Согласно формуле 7.30 находим габаритную мощность трансформатора

$$P_r = U_2 \cdot I_2 + U_3 \cdot I_3 = 12 \cdot 2,5 + 24 \cdot 2 = 78 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Из табл. 7.1. и 7.2. выбираем сталь 1511, магнитопровод из пластин толщиной 0,5 мм. Его параметры: $K_c=0,93$, $B=1,38$ Тл, $\delta=2,7$ А/мм², $K_m=0,3$, $\eta=0,94$.

2. Находим исходную расчетную величину

$$S_c \cdot S_o = \frac{78 \cdot 10^2}{1,11 \left(1 + \frac{1}{\eta} \right) \cdot f \cdot B \cdot K_m \cdot K_c \cdot \delta} =$$

$$= \frac{78 \cdot 10^2}{1,11 \left(1 + \frac{1}{0,94} \right) \cdot 50 \cdot 1,38 \cdot 0,3 \cdot 0,93 \cdot 2,7} = 65 \text{ см}^4.$$

По табл. 7.3 выбираем броневой магнитопровод Ш20х40. Его параметры: $a=20$ мм, $c=20$ мм, $\eta=50$ мм, $\sigma=40$ мм, $S_c=7,28$ см², $S_c \cdot S_o=80$ см⁴ > 65 см⁴.

3. Определяем количество витков обмоток: первичная обмотка

$$w_1 = \frac{U_1 \left(1 - \frac{\Delta U_1 \%}{100} \right) \cdot 10^4}{4,44 f \cdot B \cdot S_c} = \frac{220 \left(1 - \frac{4,5}{100} \right) \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,38 \cdot 7,28} = 937;$$

вторичные обмотки:

$$w_2 = \frac{U_2 \left(1 + \frac{\Delta U_2}{100} \right) \cdot 10^4}{4,44 f \cdot B \cdot S_c} = \frac{12 \cdot \left(1 + \frac{8}{100} \right) \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,38 \cdot 7,28} = 58;$$

$$w_3 = \frac{U_3 \left(1 + \frac{\Delta U_3}{100} \right) \cdot 10^4}{4,44 f \cdot B \cdot S_c} = \frac{24 \cdot \left(1 + \frac{9}{100} \right) \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,38 \cdot 7,28} = 118.$$

4. Ток первичной обмотки (формула 7.35)

$$I_1 = \frac{P_r}{\eta \cdot U_1} \cdot K_c = \frac{78}{0,94 \cdot 220} \cdot 1,12 = 0,42 \text{ А}.$$

5. Определяем сечения проводов обмоток:

$$S_{w1} = \frac{0,42}{2,7} = 0,155 \text{ мм}^2; \quad S_{w2} = \frac{2,5}{2,7} = 0,925 \text{ мм}^2;$$

$$S_{w3} = \frac{2}{2,7} = 0,74 \text{ мм}^2.$$

По табл. 7.7 находим соответствующие диаметры проводов:

$d_1=0,49$ мм; $d_2=1,19$ мм; $d_3=1,07$ мм марки ПЭВ-1.

6. Определяем возможность размещения обмоток в окне выбранного магнитопровода:

6.1. Для первичной обмотки:

а) число витков в одном слое

$$w_{1c} = (h - 2 \cdot \Delta_1) / d_1 = (50 - 2 \cdot 2) / 0,49 = 93;$$

в) число слоев обмотки

$$m_1 = \frac{w_1}{w_{1c}} = \frac{937}{93} = 10;$$

в) толщина обмотки

$$\alpha_1 = m_1 (d_1 + \gamma_1) = 10 \cdot 0,49 = 4,9 \text{ мм}$$

($g_1=0$, т.к. изоляционная прокладка применяется при напряжении 50 и более вольт. В нашем случае это напряжение $220/10=22 \text{ В} < 50 \text{ В}$).

6.2. Для второй обмотки:

а) число витков в одном слое

$$w_{2c} = (50 - 22) / 1,19 = 34,7, \text{ возьмем } w_{2c} = 35;$$

б) число слоев $m_2 = 58 / 35 = 1,67$; возьмем $m_2 = 2$;

в) толщина обмотки $\alpha_2 = 2 \cdot 1,19 = 2,38 \text{ мм}$.

6.3. Для третьей обмотки:

а) число витков в одном слое

$$w_{3c} = (50 - 2 \cdot 2) / 1,07 = 43;$$

б) число слоев $m_3 = 118 / 43 = 2,7$ возьмем $m_3 = 3$;

в) толщина обмотки $\alpha_3 = 3 \cdot 1,07 = 3,21 \text{ мм}$.

Если $\Delta_2 = 1,4$ мм, $\alpha_{1,2}$ и $\alpha_{2,3} = 0,7$ мм, $\Delta_3 = 0,7$ мм, $\Delta_4 = 2,5$ мм, $K = 1,23$, то необходимая ширина окна равна:

$$C = 1,23 (1,4 + 4,9 + 0,7 + 2,38 + 0,7 + 3,21 + 0,4) + 2,5 = 19,7 \text{ мм}.$$

Ширина окна $C = 20 \text{ мм} > 19,7$. Следовательно, обмотки размещаются в окне магнитопровода.

Задачи

Задача 7.1. Магнитный поток трансформатора равен $\Phi = 2 \cdot 10^{-3}$ Вб, частота тока $f = 50$ Гц, э.д.с. вторичной обмотки $E_2 = 220$ В. Определить число витков вторичной обмотки.

Решение:

1. Максимальное значение магнитного потока

$$\Phi_m = \Phi \cdot \sqrt{2} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{2} = 2,82 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}.$$

2. Число витков вторичной обмотки

$$E_2 = 4,44 f \omega_2 \cdot \Phi_m;$$

$$\omega_2 = \frac{E_2}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_m} = \frac{220}{4,44 \cdot 50 \cdot 2,82 \cdot 10^{-3}} = 350 \text{ витков}.$$

Задача 7.2. Напряжение первичной обмотки трансформатора $U = 220$ В, частота $f = 50$ Гц, активное сечение сердечника $S_a = 7,6$ см², амплитудное значение магнитной индукции $B_m = 0,95$ Тл, число витков вторичной обмотки $\omega_2 = 40$. Определить коэффициент трансформации трансформатора.

Решение:

1. Амплитудное значение магнитного потока равно

$$\Phi_m = B_m \cdot S = 0,95 \cdot 7,6 \cdot 10^{-4} = 7,32 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}.$$

2. Э.д.с. вторичной обмотки

$$E_2 = 4,44 f \omega_2 \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot 50 \cdot 40 \cdot 7,32 \cdot 10^{-4} = 6,5 \text{ В}.$$

3. Коэффициент трансформации

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{220}{6,5} = 34,4,$$

где $E_1 = U_1 = 220$ В.

Задача 7.3. Трансформатор мощностью 15 кВ А подключен к сети постоянного тока с напряжением $U = 3$ В. При этом амперметр показывает $I = 25$ А. После этого трансформатор подключили к сети переменного тока с $U = 220$ В и $f = 50$ Гц. При этом ток холостого хода $I_x = 6$ А, показание ваттметра $P_x = 90$ Вт. Напряжение вторичной обмотки $U_2 = 36$ В. Мощность потерь первичной и вторичной обмоток равны, $\cos \varphi_m = 0,9$. Определить:

- активное, индуктивное и полное сопротивления первичной обмотки;

- КПД.

Решение:

1. Согласно закону Ома активное сопротивление первичной обмотки

$$R_1 = \frac{U}{I} = \frac{3}{25} = 0,12 \text{ Ом}.$$

2. Полное сопротивление переменному току

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{220}{6} = 36,6 \text{ Ом}.$$

3. Индуктивное сопротивление первичной обмотки

$$X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} = \sqrt{(36,6)^2 - (0,12)^2} = 36,59 \text{ Ом}.$$

4. Мощность потерь первичной обмотки при холостом ходе

$$\Delta P_{10} = I_x^2 \cdot R_1 = 6^2 \cdot 0,12 = 4,3 \text{ Вт}.$$

5. Потери в стали

$$\Delta P_c = P_x - P_{10} = 90 - 4,3 = 85,7 \text{ Вт}$$

считаем $\Delta P_c = \Delta P_x = 90 \text{ Вт}$

6. Номинальный ток первичной обмотки

$$I_{1n} = \frac{S_n}{U_n} = \frac{15000}{220} = 68,2 \text{ А}.$$

7. Мощность потерь первичной обмотки при номинальной нагрузке

$$\Delta P_{1n} = I_{1n}^2 \cdot R = (68,2)^2 \cdot 0,12 = 558 \text{ Вт}.$$

8. В соответствии с условием задачи мощность потерь первичной и вторичной обмоток равны. Поэтому суммарная мощность потерь в трансформаторе равна:

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_{1n} + \Delta P_{2n} + P_c = 558 + 558 + 90 = 1206 \text{ Вт}.$$

9. КПД номинально нагруженного трансформатора

$$\eta_n = \frac{P_1 - \Sigma \Delta P}{P_1} = \frac{15000 - 1206}{15000} = 0,92.$$

Задача 7.4. На холостом ходу напряжение первичной обмотки трансформатора $U_1=220$ В, ток холостого хода $I_x=1,2$ А, мощность потерь $P_x=150$ Вт. Определить реактивное сопротивление первичной обмотки.

Решение:

1. Активное сопротивление первичной обмотки

$$R_1 = \frac{P_x}{I_x^2} = \frac{150}{(1,2)^2} = 104,2 \text{ Ом.}$$

2. Полное сопротивление первичной обмотки

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{220}{1,2} = 183,2 \text{ Ом.}$$

3. Реактивное сопротивление первичной обмотки

$$X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} = \sqrt{(183,2)^2 - (104,2)^2} = 151 \text{ Ом.}$$

Задача 7.5. В трехфазном трансформаторе $w_1=1836$, $w_2=135$. Линейное напряжение первичной обмотки $U_1=3000$ В. Определить коэффициент трансформации и линейное напряжение вторичной обмотки звезда-треугольник (λ/Δ).

Решение:

1. Обмотки соединены в звезда-звезда. Коэффициент трансформации:

$$K_{\lambda/\lambda} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{1836}{135} = 13,6.$$

Напряжение вторичной обмотки:

$$U_2 = \frac{U_1}{K_{\lambda/\lambda}} = \frac{3000}{13,6} = 220 \text{ В.}$$

2. Обмотки соединены звезда-треугольник. Коэффициент трансформации увеличится в $\sqrt{3}$ раз.

$$K_{\lambda/\Delta} = K_{\lambda/\lambda} \cdot \sqrt{3} = 13,6 \cdot \sqrt{3} = 23,5.$$

Линейное напряжение вторичной обмотки:

$$\frac{U_1}{U_2} = 23,5 \quad U_2 = \frac{U_1}{23,5} = \frac{3000}{23,5} = 127 \text{ В.}$$

Задача 7.6. Трехфазный трансформатор имеет следующие параметры: номинальная мощность $S_n = 1000 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, напряжения первичной и вторичной обмоток $U_{1н} = 10 \text{ кВ}$, $U_{2н} = 400 \text{ В}$, сечение сердечника $Q = 450 \text{ см}^2$, амплитудное значение магнитной индукции $B_m = 1,5 \text{ Тл}$, частота тока $f = 50 \text{ Гц}$, мощность потерь в сердечнике $P_c = 2,45 \text{ кВт}$, в обмотках $P_o = 12,2 \text{ кВт}$, мощность нагрузки $P_2 = 810 \text{ кВт}$; коэффициент мощности $\cos \varphi_2 = 0,9$, соединения обмоток Δ/λ (треугольник-звезда).

Определить: 1. Токи первичной и вторичной обмоток.

2. Число витков обмоток. 3. КПД при действительной и номинальной нагрузках.

Решение:

1. Токи обмоток

$$S_n = \sqrt{3} \cdot I_{1н} \cdot U_{1н} \quad \text{отсюда} \quad I_{1н} = \frac{S_n \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U_{1н}} = \frac{1000 \cdot 1000}{1,73 \cdot 10000} = 58 \text{ А,}$$

$$I_{2н} = \frac{S_n \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U_{2н}} = \frac{1000 \cdot 1000}{1,73 \cdot 400} = 144,5 \text{ А}$$

2. Коэффициент нагрузки определяем по формуле

$$K_n = \frac{P_2}{S_n \cdot \cos \varphi_2} = \frac{810}{1000 \cdot 0,9} = 0,9.$$

3. Действительный ток в обмотках с учетом коэффициента нагрузки

$$I_1 = K_n \cdot I_{1н} = 0,9 \cdot 58 = 52 \text{ А;}$$

$$I_2 = K_n \cdot I_{2н} = 0,9 \cdot 144,5 = 130 \text{ А.}$$

4. Без учета падений напряжения в обмотках:

- фазная э.д.с. первичной обмотки:

$$E_{1ф} = U_{1н} = 10000 \text{ В}$$

(т.к. первичная обмотка соединена треугольником);

- фазная э.д.с. вторичной обмотки:

$$E_{2\phi} \approx U_{2н} / \sqrt{3} = 400 / \sqrt{3} = 230 \text{ В.}$$

(т.к. вторичная обмотка соединена звездой)

5. Число витков обмоток находится из формулы:

$$E_{1\phi} = 4,44 f \cdot \omega_1 \cdot \Phi_m \quad \text{где} \quad \Phi_m = B_m \cdot Q = \\ = 1,5 \cdot 450 \cdot 10^{-7} 67,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

Отсюда

$$\omega_1 = \frac{E_{1\phi}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_m} = \frac{10000}{4,44 \cdot 50 \cdot 67,5 \cdot 10^{-3}} = 667; \\ \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{E_{1\phi}}{E_{2\phi}}; \quad \omega_2 = \frac{\omega_1 \cdot E_{2\phi}}{E_{1\phi}} = \frac{667 \cdot 230}{10000} = 15,3;$$

6. КПД трансформатора:

-при номинальной нагрузке

$$\eta_n = \frac{S_n \cdot \cos \varphi_2}{S_n \cdot \cos \varphi_2 + P_c + P_o} = \frac{1000 \cdot 0,9}{1000 \cdot 0,9 + 2,45 + 12,2} = 98,4\%,$$

-при действительной нагрузке:

$$\eta = \frac{K_n \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2}{K_n \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2 + P_c + P_o} = \frac{0,9 \cdot 1000 \cdot 0,9}{0,9 \cdot 1000 \cdot 0,9 + 2,45 + 12,2} = 98,5\%.$$

ГЛАВА 8

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

8.1. Некоторые понятия из метрологии

Измерение — это нахождение физической величины при помощи мер и измерительных приборов.

Мера — это средство измерения путем непосредственного воспроизведения физической величины (метр, см. и т.д.).

Измерительный прибор — это средство для наблюдения и осуществления измерения физической величины (амперметр, вольтметр и т.д.).

Электрические измерительные приборы делятся на две группы: приборы непосредственного измерения и приборы сравнения. Амперметр, вольтметр, омметр и т.д. — это приборы непосредственной оценки, т.к. в них измеряемую величину можно определить, глядя на шкалу прибора. В приборах сравнения (мост, компенсатор) измеряемая величина сравнивается с мерой. Они применяются при точных измерениях.

Обычно результат измерения отличается от действительного значения измеряемой величины. Разница между измеренной величиной и её действительным значением называется абсолютной погрешностью.

$$\Delta A = A_{\text{из}} - A_{\text{д}}, \quad (8.1)$$

где $A_{\text{из}}$ — измеренная величина;

$A_{\text{д}}$ — действительное значение величины.

Отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины называется относительной погрешностью

$$\beta = \frac{\Delta A}{A_{\text{д}}} \cdot 100\%, \quad (8.2)$$

Отношение максимальной абсолютной погрешности прибора к верхнему пределу измерения называется приведенной погрешностью

$$\beta_{\text{пр}} = \frac{\Delta A}{A_{\text{max}}} \cdot 100\%, \quad (8.3)$$

где A_{max} — верхний предел измерения прибора;

$\beta_{\text{пр}}$ — приведенная погрешность.

Приведенная погрешность указывается на шкале прибора.

8.2. Классификация электроизмерительных приборов. Условные обозначения на шкале

В табл. 8.1 и 8.2. приведены наименования, назначения, условные обозначения электроизмерительных приборов. По принципу работы различают следующие системы: магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, ферродинамические, индукционные, электростатические, электронные.

По назначению приборы бывают: вольтметры (для измерения напряжения), амперметры (для измерения силы тока), ваттметры (для измерения мощности), счетчики (для измерения электроэнергии), омметры (для измерения сопротивления), частотометры (для измерения частоты) и т.д.

По виду тока бывают приборы переменного тока, постоянного тока, универсальные.

По способу установки бывает горизонтальные, вертикальные приборы и установка под углом, указанным на шкале.

По основной приведенной погрешности приборы бывают следующих классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4,0.

8.3. Приборы магнитоэлектрической системы

Устройство прибора показано на рис.8.1. Между полюсами постоянного магнита и цилиндрическим сердечником на двух полуосях установлена подвижная катушка (рамка) прямоугольной формы. В любом положении катушки магнитные силовые линии направлены перпендикулярно её проводникам. По закону Ампера на каждую сторону катушки действует сила

Таблица 8.1

Электроизмерительные приборы и их условные обозначения

Вид измеряемой величины	Наименование прибора	Условные обозначения
Ток	Миллиамперметр, амперметр, килоамперметр	  
Напряжение	Милливольтметр, вольтметр, киловольтметр	  
Электроэнергия	Счетчики	 
Мощность	Ваттметр, киловаттметр	 
Сдвиг фаз	Фазометр	
Частота	Частотомер	
Электр. сопротивл.	Омметр, мегаомметр	 

$$F = B \cdot l \cdot w \cdot I, \quad (8.4)$$

где F — сила; l — активная длина одной стороны витка; I — ток катушка; B — магнитная индукция в воздушном зазоре между полюсами магнита и цилиндрическим сердечником.

Системы электроизмерительных приборов и обозначения на их шкалах

Обозн. системы	Система	Обозначения на шкалах приборов	Пояснения
	Магнитоэлектрическая	Обозначения классов точности 0,05 0,1 0,2 0,5 1 1,5 2,5 4	Основная приведенная погрешность % 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4.
	Магнитоэлектрический логометр		
	Выпрямительная		
	Термоэлектрическая	Вид тока	Постоянный Переменный Трехфазный
	Электродинамическая	Положение шкалы прибора при работе	Вертикальное Горизонтальное Под углом
	Электродинамический логометр		
	Ферродинамическая	Изоляционная прочность	Прибор испытан под напряжением 2 кВ
	Ферродинамический логометр		
	Индукционная	Обозначения зажимов	Генераторный Соединенный с корпусом Заземленный
	Электростатическая		
	Вибрационная	Пример	Электромагнитный, класс точности 1,5, шкала выполнена для переменного тока, установка под углом 60°

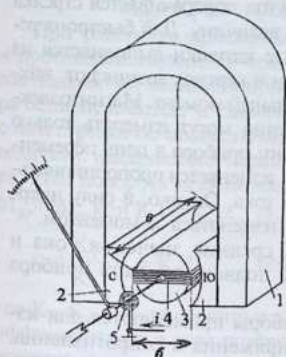


Рис. 8.1. Устройство магнито-электрического прибора: 1-постоянный магнит; 2-полюсные наконечники; 3-сердечник; 4-подвижная катушка (рамка); 5-спиральные пружины.

ω — число витков катушки. На другую сторону катушки действует точно такая же, но противоположно направленная, сила. В результате возникает вращающий момент

$$M_{вр} = B \cdot l \cdot I \cdot \omega \cdot P, \quad (8.5)$$

где P — ширина катушки.

Так как величины B , l , ω , P для каждого прибора являются постоянными, то формулу 8.5. можно написать в виде

$$M_{вр} = K_1 \cdot I, \quad (8.6)$$

где $K_1 = B \cdot l \cdot \omega \cdot P$ — постоянный коэффициент.

Ток на катушку подается через две спиральные пружины, создающие также противодействующий момент

$$M_{пр} = K_2 \cdot \alpha, \quad (8.7)$$

где α — угол поворота катушки; K_2 — постоянный коэффициент удельный противодействующему моменту (момент приходящийся на 1° угла поворота катушки).

Под действием $M_{вр}$ катушка поворачивается, и когда $M_{вр} = M_{пр}$ — останавливается. Пользуясь этим равенством найдем угол поворота катушки

$$M_{вр} = M_{пр} \text{ или } K_1 \cdot I = K_2 \cdot \alpha \quad (8.8)$$

$$\text{отсюда } \alpha = \frac{K_1}{K_2} \cdot I = K \cdot I, \quad (8.9)$$

где K — постоянный коэффициент.

Вместе с катушкой на тот же угол поворачивается стрелка и по шкале покажет измеряемую величину. Для быстрого успокоения подвижной части каркас катушки выполняется из алюминия. При повороте катушки в каркасе возникают вихревые токи, создающие успокоительный момент. Магнитоэлектрические приборы непосредственно могут измерять только постоянный ток. При подключении прибора в цепь переменного тока вращающий момент $M_{вр}$ изменяется пропорционально мгновенному значению этого тока. Однако, в силу инерции подвижная часть не успевает изменяться за моментом.

Для синусоидального тока средние значения тока и момента равны нулю. Поэтому подвижная часть прибора не поворачивается.

Магнитоэлектрические приборы применяются для измерения постоянного тока, напряжения и сопротивления. Они обладают высокой точностью и чувствительностью, потребляют мало электроэнергии. Так как угол поворота прямо пропорционален току, то шкала у них равномерна. Наличие постоянного магнита делает независимым его показания от влияния внешнего магнитного поля.

Для производства измерений в цепях переменного тока магнитоэлектрический прибор подключается через выпрямитель и называются они выпрямительными системами: Выпрямитель, устанавливается внутри прибора. Обычно выпрямительные системы используются как универсальные приборы в цепях переменного и постоянного токов при измерении тока, напряжения, сопротивления, емкости в широких пределах.

8.4. Приборы электромагнитной системы

Устройство электромагнитного прибора показано на рис.8.2. Измеряемый ток подается непосредственно на неподвижную катушку. Магнитное поле, возникающее в катушке, втягивает внутрь нее сердечник, который при этом поворачивается и поворачивает за собой стрелку. Так как магнитное поле пересекает катушку и сердечник, то вращающий момент пропорционален квадрату тока

$$M_{вр} = K_1 \cdot I^2. \quad (8.10)$$

Противодействующий момент создается спиральной пружиной

$$M_{\text{пр}} = K_2 \cdot \alpha. \quad (8.11)$$

При равенстве вращающего и противодействующего моментов подвижной механизм прибора останавливается, и связанная с ним стрелка по шкале покажет величину измеряемого параметра. Угол поворота механизма:

$$M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}} \text{ или } K_1 I^2 = K_2 \cdot \alpha. \quad (8.12)$$

$$\alpha = \frac{K_1}{K_2} \cdot I^2 = K \cdot I^2, \quad (8.13)$$

где K_1 , K_2 , K — постоянные коэффициенты; α — угол поворота механизма.

Приборы электромагнитной системы применяются для измерения как постоянного, так и переменного токов, поскольку при изменении направления тока в катушке, изменяется направление в сердечнике. В результате направление вращающего момента не изменяется.

Для быстрого успокоения механизма применяется воздушный успокоитель, состоящий из поршня и цилиндра, закрытого с одной стороны. Поршень поворачивается вместе с со стрелкой и создает в цилиндре разность давлений. Прохождение воздуха между поршнем и цилиндром замедляет движение поршня. В результате колебания подвижного механизма быстро прекращаются. Так как угол поворота пропорционален квадрату тока шкала электромагнитного прибора нелинейная: сжата в начале и растянута в конце:

Приборы электромагнитной системы большей частью применяются как рабочие приборы в цепях переменного тока частотой до 10 кГц.

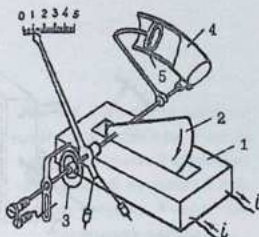


Рис. 8.2. Устройство электромагнитного прибора: 1) неподвижная катушка; 2) подвижный сердечник; 3) спиральная пружина; 4) цилиндр; 5) поршень.

8.5. Приборы электродинамической системы

Устройство прибора показано на рис 8.3. Измеряемый ток подается как на подвижную, так и на неподвижную катушки. Между ними возникает электродинамическое взаимодействие. В результате на подвижную катушку действу-

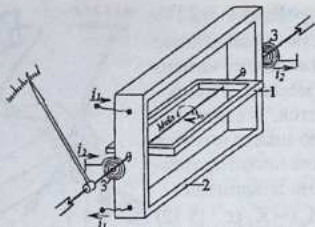


Рис. 8.3. Устройство электродинамического прибора: 1-подвижная катушка; 2-неподвижная катушка; 3-спиральные пружины.

ет вращающий момент. Ток на подвижную катушку подается через две спиральные пружины, которые служат также для создания противодействующего момента. Подвижная катушка поворачивается вместе со стрелкой и останавливается, когда оба момента станут равными друг другу. Угол поворота подвижной катушки для постоянного тока равен:

$$\alpha = K_1 \cdot I_1 \cdot I_2, \quad (8.14)$$

где K_1 — постоянный коэффициент; I_1 и I_2 — токи неподвижной и подвижной катушек.

Угол поворота подвижной катушки для переменного тока:

$$\alpha = K_1 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi, \quad (8.15)$$

где φ — угол сдвига фаз между токами катушек.

Приборы электродинамической системы обладают высокой чувствительностью и точностью. Однако, они потребляют много электроэнергии и на их показания оказывает влияние внешнее магнитное поле. В большинстве случаев они используются как ваттметры и как образцовые приборы. Конструкция приборов сложна и они относительно дороги.

8.6. Приборы ферродинамической системы (рис. 8.4)

Принцип работы приборов ферродинамической системы такой же, как у электродинамической системы. Они имеют следующие конструктивные особенности: 1) для усиления магнитного поля неподвижная катушка имеет магнитопровод, 2) подвижная катушка вращается вокруг цилиндрического стального сердечника. Поэтому внешние магнитные поля оказывают меньшее влияние на их работу и они обладают большим вращающим моментом. По этим причи-

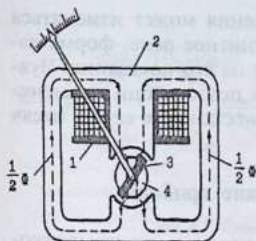


Рис. 8.4. Устройство ферродинамического прибора: 1-неподвижная катушка; 2-сердечник неподвижной катушки; 3-подвижная катушка; 4-сердечник подвижной катушки.

нам приборы ферродинамической системы применяются в самопишущих приборах, в которых требуется иметь значительный вращающий момент. На воздушных судах из-за больших вибраций и наличия посторонних магнитных полей также применяются приборы ферродинамической системы.

8.7. Электростатические приборы

Устройство электростатического прибора показано на рис. 8.5. Между двумя неподвижными электродами установлен подвижный электрод, укрепленный на оси. Измеряемое напряжение на подвижный электрод подается через спиральную пружину, которая служит также для создания противодействующего момента. Между электродами возникает электрическое поле, под действием которого подвижный электрод поворачивается и стремится занять такое положение, при котором энергия электрического поля будет иметь максимальное значение. Угол поворота подвижного электрода и связанной с ним стрелки определяется по формуле

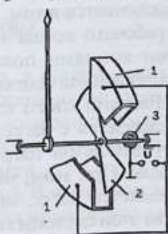
$$\alpha = K \cdot U^2 \quad (8.16)$$


Рис. 8.5. Устройство электростатического прибора: 1-неподвижный электрод; 2-подвижный электрод; 3-спиральная пружина.

Следовательно, по принципу действия электростатические приборы измеряют напряжение. Эти приборы лег-

ние, частота измеряемого напряжения может изменяться в широких пределах, внешнее магнитное поле, форма измеряемого напряжения не влияют на его показания. Чувствительность прибора невелика и поэтому они применяются при напряжениях от 30 до нескольких сотен тысяч вольт.

8.8. Термоэлектрические приборы

Приборы этой системы состоят из магнитоэлектрического механизма и термоэлектрического преобразователя (рис.8.6). В качестве преобразователя используется термопара с нагревателем, по которому проходит измеряемый ток. Термопара представляет собой спай двух разнородных металлов. Спаянные концы термопары называются рабочим концом, а другие — свободными концами. Принцип работы термопары заключается в том, что при нагревании рабочего конца между его свободными концами появляется э.д.с., пропорциональная температуре рабочего конца. Рабочий конец термопары сваркой соединяется с нагревателем. При прохождении тока через нагреватель он нагревается и нагревает рабочий конец термопары. При этом, между свободными концами термопары появляется э.д.с., пропорциональная току нагревателя. Приборы этой системы могут применяться для измерения тока, мощности в широком диапазоне частот. Термопреобразователь обычно монтируется внутри прибора. При больших токах прибор имеет внешний термопреобразователь.

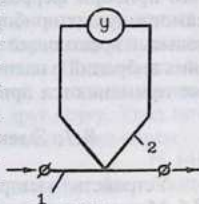


Рис. 8.6. Термоэлектрический прибор:
1-проводник-нагреватель; 2-термопара.

8.9. Выпрямительные приборы

Выпрямительные приборы состоят из магнитоэлектрического измерительного механизма и полупроводникового выпрямителя (рис. 8.7). При помощи диодов VD1—VD4 переменный ток преобразуется в пульсирующий. Среднее значение момента и угол поворота подвижного механизма

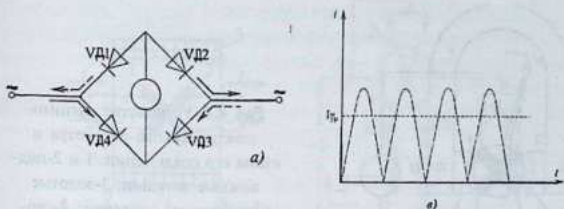


Рис. 8.7. Схема выпрямительного прибора:

а) схема прибора; б) пульсирующий ток.

пропорциональны среднему значению пульсирующего тока. Этот ток пропорционален действующему значению синусоидального тока. Поэтому выпрямительные приборы градуируются в действующих значениях при синусоидальной форме кривой переменного тока.

Выпрямительные приборы широко применяются в виде переносных универсальных многопредельных ампер-вольтметров («тестеров»).

8.10. Логометры

Логометром называется прибор, в котором угол поворота подвижного механизма пропорционален отношению двух токов. Они применяются для измерения сопротивления, емкости, частоты, сдвига фаз, температуры и т.д.

1. Магнитоэлектрический логометр.

Его устройство показано на рис. 8.8. В магнитном поле постоянного магнита размещаются две подвижные катушки. Эти катушки жестко скреплены друг с другом и насажены на одну ось со стрелкой. Токи к катушкам подводятся через тонкие, эластичные «безмоментные» ленты из золота или серебра.

Так как воздушные зазоры, в которых находятся катушки неравномерны, то и магнитное поле в них будет неоднородным. Поэтому вращающиеся моменты катушек зависят от положения подвижной части, т.е. зависят от угла поворота α . Токи катушек направлены противоположно друг другу. Поэтому вращающиеся моменты будут направлены навстречу друг другу. Угол поворота подвижной части зависит лишь от отношения токов в катушках:

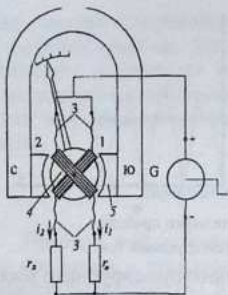


Рис. 8.8. Устройство магнито-электрического логометра и схема его соединений: 1 и 2-подвижные катушки; 3-золотые (серебряные) ленточки; 4-сердечник; 5-наконечники постоянного магнита.

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right). \quad (8.17)$$

Одна параллельная ветвь логометра состоит из последовательно соединенных катушки и измеряемого сопротивления, а другая состоит из последовательно соединенных катушки и дополнительного сопротивления. Учитывая то, что токи в параллельных ветвях обратно пропорциональны их сопротивлениям, можно написать:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{R_x}{R_d}\right). \quad (8.18)$$

Так как дополнительное сопротивление постоянно, то угол поворота механизма зависит только от величины измеряемого сопротивления и не зависит от напряжения питания. Это позволяет применять в них магнитоэлектрические генераторы G с ручным приводом, обладающие нестабильной э.д.с. (рис. 8.26).

2. Электродинамический логометр (рис. 8.9).

Логометр-фазометр этой системы состоит из двух подвижных и одной неподвижной катушек. Подвижные катушки скреплены на одной оси и размещены в магнитном поле неподвижной катушки. Ток I неподвижной катушки сдвинут по фазе относительно напряжения на угол ϕ . Подвижные катушки через резистор r и дроссель L соединены параллельно нагрузке Z_n , которая последовательно соединяется с неподвижной катушкой. Взаимодействие подвиж-

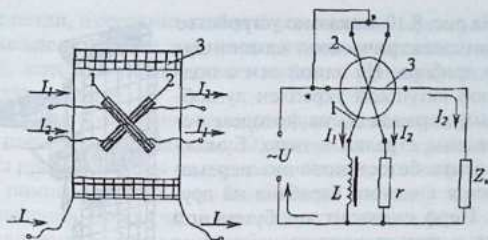


Рис. 8.9. Электродинамический логометр-фазометр:

а) устройство; б) схема соединений.

ных и неподвижной катушек создает два вращающих момента, под действием которых подвижная часть повернется на некоторый угол α . Этот угол пропорционален углу сдвига ϕ между током и напряжением.

8.11. Цифровые приборы

В этих приборах измеряемые непрерывные величины преобразуются в комбинации условных цифр на цифровых индикаторах, в качестве которых широко используются многоэлектродные лампы, дающие изображения цифр от 0 до 9. Цифровые приборы обладают высокой точностью, быстродействием, широкими пределами измерения, легко комплектуются с ЭВМ, результаты их измерений могут без погрешностей передаваться на большие расстояния. Недостатками их являются высокая стоимость и сложная схема.

В большинстве случаев цифровые приборы применяются в качестве цифровых вольтметров. Применяются также цифровые частотомеры, фазометры, омметры и т.д. Более подробная информация о цифровых приборах дана в главе 20.

8.12. Регистрирующие приборы

Эти приборы применяются для длительного наблюдения и записи измеряемых параметров. Они осуществляют запись медленно изменяющихся величин. В самопишущих приборах для записи измеряемой величины применяется специальное устройство.

На рис. 8.10. показано устройство магнитоэлектрического самопишущего прибора. На одной оси с подвижной катушкой укреплен дугообразный держатель, на котором установлены стрелка и перо. Бумажная лента безостановочно перематывается с одного барабана на другой. Перо скользит по бумажной ленте и чертит кривую изменения параметра во времени.

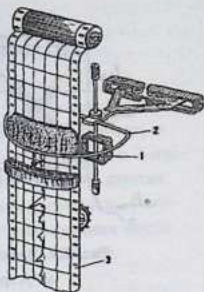


Рис. 8.10. Магнитоэлектрический самопишущий прибор: 1-подвижная катушка; 2-дугообразный держатель; 3-бумажная лента.

Самопишущие приборы широко применяются на электро- и метеостанциях для длительного наблюдения и записи различных параметров.

Для наблюдения и записи быстро изменяющихся параметров применяются электронные и магнитоэлектрические осциллографы. На рис.

8.11. показано устройство магнитоэлектрического осциллографа. Измерительным элементом является вибратор, представляющий собой бронзовую натянутую ленточку в

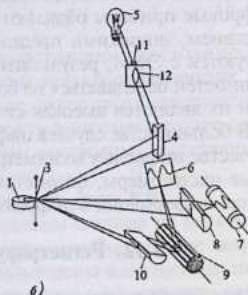
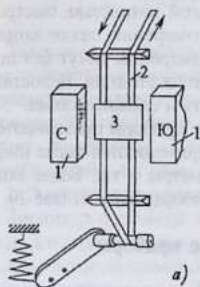


Рис. 8.11. Устройство магнитоэлектрического осциллографа: а) вибратор; б) схема осциллографа: 1-постоянный магнит; 2-петля; 3-зеркало; 4-призма; 5-лампа; 6-экран; 7-фотобумага; 8-линза; 9-многогранный зеркальный барабан; 10-призма; 11-конденсор; 12-диафрагма.

виде петли, в середине которой установлено зеркальце. При прохождении тока по петле возникает вращающий момент, который поворачивает петлю и зеркальце в ту или другую сторону.

Луч света от лампы через диафрагму, конденсор и призму попадает на зеркальце. Отраженный от зеркальца луч через призму делится на две части. Одна часть направляется при помощи зеркального барабана на матовый экран для наблюдения. Другая часть через линзу падает на фотобумагу. Зеркальный барабан и фотобумагу вращает специальный барабан. При этом на экране наблюдается неподвижное изображение исследуемого параметра, а на фотобумаге вычерчивается график изменения этого параметра во времени.

8.13. Измерение тока и напряжения

Показания амперметров зависят от тока, проходящего через его подвижную часть. Поэтому амперметр в электрических цепях соединяется последовательно с нагрузкой (генератором). Чтобы не нарушать режим работы электрической цепи сопротивление амперметра должно быть намного меньше сопротивления цепи или нагрузки. Показание вольтметра зависит от напряжения между его зажимами. Поэтому вольтметр соединяется параллельно цепи. Чтобы не нарушить режим работы цепи сопротивление вольтметра должно быть намного больше сопротивления нагрузки или ветви цепи.

Расширения пределов измерения амперметра

1. Для расширения пределов измерения амперметра на постоянном токе применяются шунты (рис. 8.12). Шунт — это строго калиброванное сопротивление, выполненное из сплава манганин, особенностью которого является то, что его сопротивление при изменениях температуры остается практически постоянным. Шунт соединяется последовательно с нагрузкой, параллельно шунту подключается амперметр. При таком под-

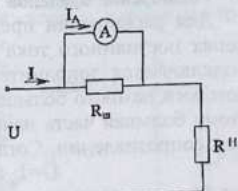


Рис. 8.12. Схема измерения постоянного тока при помощи шунта.

ключении большая часть тока проходит через шунт, так как его сопротивление выполняется намного меньше, чем сопротивление амперметра. Например, при помощи амперметра на $I_A = 5\text{ А}$ необходимо измерить $I_n = 75\text{ А}$, т.е. предел измерения необходимо расширить в $75/5 = 15$ раз. Сопротивление шунта можно определить по формуле

$$R_{ш} = \frac{R_A}{m - 1}, \quad (8.19)$$

где $m = \frac{I_n}{I_A}$ — коэффициент расширения предела;

R_A — сопротивление амперметра.

Фактически амперметр измеряет падение напряжения на шунте и его можно назвать милливольтметром. На практике шунты изготавливаются на падение напряжения 60, 75, 150, 300 mV. Например, на шунте написано $I = 100\text{ А}$, 75mV. Это значит, что шунт рассчитан на номинальный ток 100 А и при прохождении этого тока на нем падает 75 mV. До 50-100 А шунты встроены внутрь амперметра, при больших токах применяют наружные шунты.

2. Для расширения пределов измерения на переменном токе применяются трансформаторы тока, устройство и принцип работы которого приведен ранее (параграф 7.7).

Ток, проходящий через амперметр, меньше измеряемого тока в K (коэффициент трансформации) раз. Однако, шкала амперметра соответствует измеряемому току.

Расширение пределов измерения вольтметра

Для расширения пределов измерения напряжения в цепях постоянного тока последовательно с вольтметром подключается дополнительное сопротивление, величина которого намного больше сопротивления вольтметра. Поэтому большая часть напряжения падает на дополнительном сопротивлении. Согласно схеме рис 8.13:

$$U = I_v \cdot (R_v + R_d); \quad U_v = I_v \cdot R_v, \quad (8.20)$$

где U — измеряемое напряжение, I_v — ток, проходящий через вольтметр, R_v — сопротивление вольтметра, R_d — дополнительное сопротивление, U_v — максимальное напряжение, измеряемое вольтметром.

Коэффициент расширения предела измерения вольтметра:

$$m = \frac{U}{U_v} = \frac{R_d + R_v}{R_v}. \quad (8.21)$$

Следовательно, величина дополнительного сопротивления

$$R_d = R_v(m-1). \quad (8.22)$$

Дополнительное сопротивление выполняется из манганина или константана, обладающих большим удельным сопротивлением и малым температурным коэффициентом сопротивления.

Для расширения пределов измерения вольтметра в цепях переменного тока применяется трансформатор напряжения, устройство и принцип работы которого рассмотрен ранее (тема 7.7, рис. 7.8). Необходимо отметить, что напряжение, измеряемое вольтметром в К (коэффициент трансформации) раз меньше измеряемого напряжения. Однако шкала вольтметра соответствует измеряемому напряжению.

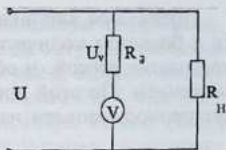


Рис. 8.13. Схема измерения постоянного напряжения при помощи добавочного сопротивления.

8.14. Измерение мощности

1. В цепи постоянного тока мощность можно определить, измерив ток и напряжение

$$P = I \cdot U.$$

Эту мощность можно измерить при помощи электродинамического ваттметра. Неподвижная катушка, называемая токовой или последовательной, соединяется последовательно с нагрузкой. Подвижная катушка, называемая параллельной или катушкой напряжения, подключается параллельно нагрузке (рис 8.14).

В цепи постоянного тока угол поворота подвижной части электродинамического прибора равен:

$$\alpha = K_i \cdot I_1 \cdot I_2.$$

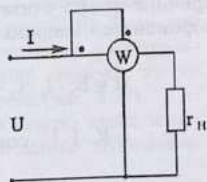


Рис. 8.14. Схема подключения ваттметра.

Подвижная катушка выполняется из тонкой проволоки с большим количеством витков. Поэтому эта катушка получается легкой и обладает большим активным сопротивлением. По этой причине ток подвижной катушки будет пропорционален напряжению

$$I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad (8.23)$$

где I_2 и R_2 — ток и активное сопротивление подвижной катушки. Следовательно, угол поворота подвижной катушки можно выразить

$$\alpha = K_1 \cdot I_1 \cdot I_2 = K_1 \cdot I_1 \cdot \frac{U}{R_2} = \frac{K_1}{R_2} \cdot I \cdot U = K_2 \cdot P, \quad (8.24)$$

где I_1 — ток неподвижной катушки, K_2 — постоянный коэффициент, P — мощность. Так как неподвижная катушка соединяется последовательно с нагрузкой, то её ток будет равен току нагрузки $I_1 = I$.

Таким образом, угол поворота подвижной части электродинамического прибора пропорционален мощности цепи, т.е. отградуировав шкалу в ваттах можно измерять мощность.

2. Активная мощность в цепи переменного тока

$$P = I \cdot U \cdot \cos \varphi.$$

Угол поворота подвижной части электродинамического прибора в цепи переменного тока

$$\alpha = K_1 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi. \quad (8.25)$$

Так как подвижная катушка выполняется из тонкой проволоки и имеет большое количество витков, то его полное сопротивление практически равно активному. По этой причине можно считать, что ток этой катушки будет пропорционален напряжению и совпадать с ним по фазе:

$$\begin{aligned} \alpha &= K_1 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi = K_1 \cdot I_1 \cdot \frac{U}{R_2} \cdot \cos \varphi = \\ &= K \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi = K \cdot P, \end{aligned} \quad (8.25)$$

т.е. угол поворота подвижной катушки пропорционален мощности.

На лицевую панель ваттметров выведены четыре зажима, к которым присоединяются концы катушек. Зажимы, к которым присоединены начала катушек, называются генераторными и они обозначаются точками (•). К ним подключаются провода, идущие от генератора. Если в одной из катушек перепутать между собой зажимы, то подвижной механизм повернется в обратную сторону. Для изменения поворота подвижной части необходимо поменять направление тока в любой из катушек.

8.15. Измерение активной мощности в трехфазных цепях

1. Для измерения мощности в несимметричной трехфазной системе надо в каждую фазу подключить по одному ваттметру (рис. 8.15) и их показания сложить.

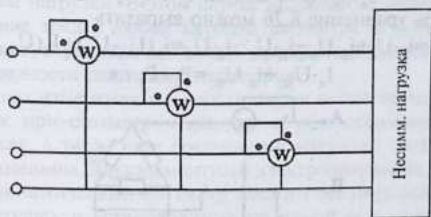


Рис. 8.15. Схема измерения мощности в трёхфазной несимметричной системе при неравномерной нагрузке.

2. Для измерения мощности симметричной трехфазной системы достаточно измерить мощность одной фазы и показание ваттметра умножить на три (рис. 8.16). Если при соединении звездой невозможно подключиться к нейтральному проводу или к ветвям треугольной системы, то создается искусственная нейтральная точка (рис. 8.17).

3. Мощность трехфазной системы можно также измерить при помощи двух ваттметров или одним двухэлементным ваттметром.

Мгновенная мощность трехфазной цепи

$$P = P_A + P_B + P_C = i_A \cdot U_A + i_B \cdot U_B + i_C \cdot U_C \quad (8.26)$$

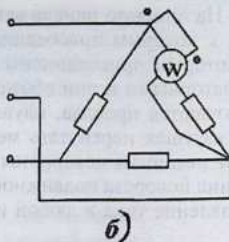
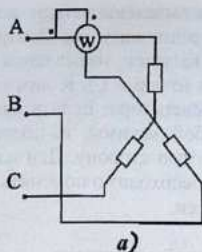


Рис. 8.16. Схемы измерений мощности в трёхфазной симметричной системе: а) при соединении приемников электроэнергии звездой; б) при соединении приемников электроэнергии треугольником.

Алгебраическая сумма мгновенных значений токов

$$i_a + i_b + i_c = 0 \text{ откуда } i_c = -i_a - i_b. \quad (8.27)$$

Теперь уравнение 8.26 можно выразить

$$P = i_A \cdot U_A + i_B \cdot U_B - i_A \cdot U_C - i_B \cdot U_C = i_A (U_A - U_C) + i_B (U_B - U_C) = I_A \cdot U_{AC} + i_B \cdot U_{BC} = P_1 + P_2 \text{ Т.К.} \quad (2.28)$$

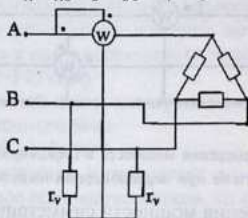


Рис. 8.17. Схема соединений ваттметра в трёхфазной системе при помощи искусственного поля.

разность фазных напряжений равна линейному напряжению.

$$U_A - U_C = U_{AC} \text{ и } U_B - U_C = U_{BC} \quad (8.29)$$

На рис. 8.18 показана схема измерения мощности трехфазной системы при помощи двух ваттметров. Токовые обмотки подключаются на любые две фазы, на свободную третью фазу подключается обмотка напряжения. В соответствии с уравнением 8.28 через токовые катушки проходят фазные токи (i_A , i_B), на катушки напряжения подаются линейные

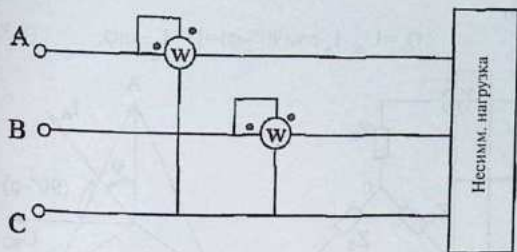


Рис. 8.18. Схема измерения мощности в трёхфазной системе при помощи двух ваттметров.

напряжения U_{AC} и U_{BC} . Мощность трёхфазной системы будет равна сумме показаний двух ваттметров. Иногда стрелка одного из ваттметров поворачивается влево, что связано с характером нагрузки. В этом случае необходимо изменить направление тока в любой катушке ваттметра и записать его показание. При этом мощность трёхфазной системы будет равна разности показаний ваттметров.

Метод измерения мощности двумя ваттметрами приложен как при симметричной, так и при несимметричной нагрузках, а также при соединении нагрузки звездой или треугольником. Двухэлементный электродинамический или ферродинамический ваттметр состоит из двух неподвижных катушек и установленные на одной оси со стрелкой двух подвижных катушек (катушек напряжения). Схема подключения двухэлементного ваттметра аналогична схеме подключения двух однофазных ваттметров.

8.16. Измерение реактивной мощности в трёхфазной системе (рис. 8.19)

В симметричной трёхфазной системе реактивную мощность можно измерить одним ваттметром. Показание ваттметра

$$Q_A = U_{BC} \cdot I_A \cdot \cos(I_A U_{BC}). \quad (8.30)$$

В соответствии с векторной диаграммой угол между линейным напряжением U_{BC} и током I_A .

$$\angle I_A \cdot U_{BC} = 90^\circ - \phi, \quad (8.31)$$

значит

$$Q_A = U_{BC} \cdot I_A \cdot \cos(90^\circ - \varphi) = U_A \cdot I_A \cdot \sin \varphi. \quad (8.32)$$

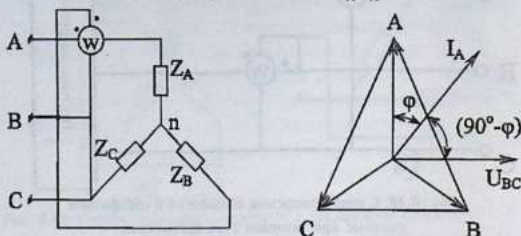


Рис. 8.19. Измерение реактивной мощности в трёхфазной системе.

Реактивная мощность трёхфазной системы

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (8.33)$$

Для измерения реактивной мощности несимметричной трёхфазной системы применяются специальные схемы.

8.17. Измерение электрической энергии

Для измерения электроэнергии применяются счетчики электрической энергии. Среди различных систем счетчиков в цепях постоянного тока больше применяются электродинамические счетчики, а в цепях переменного тока — индукционные счетчики. Электрические счетчики — это суммирующие приборы. Основное отличие счетчиков от показывающих приборов — это отсутствие пружины, ограничивающей поворот подвижной части. Однофазный индукционный счетчик состоит из двух катушек, постоянного магнита и установлен-

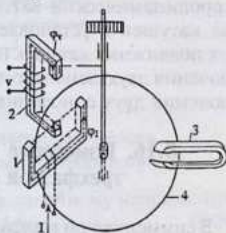


Рис. 8.20. Однофазный индукционный счетчик: 1-токовая катушка; 2-катушка напряжения; 3-постоянный магнит; 4-диск.

ного на оси алюминиевого диска (рис 8.20). Катушка напряжения имеет большое число витков и подключается к нагрузке параллельно. Последовательная (токовая) катушка подключается к нагрузке последовательно и имеет несколько витков.

Известно, что индуктивность катушки пропорциональна квадрату числа витков. Поэтому индуктивность катушки напряжения намного больше индуктивности токовой катушки. По этой причине ток и магнитное поле Φ катушки напряжения отстает примерно на 90° от тока и магнитного поля Φ_1 токовой катушки (рис. 8.21). При их сложении возникает бегущее магнитное поле, которое создает в диске токи. При взаимодействии этих токов с магнитным полем возникает вращающий момент:

$$M_{\text{вр}} = K_1 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = K_1 \cdot P. \quad (8.34)$$

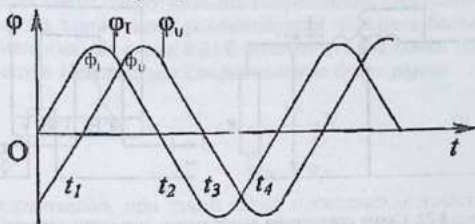


Рис. 8.21. Магнитные потоки токовой катушки и катушки напряжения индукционного счетчика.

Тормозной момент создается вихревыми токами, создаваемыми в диске постоянным магнитом. Тормозной момент пропорционален скорости вращения диска

$$M_T = K_2 \cdot n, \quad (8.35)$$

где n — скорость вращения диска

При установившемся положении

$$M_{\text{вр}} = M_T;$$

$$K_1 P = K_2 \cdot n,$$

откуда

$$p = \frac{K_2}{K_1} \cdot n = k \cdot n. \quad (8.36)$$

Умножим это выражение на t :

$$P \cdot t = K \cdot n \cdot t, \quad (8.37)$$

где $P \cdot t = W$ — энергия, затраченная за время t ;

$n \cdot t = N$ — число оборотов диска за время t ;

K — постоянная счетчика.

Значит $W = K \cdot N$.

$$K = \frac{W}{N}. \quad (8.38)$$

Таким образом, затраченная энергия пропорциональна числу оборотов диска. Шкалу счетного механизма можно отградуировать в единицах электроэнергии.

На рис. 8.22, а показана принципиальная схема соединения счетчика, а на рис. 8.22, б дана практическая схема

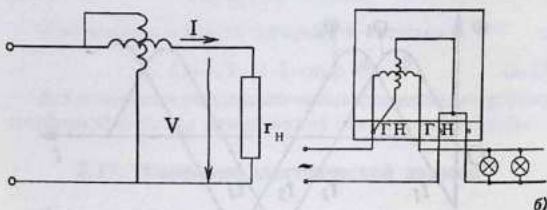


Рис. 8.22. Схема соединения однофазного индукционного счетчика:

а) принципиальная схема; б) практическая схема соединений.

соединения однофазного индукционного счетчика. В трехфазных четырехпроводных цепях для измерения электроэнергии применяется трехэлементный счетчик. В трехфазных трехпроводных цепях для измерения электроэнергии применяются двухэлементные счетчики с двумя дисками или однодисковые счетчики.

8.18. Измерение сопротивлений

1. Метод амперметра и вольтметра

В соответствии с законом Ома для нахождения сопротивления достаточно знать величины напряжения и тока цепи. На схеме 8.23 а вольтметр подключен впереди амперметра. В соответствии с показаниями приборов величина неизвестного сопротивления равна:

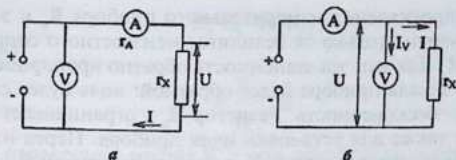


Рис. 8.23. Схема измерения сопротивления при помощи амперметра и вольтметра: а) схема измерения больших сопротивлений; б) схема измерения малых сопротивлений.

$$R_x' = \frac{U + U_A}{I} = \frac{U}{I} + \frac{U_A}{I} = R_x + R_A \quad (8.39)$$

Следовательно, при такой схеме с увеличением величины неизвестного сопротивления погрешность уменьшается. Поэтому по такой схеме рекомендуется измерять большие сопротивления. На схеме 8.23 б вольтметр подключен после амперметра. Неизвестное сопротивление будет равно:

$$R_x'' = \frac{U}{I + I_v} = \frac{U}{\frac{U}{R_x} + \frac{U}{R_v}} \quad (8.40)$$

Следовательно, при такой схеме насколько неизвестное сопротивление будет меньше сопротивления вольтметра, настолько будет меньше погрешность. По этой причине по такой схеме рекомендуется измерять небольшие сопротивления.

2. Метод измерения омметром.

Для измерения сопротивлений широко применяются омметры. На рис. 8.24 дана принципиальная схема омметра. В соответствии с законом Ома для этой схемы

$$I = \frac{E}{R_{огр} + R_x + R_{\mu}} \quad (8.41)$$

При неизменных значениях ограничительного сопротивления

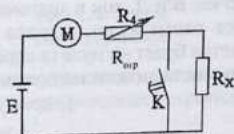


Рис. 8.24. Схема омметра: И-магнитоэлектрический прибор (миллиамперметр); $R_{огр}$ -ограничительное сопротивление; R_x -неизвестное сопротивление; Е-источник тока.

$R_{\text{огр}}$, сопротивления измерительного прибора $R_{\text{и}}$ и э.д.с. E ток I зависит только от величины неизвестного сопротивления R_x . Так как эта зависимость обратно пропорциональная, то шкала прибора будет обратной: ноль будет справа, а слева — бесконечность. Резистор $R_{\text{огр}}$ ограничивает ток и служит также для установки нуля прибора. Перед измерением надо нажать кнопку K и вращением ручки $R_{\text{огр}}$ установить прибор на ноль. При отсутствии кнопки надо замкнуть зажимы прибора коротким проводом и вращением ручки $R_{\text{огр}}$ установить прибор на ноль.

3. Измерение сопротивления при помощи моста постоянного тока.

Мосты постоянного тока применяются для точного измерения сопротивлений (рис. 8.25). Мост состоит из четырех AB , BC , CD , DA плеч и двух диагоналей AC и BD . В плечи моста включены сопротивления R_1 , R_2 , R_3 и R_4 , в диагональ AC — источник питания E , в диагональ BD — гальванометр G . Мост считается уравновешенным, если потенциалы точек B и D равны. Это состояние определяется при помощи гальванометра: при равенстве потенциалов точек B и D , ток в диагонали BD будет равен нулю, стрелка гальванометра будет на нуле (в середине шкалы). Для уравновешенного моста можно написать следующие уравнения:

$$I_1 \cdot R_1 = I_3 \cdot R_3; \quad I_2 \cdot R_2 = I_4 \cdot R_4; \quad I_1 = I_2; \quad I_3 = I_4. \quad (8.42)$$

Если почтенно разделить эти равенства друг на друга

$$\frac{I_1 \cdot R_1}{I_2 \cdot R_2} = \frac{I_3 \cdot R_3}{I_4 \cdot R_4} \quad \text{или} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}, \quad (8.43)$$

получим

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3.$$

Если в одно из плеч, например DA , вместо R_4 подключить неизвестное сопротивление R_x , то можно написать

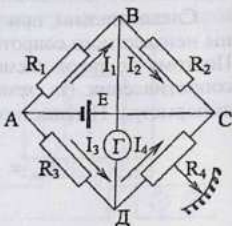


Рис. 8.25. Электрический мост для измерения сопротивления: G — гальванометр; E — источник тока.

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_x, \quad (8.44)$$

отсюда

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_4$$

В переносных мостах R_4 — это переменное сопротивление, его ручка выносится на лицевую панель и имеется шкала, на которой можно определить значение R_4 . Кроме того, в мостах $R_1 = R_2$. Таким образом,

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_4 = R_4. \quad (8.45)$$

Значит, уравновесив мост, по шкале R_4 можно определить величину неизвестного сопротивления R_x .

4. Измерение сопротивления изоляции.

Для этих целей применяются мегомметры. На рис. 8.26 показан общий вид переносного мегомметра. Провод, сопротивление изоляции которого измеряется, подсоединяется к зажиму Л, а зажим Е соединяется с землей. Рукоятка генератора мегомметра вращается от руки со скоростью примерно 120 об/мин. и по шкале определяем сопротивление изоляции провода. Для измерения сопротивления изоляции между двумя проводами они подключаются к обоим зажимам прибора. Сопротивление электрических устройств измеряется таким же способом.

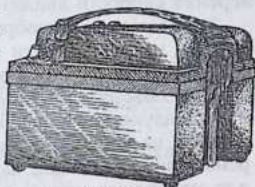


Рис. 8.26. Общий вид мегомметра.

8.19. Измерение неэлектрических величин электрическими методами

Измерение неэлектрических величин электрическими методами широко применяется в технике, так как электрические методы дают возможность высокоточного, беспрерывного измерения на расстоянии. В большинстве слу-

чаев неэлектрическая величина преобразуется в какой-либо электрический параметр и, измерив его, определяют неэлектрическую величину. Устройство, преобразующее неэлектрическую величину в электрический параметр, называется измерительным преобразователем или датчиком. Если неэлектрическая величина преобразуется в R , L или C , то такой преобразователь называется параметрическим. Если неэлектрическая величина преобразуется в э.д.с., то такой преобразователь называется генераторным. Параметрические преобразователи бывают следующих типов.

1. Проволочные преобразователи — принцип их работы заключается в изменении сопротивления деформированного провода. Эти преобразователи называются также тензометрическими датчиками.

2. Термисторные преобразователи — это терморезисторы. Их сопротивление зависит от движения среды или условий распространения тепла и применяются они для измерения скорости движения газов, их состава и т.д.

3. Реостатные преобразователи — принцип их работы основан на зависимости их сопротивления от положения ползунка. Применяются они для измерения уровня жидкостей, их объема, линейных и угловых перемещений и т.д.

4. Индуктивные преобразователи — принцип их работы основан на изменении магнитного поля катушки при перемещении подвижной части сердечника. Применяются они для измерения механических перемещений, давлений, уровня жидкостей и грунтов и т.д.

5. Емкостные датчики — принцип их работы основан на зависимости их емкости от измеряемого параметра. Они применяются для измерения уровня жидкостей, влажности, давления, линейных и угловых перемещений и т.д.

6. Фоторезисторные преобразователи — принцип их работы основан на зависимости их сопротивления от освещенности. Применяются они в цепях автоматики, для измерения прозрачности среды и т.д.

Генераторные датчики бывают следующих видов.

1. Термоэлектрические преобразователи — они называются также термопарой. Принцип их работы основан на том, что при нагревании их рабочего конца между свободными концами появляется э.д.с., величина которой зави-

сит от температуры рабочего конца. Поэтому термопары применяются для измерения температуры.

2. Тахогенераторы — в них э.д.с. зависит от скорости вращения. На практике применяются магнитоэлектрические, асинхронные и синхронные тахогенераторы.

3. Пьезоэлектрические преобразователи — принцип их работы основан на том, что в некоторых кристаллах под воздействием силы появляется э.д.с. Применяются они для измерения силы, давлений и амплитуды низкочастотных колебаний.

4. Фотоэлектрические преобразователи (солнечные фотоэлементы) — в них под воздействием света появляется э.д.с. Они применяются в качестве источников э.д.с. в различных электрических устройствах, космических кораблях.

Для измерения выходных величин параметрических преобразователей применяются логометры, электрические мосты, омметры. Для измерения э.д.с. генераторных датчиков применяются вольтметры, компенсаторы.

Задачи

Задача 8.1. Предел измерения вольтметра—30 В, класс точности—0,5. Определить самую большую абсолютную ошибку, относительные ошибки при 5 и 15 В.

Решение: 1. Самая большая абсолютная ошибка:

$$\Delta U_M = 0,5\% \cdot 30 = 0,15 \text{ В.}$$

2. Относительные ошибки: при 5 вольтах

$$\beta_1 = \frac{\Delta U_M}{U} \cdot 100\% = \frac{0,15}{5} \cdot 100\% = 3\%;$$

для 15 вольт

$$\beta_2 = \frac{\Delta U_M}{U} \cdot 100\% = \frac{0,15}{15} \cdot 100\% = 1\%.$$

Задача 8.2. Предел измерения миллиамперметра—300 мА, шкала имеет 150 делений. Образцовый прибор на последнем делении показал 300,3 мА. Определить класс точности миллиамперметра.

Решение: 1. Абсолютная ошибка прибора

$$\Delta I = I_u - I_d = 300,3 - 300 = 0,3 \text{ мА.}$$

2. Класс точности

$$\beta = \frac{\Delta I}{I_{150}} \cdot 100 = \frac{0,3}{150} \cdot 100 = 0,2,$$

где I_u — измеренное значение тока; I_d — действительное значение тока

Задача 8.3. Предел измерения амперметра с $R_A = 0,5 \text{ Ом}$ надо увеличить в 50 раз. Падение напряжения на шунте $U_{ш} = 75 \text{ мВ}$. Определить сопротивление шунта, ток полного поворота механизма прибора, максимальное значение тока после расширения предела амперметра.

Решение: 1. Сопротивление шунта:

$$R_{ш} = \frac{R_A}{n-1} = \frac{0,5}{50-1} = 0,0102 \text{ Ом.}$$

2. Максимальный ток, измеряемый амперметром после расширения предела:

$$I_M = \frac{U_{ш}}{R_{ш}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{0,0102} = 7,5 \text{ А.}$$

3. Ток полного поворота механизма прибора

$$I_A = \frac{I_M}{n} = \frac{7,5}{50} = 0,15 \text{ А.}$$

Задача 8.4. Сопротивление амперметра $R_A = 15 \text{ Ом}$, предел измерения — 60 А, сопротивление наружного шунта $R_{ш} = 0,005 \text{ Ом}$. Определить ток полного поворота механизма прибора.

Решение: 1. Находим коэффициент расширения предела измерения прибора:

$$R_{ш} = \frac{R_A}{n-1} \text{ или } n-1 = \frac{R_A}{R_{ш}};$$

$$n = \frac{R_A}{R_{ш}} + 1 = \frac{15}{0,005} + 1 = 3001.$$

2. Ток полного поворота механизма прибора

$$I_A = \frac{I_M}{n} = \frac{60}{3001} = 0,02.$$

Задача 8.5. Предел измерения электродинамического вольтметра $U_v = 300$ В, сопротивление вольтметра $R_v = 30$ кОм. Необходимо расширить предел измерения до 1500 В.

Определить величину добавочного сопротивления, максимальную мощность, потребляемую вольтметром при основном и расширенном пределе.

Решение: 1. Коэффициент расширения предела измерения:

$$m = \frac{U}{U_v} = \frac{1500}{300} = 5.$$

2. Добавочное сопротивление

$$R_d = R_v(m-1) = 30(5-1) = 120 \text{ кОм}.$$

3. Мощность, потребляемая вольтметром при 300 В

$$P_1 = \frac{U_v^2}{R_v} = \frac{300^2}{3 \cdot 10^4} = \frac{9 \cdot 10^4}{3 \cdot 10^4} = 3 \text{ Вт};$$

при 1500 В

$$P_2 = \frac{U^2}{R_v} = \frac{1500^2}{3 \cdot 10^4} = 15 \text{ Вт}.$$

$$P = U \cdot I = U \cdot \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R}.$$

Задача 8.6. Пределы измерения вольтметра и амперметра $U = 15$ В, $I = 0,5$ А, классы точности 0,5 (для вольтметра) и 1,0 – для амперметра. При измерении сопротивления вольтметр показал $U = 12$ В, амперметр $I = 0,25$ А. Определить максимальную абсолютную и относительную ошибки.

Решение: 1. Сопротивление равно

$$R = \frac{U}{I} = \frac{12}{0,25} = 48 \text{ Ом}.$$

2. Абсолютные погрешности приборов равны

$$\Delta U_{\max} = 0,5\% \cdot 15 = 0,075 \text{ В};$$

$$\Delta I_{\max} = 1\% \cdot 0,5 = 0,005 \text{ А}.$$

3. Максимальное значение сопротивления:

$$R_{\max} = \frac{U + \Delta U_{\max}}{I - \Delta I_{\max}} = \frac{12 + 0,075}{0,25 - 0,005} = 49,3 \text{ Ом}.$$

4. Относительная погрешность:

$$\beta = \frac{R_{\max} - R}{R} \cdot 100\% = \frac{49,3 - 48}{48} \cdot 100\% = 2,7\%.$$

Задача 8.7. Показания ваттметров в фазах четырехпроводной трехфазной системы равны $P_A = 210 \text{ Вт}$, $P_B = 320 \text{ Вт}$, $P_C = 375 \text{ Вт}$, линейное напряжение $U_L = 220 \text{ В}$, коэффициент мощности в каждой фазе $\cos \varphi = 0,7$.

Определить полную, активную и реактивные мощности трехфазной системы, а также активное, реактивное и полное сопротивления каждой фазы.

Решение: 1. Активная мощность трехфазной системы

$$P = P_A + P_B + P_C = 210 + 320 + 375 = 905 \text{ Вт}.$$

2. Токи фаз равны:

$$I_A = \frac{P_A}{U_{\phi} \cdot \cos \varphi} = \frac{210}{127 \cdot 0,7} = 2,36 \text{ А};$$

$$I_B = \frac{320}{127 \cdot 0,7} = 3,6 \text{ А}; \quad I_C = \frac{375}{127 \cdot 0,7} = 4,2 \text{ А},$$

$$\text{т.к. } U_{\phi} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В}.$$

3. Полные мощности фаз

$$S_A = U_{\phi} \cdot I_A = 127 \cdot 2,36 = 299,8 \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$S_B = U_{\phi} \cdot I_B = 127 \cdot 3,6 = 457,6 \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$S_C = U_{\phi} \cdot I_C = 127 \cdot 4,2 = 533,4 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Полная мощность системы:

$$S = S_A + S_B + S_C = 1290,4 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

4. Реактивная мощность системы равна

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(1290,4)^2 - 905^2} = 920 \text{ вар.}$$

5. Полное сопротивление фаз:

$$Z_A = \frac{U_\phi}{I_A} = \frac{127}{2,36} = 53,8 \text{ Ом};$$

$$Z_B = \frac{127}{3,6} = 35,5 \text{ Ом} \quad Z_C = \frac{127}{4,2} = 30,2 \text{ Ом.}$$

6. Активные сопротивления фаз:

$$R_A = Z_A \cdot \cos \varphi = 53,8 \cdot 0,7 = 37,6 \text{ Ом};$$

$$R_B = 35,5 \cdot 0,7 = 24,8 \text{ Ом}; \quad R_C = 30,2 \cdot 0,7 = 21,1 \text{ Ом.}$$

7. Реактивные сопротивление фаз:

$$X_A = Z_A \cdot \sin \varphi = 53,8 \cdot 0,714 = 39 \text{ Ом};$$

$$X_B = 35,5 \cdot 0,714 = 25,3 \text{ Ом}; \quad X_C = 30,2 \cdot 0,714 = 21,5 \text{ Ом,}$$

$$\text{т.к. } \sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \sqrt{1 - (0,7)^2} = 0,714.$$

Задача 8.8. Электрический счетчик имеет следующие параметры: $U=120 \text{ В}$, $I=10 \text{ А}$ 1 кВт-час—625 оборотов, диск счетчика за 10 мин сделал 450 оборотов. Определить постоянную счетчика и мощность нагрузки.

Решение: 1. Постоянная счетчика равна

$$K = \frac{W_n}{N_n} = \frac{1000 \cdot 3600}{625} = 5760 \text{ Вт} \cdot \text{с/об.}$$

2. Находим мощность нагрузки:

$$P \cdot t = K \cdot N,$$

отсюда

$$P = \frac{KN}{t} = \frac{5760 \cdot 450}{600} = 4320 \text{ Вт,}$$

где $t=10 \text{ мин} \cdot 60 \text{ с} = 600 \text{ с.}$

ГЛАВА 9

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

9.1. Устройство асинхронного двигателя

Среди электрических двигателей самым распространенным является трехфазный асинхронный электродвигатель, изобретенный русским инженером Доливо-Добровольским М.О. Причиной этого является создание вращающегося магнитного поля при помощи трехфазного тока. Асинхронными они называются потому, что скорость вращения ротора всегда меньше скорости вращения магнитного поля статора, т.е. вращается несинхронно с ним. Эти двигатели просты по устройству, надёжны в эксплуатации и недороги.

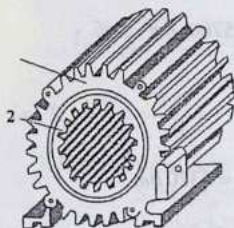


Рис. 9.2. Статор асинхронного двигателя без обмотки:
1-стальной корпус; 2-сердечник.

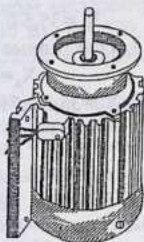


Рис. 9.1. Общий вид асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Как и всякая электрическая машина, асинхронные машины могут работать как двигателями, так и генераторами. Но из-за некоторых недостатков асинхронные генераторы на практике не применяются. Поэтому в дальнейшем мы рассмотрим устройство и работу асинхронных электродвигателей (рис.9.1). Как и всякая электрическая машина асинхронный двигатель

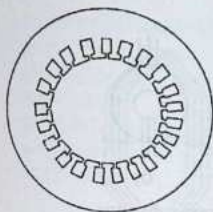


Рис. 9.3. Стальной лист сердечника статора.

состоит из ротора и статора. Корпус статора (рис.9.2) имеет цилиндрическую форму и изготавливается из стали, чугуна и алюминия. Внутри статора запрессован ферромагнитный сердечник. Сердечник статора собирают из круглых листов электротехнической стали (Рис. 9.3) с пазами на внутренней стороне. В эти пазы укладывается трехфазная обмотка статора. Для улучшения условий охлаждения наружная часть корпуса статора выполняется ребристой. Внутри статора располагается

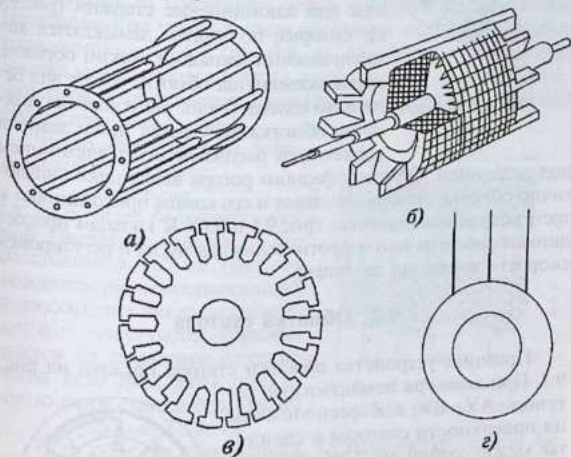


Рис. 9.4. Короткозамкнутый ротор: а) беличье колесо; б) разрез ротора; в) стальной лист сердечника; г) условное обозначение асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

ротор. (Рис.9.4 б). Сердечник ротора также собирается из круглых листов электротехнической стали с пазами на наружной поверхности. (Рис.9.2 в). В эти пазы укладывается обмотка ротора. В зависимости от типа обмотки асинхрон-

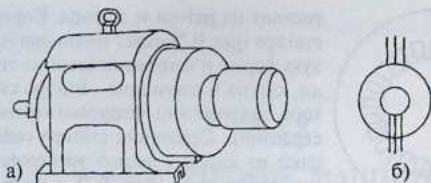


Рис. 9.5. Асинхронный электродвигатель с фазным ротором: а) общий вид; б) обозначение на схемах.

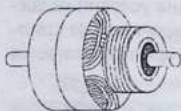


Рис. 9.6. Фазный ротор.

ные двигатели бывают с фазным и короткозамкнутым ротором. В пазы короткозамкнутых роторов укладываются медные или алюминиевые стержни (рис.9.4 а), которые по торцам замыкаются металлическими кольцами. Таким образом, короткозамкнутая обмотка имеет вид беличьего колеса. Очень часто короткозамкнутая обмотка получается путем заливки сердечника расплавленным алюминием под давлением. Обмотку фазного ротора выполняют аналогично обмотке статора двигателя и его концы присоединяют к трем контактным кольцам (рис.9.5 и 9.6). К кольцам присоединяют реостаты или сопротивления для пуска и регулировки скорости вращения двигателя.

9.2. Обмотка статора

Принцип устройства обмотки статора показан на рис. 9.7. При этом три неподвижные катушки AX, BY, CZ расположены на поверхности статора и сдвинуты между собой на 120° . Однако, устройство действительной обмотки несколько сложнее. Каждая фаза состоит из секций. На рис. 9.8 а показана секция, состоящая из четырех витков. Из этих четырех витков можно также выполнить две секции (рис. 9.8 б). Для складывания

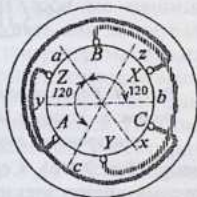


Рис. 9.7. Принцип устройства обмотки статора.

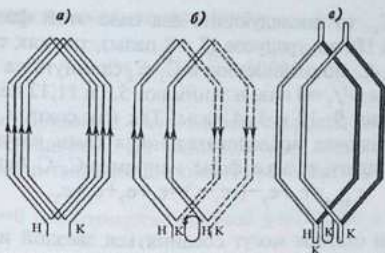


Рис. 9.8. Секции обмотки статора: а) секция обмотки статора; б) соединение двух секций; в) обозначение секций.

э.д.с. секций их соединяют между собой последовательно. Независимо от числа витков на схемах секции изображаются одновитковыми (рис.9.8, в). Активные стороны всех секций укладываются в пазах двумя слоями (рис.9.9): нижний слой изображается пунктирными линиями, верхний — сплошной линией.

Число пазов статора определяется по формуле:

$$z = 2p \cdot m \cdot q,$$

где $2p$ — число полюсных делений (полюсное деление — это расстояние в 180 эл. градусов между центрами соседних разных полюсов); m — число фаз обмотки; q — число пазов, приходящихся на полюсное деление фазы. Если $2p=2$, $m=3$, $q=2$, то число пазов статора будет равно

$$z = 2p \cdot m \cdot q = 2 \cdot 3 \cdot 2 = 12.$$

Если обмотка двухслойная, то количество секций будет равно 12 . На каждую фазу приходится $12/3=4$ секции. Эти секции образуют две последовательно соединенные катушки. Они находятся под действием разных полюсов. На рис. 9.9. показана обмотка в развернутом виде. В круговой развертке показана зона влияния двух полюсных делений τ . В каждом полюсном делении каждая фаза занимает два паз, т.е. $q=2$. На рис. 9.9. начала фаз обозначены C_1, C_2, C_3 , а концы — C_4, C_5, C_6 . Если считать, что пазы 1 и 2 относятся

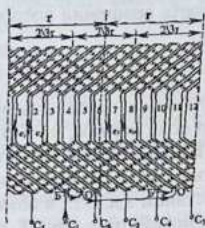


Рис. 9.9. Развертка двухслойной обмотки статора.

к фазе C_1-C_4 , то последующие два паза этой фазы будут сдвинуты на 180 эл. градусов (7 и 8 пазы), так как $\tau = \frac{2}{3p} = \frac{12}{2} = 6$. Фаза C_2-C_5 по отношению к C_1-C_4 сдвинута на 120° или на $\frac{2}{3}\tau$, т.е. на $6 \cdot \frac{2}{3} = 4$ паза и занимают 5, 6 и 11, 12 паза. Фаза C_3-C_4 занимает 9, 10 и 3, 4 паза. Так как секции катушек фазы соединяются последовательно, а сами катушки навстречу друг другу, то э.д.с. фазы, например C_1-C_4 будет равна $e_{c1-c4} = e_1 + e_2 - (-e_7 - e_8) = e_1 + e_2 + e_7 + e_8$.

Обмотки статора могут соединяться звездой или треугольником.

9.3. Принцип работы асинхронного двигателя

На обмотки статора от сети подается трёхфазное напряжение. Под действием этого напряжения в обмотках статора возникает ток, создающий вращающееся магнитное поле, скорость вращения которого определяется по формуле:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \text{ об/мин} \quad (9.1)$$

где f_1 — частота тока статора; p — число пар полюсов магнитного поля статора; n_1 — скорость вращения магнитного поля

Вращающееся магнитное поле статора пересекает обмотки статора и ротора и создает в них э.д.с. E_1 и E_2 . Под действием э.д.с. E_2 в обмотке ротора возникает ток I_2 . При взаимодействии тока I_2 и вращающегося магнитного поля возникает вращающийся момент и ротор начинает вращаться. При этом скорость вращения ротора всегда меньше скорости вращения магнитного поля статора, так как только в этом случае магнитное поле будет пересекать обмотку ротора и создавать э.д.с. E_2 . Отставание скорости вращения ротора от скорости вращения магнитного поля статора называется скольжением S :

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (9.2)$$

где n_2 — скорость вращения ротора.

В процентах скольжение равно

$$S\% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%.$$

Таким образом, с увеличением скорости ротора скольжение уменьшается. На холостом ходу скольжение будет очень незначительным. В момент пуска двигателя скорость

ротора $n_2=0$ и поэтому скольжение $S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{n_1}{n_1} = 1$ или

100%. С увеличением нагрузки скорость ротора уменьшается, скольжение увеличивается. При номинальной нагрузке скольжение равно 1–6%, при этом малые цифры относятся к мощным двигателям.

9.4. Э.д.с. обмоток статора и ротора

Вращающееся магнитное поле пересекает обмотки статора и ротора и создает в них э.д.с.

$$E_1 = 4,44 f_1 \omega_1 \Phi_m K_1 \quad (9.3)$$

$$E_2 = 4,44 f_2 \omega_2 \Phi_m K_2 \quad (9.4)$$

где E_1 и E_2 — э.д.с. обмоток статора и ротора; f_1 и f_2 — частоты этих э.д.с.; Φ_m — максимальный магнитный поток статора; K_1 и K_2 — постоянные коэффициенты, величины которых примерно равны 0,85–0,95.

В момент пуска магнитное поле статора вращается с максимальной скоростью относительно ротора, т.е. со скоростью n_1 . Поэтому частоты э.д.с. E_1 и E_2 будут равны ($f_1=f_2$), т.е.

$$E_2 = 4,44 f_1 \omega_2 \Phi_m K_2 \quad (9.5)$$

Разделив почленно выражения 9.3 и 9.5, получим:

$$\frac{E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot \omega_1 \cdot \Phi_m \cdot K_1}{E_2 = 4,44 \cdot f_1 \cdot \omega_2 \cdot \Phi_m \cdot K_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = K_E, \quad (9.6)$$

где K_E — коэффициент трансформации э.д.с. асинхронной машины.

Следовательно, в начальный момент, когда ротор еще неподвижен, асинхронный двигатель работает в режиме трансформатора.

С увеличением скорости вращения ротора скольжение уменьшается, соответственно уменьшается частота э.д.с. ротора.

$$f_{2s} = f_2 S, \quad (9.7)$$

где f_2 — частота э.д.с. неподвижного ротора; f_{2s} — частота э.д.с. вращающегося ротора; S — скольжение.

Пропорционально изменяется э.д.с. ротора:

$$E_{2s} = E_2 S \quad (9.8)$$

где E_{2s} — э.д.с. вращающегося ротора.

При $f_1 = 50$ Гц частота э.д.с. вращающегося ротора уменьшается от 50 Гц до 1–2 Гц, т.е. уменьшается в 25–50 раз. Соответственно эдс ротора в момент пуска будет максимальной, а затем, с увеличением скорости ротора, уменьшается в 25–50 раз. Если не учитывать падение напряжения в обмотке статора, то можно написать

$$U_1 = E_1,$$

где U_1 — напряжение, поданное на обмотку статора.

Таким образом, если напряжение сети не изменяется, то э.д.с. статора также не изменяется. При этом в воздушном промежутке происходит изменение магнитного потока в соответствии с изменением нагрузки. Ток ротора создает магнитное поле, направленное против магнитного поля статора и уравновешивающее его при каждом изменении нагрузки. Поэтому как и в трансформаторе с увеличением тока ротора увеличивается ток статора.

9.5. Сопротивление и ток ротора

При прохождении тока вокруг его проводников создаются магнитные потоки рассеяния, определяющие индуктивное сопротивление ротора. При неподвижном роторе это сопротивление будет максимальным:

$$X_2 = 2\pi f_1 L_2. \quad (9.9)$$

При вращении ротора

$$X_{2s} = 2\pi f_{2s} L_2 = 2\pi f_1 S L_2, \quad (9.10)$$

где X_{2s} — индуктивное сопротивление вращающегося ротора; L_2 — индуктивность обмотки ротора.

Из формул 9.9 и 9.10 следует

$$X_{2s} = X_2 S. \quad (9.11)$$

Таким образом, в процессе работы индуктивное сопротивление ротора сильно изменяется: при $S=1$ (ротор неподвижен) $X_{2s}=X_2$ и при $S=0$ $X_{2s}=0$. В двигателях нормального исполнения при изменении частоты от 50 Гц до 0 изменение активного сопротивления можно не принимать во внимание и считать $R_2=\text{const}$.

Согласно закону Ома ток обмотки ротора равен:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{Z_2} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}}, \quad (9.12)$$

где $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}$ — полное сопротивление обмотки ротора.

Так как в момент пуска э.д.с. ротора будет наибольшей, то ток также будет максимальным и превышать нормальный ток двигателя в 5–7 раз.

9.6. Вращающий момент асинхронного двигателя

Вращающий момент асинхронного двигателя определяется по формуле

$$M = c \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2, \quad (9.13)$$

где $I_2 \cdot \cos \varphi_2$ — активный ток ротора; φ_2 — угол сдвига фаз между током и э.д.с. ротора; c — постоянный коэффициент; Φ — магнитный поток статора.

Хотя ток двигателя в момент пуска в 5–7 раз больше номинального тока, пусковой момент больше номинального в 1,2–2,5 раз. Причина: в момент пуска двигателя индуктивное сопротивление X_2 ротора будет наибольшим и в 8–10 раз больше активного сопротивления. Следовательно, коэффициент мощности

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2}$$

будет наименьшим, т.е. сдвиг фаз между э.д.с. E_2 и током I_2 приближается к 90° . Отношение пускового момента к номинальному называется кратностью пускового момента

$$\frac{M_n}{M_{\text{п}}} = (1,2 + 2,5).$$

С увеличением скорости ротора его индуктивное сопротивление уменьшается. Так как активное сопротивление R_2 не изменяется, угол φ_2 уменьшается, активный ток $I_2 \cos \varphi_2$ ротора увеличивается, что ведет к увеличению вращающего момента. Подставив в формулу 9.13 вместо тока I_2 его выражение (формула 9.12.), получим

$$M = c \cdot \Phi \cdot \left(\frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}} \right) \cdot \left(\frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}} \right) = c \cdot \Phi \frac{E_{2s} \cdot R_2}{R_2^2 + X_{2s}^2}, \quad (9.14)$$

где $\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}}$ — коэффициент мощности вращающегося ротора.

В соответствии с формулой 9.14 для получения максимального момента его знаменатель должен быть минимальным, а для этого $R_2^2 = X_{2s}^2 \cdot S^2$ или $R_2 = S \cdot X_{2s} = X_{2s}$. Скольжение при этом будет равно $S = (10+15)\%$. Следовательно, при равенстве активного R_2 и индуктивного X_{2s} сопротивлений ротора вращающий момент будет максимальным. Отношение максимального момента к номинальному называется кратностью максимального момента:

$$\frac{M_m}{M_n} = 1,7 + 2,5$$

Из формулы 9.3. найдем выражение магнитного потока:

$$E_1 = 4,44 f_1 \omega_1 \Phi K_p;$$

$$\Phi = \frac{E_1}{4,44 \cdot f_1 \cdot \omega_1 \cdot K_1}$$

и подставим его в формулу 9.14:

$$\begin{aligned} M &= \frac{c}{4,44 \cdot f_1 \cdot \omega_1 \cdot K_1 \cdot K_e} \cdot \frac{E_1^2 \cdot S \cdot R_2}{R_2^2 + (S \cdot R_2)^2} = \\ &= c_m \cdot U_1^2 \frac{S \cdot R_2}{R_2^2 + (S \cdot X_2)^2} \end{aligned} \quad (9.15)$$

где $K_e = \frac{E_1}{E_2}$ — коэффициент трансформации э.д.с.;

$c_m = \frac{c}{4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot K_1 \cdot K_e}$ — постоянный коэффициент.

$E_1 = U_1$ — если частота и напряжение сети не изменяются. В этой формуле единственной переменной является скольжение S . На рис. 9.10 дана кривая зависимости вращающего момента от скольжения $M=f(S)$. При значениях скольжения S от нуля до максимального S_m двигатель работает устойчиво и вращающий момент растет. При дальнейшем увеличении скольжения вращающий момент уменьшается и работа двигателя будет неустойчивой. Из формулы 9.15 видно, что момент пропорционален квадрату напряжения, т.е. асинхронные двигатели чувствительны к понижению напряжения сети. Например, при понижении напряжения сети до $0,8 U_1$, т.е. на 20%, момент уменьшается до $(0,8 U_1)^2$, т.е. на 36%, что может привести к останову нагруженного двигателя.

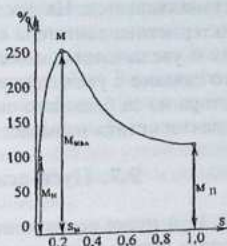


Рис. 9.10. График зависимости вращающего момента от скольжения асинхронного двигателя.

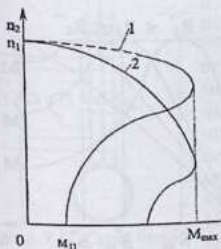


Рис. 9.11. Механические характеристики асинхронного двигателя: 1 — с короткозамкнутым ротором; 2 — с фазным ротором.

На рис. 9.11 представлена механическая характеристика асинхронного двигателя — это зависимость скорости вращения от момента $n=f(M)$. Механическая характеристика является основной характеристикой любого электрического двигателя, определяющей его эксплуатационные возможности. На рис. 9.11.1 показана механическая характеристика асинхрон-

ного двигателя с короткозамкнутым ротором, пунктирной линией показана рабочая часть. Из характеристики видно, что до максимального момента $M_{\max}$ скорость двигателя уменьшается незначительно. Такая характеристика называется жесткой. При дальнейшем, даже незначительном увеличении момента скорость резко уменьшается и двигатель останавливается. На рис.9.11.2. показана механическая характеристика двигателя с фазным ротором. В этих двигателях с увеличением момента скорость резко уменьшается, что связано с увеличением падения напряжения в обмотке ротора из-за большего значения его сопротивления. Такая характеристика называется мягкой.

9.7. Пуск асинхронных двигателей

При пуске асинхронных двигателей через обмотки статора и ротора проходят токи, превышающие номинальный ток в несколько раз. При этом резко повышается температура обмоток, что ведет к их раннему старению. При больших пусковых токах напряжение сети понижается, что ведет к уменьшению вращающего момента двигателей, подключенных к этой сети. Если мощность двигателя значительно меньше мощности сети, то пуск его можно осуществлять непосредственным включением в сеть. Если мощность двигателя

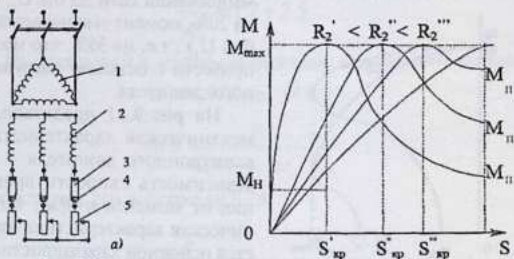


Рис. 9.12. Асинхронный двигатель с фазным ротором,

а — схема пуска асинхронного двигателя с фазным ротором:

1-обмотка статора; 2-обмотка ротора; 3-кольца; 4-щётки; 5-реостаты;

б — механические характеристики при различных активных сопротивлениях обмотки ротора.

сравнима с мощностью сети, то пуск его осуществляется уменьшением пускового тока.

1. Для пуска двигателей с фазным ротором обмотка ротора через контактные кольца подключается к пусковым реостатам. В первый момент пуска (рис. 9.12, а) сопротивления пусковых реостатов включаются полностью. Затем, по мере возрастания скорости ротора сопротивления реостатов при помощи их движков уменьшаются. По достижении нормальной скорости вращения реостаты полностью отключаются, обмотки ротора замыкаются между собой. Реостаты рассчитаны на кратковременный режим работы. Поэтому они включаются только на время пуска двигателя. Введением активных сопротивлений в цепь фазного ротора увеличивают коэффициент мощности $\cos\varphi_2$, пусковой момент и делают пуск плавным, а пусковой ток уменьшают.

2. Пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

2.1. Если мощность двигателя значительно меньше мощности сети, то пуск его осуществляют прямым включением в сеть. Мощные двигатели запускаются при помощи специальных устройств, уменьшающих пусковые токи.

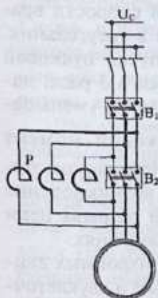


Рис. 9.13. Схема пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при помощи реакторов: Р-реактор; V_1 , V_2 -выключатели.

2.2. Пуск при помощи реакторов — катушек индуктивности (рис. 9.13). Сначала включается выключатель V_1 и при этом ток на двигатель поступает через трехфазный реактор Р, сопротивление которого ограничивает пусковой ток. По достижении нормальной скорости вращения включается выключатель V_2 , который шунтирует реактор. После этого на двигатель подается нормальное напряжение. Реакторы рассчитаны на кратковременный режим работы. Поэтому они включаются только на время пуска двигателя.

2.3. Автотрансформаторный пуск (рис. 9.14) — сначала включаются выключатели V_1 и V_2 и на двигатель через автотрансформатор АТ подается пониженное напряжение. После

достижения определенной скорости B_2 отключается, и двигатель питается через часть обмотки автотрансформатора АТ, который в этом случае играет роль реактора. После этого включается B_1 и на двигатель подается полное напряжение. Этот способ имеет следующие недостатки: 1) известно, что вращающий момент пропорционален квадрату напряжения. Из-за того, что в первый момент на двигатель подается пониженное напряжение, вращающий момент будет небольшим. Поэтому в начале пуска двигатель не должен быть полностью нагружен. 2) Дороговизна пусковой аппаратуры.

2.4. Пуск переключением «звезда-треугольник» (рис.9.15). При пуске обмотка

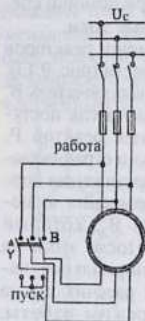


Рис. 9.15. Схема пуска асинхронного двигателя переключением обмотки статора со звезды на треугольник: В-переключатель.

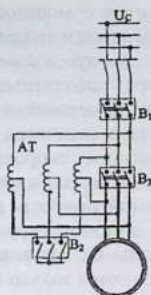


Рис. 9.14. Схема пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при помощи автотрансформатора: АТ-автотрансформатор, B_1 , B_2 , B_3 -выключатели.

статора включается в звезду и при достижении нормальной скорости вращения переключается в треугольник. При таком способе пуска пусковой ток в сети уменьшается в 3 раза, напряжение в фазах обмоток уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, пусковой момент уменьшается в 3 раза. Недостатком этого способа является возникновение перенапряжений из-за разрыва цепи двигателя при переключениях.

2.5. Пуск в ход асинхронных двигателей с глубокопазым и двуклеточным ротором (рис. 9.16).

Для увеличения пускового момента применяются глубокопазымные роторы (рис. 9.16 а). Известно, что в момент пуска частоты э.д.с. статора и ротора равны $f_1 = f_2$. При этом нижнюю часть

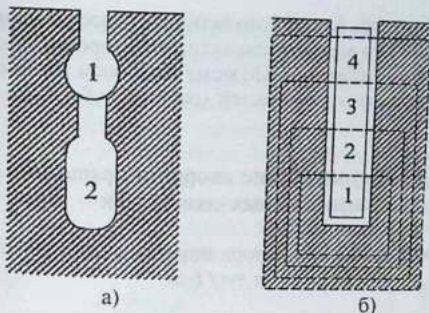


Рис. 9.16. Пазы ротора асинхронного двигателя:
а) глубокий паз; б) двухслойный паз.

проводника в пазе пересекает наибольшее число силовых линий магнитного поля. Поэтому нижние слои проводников имеют большее индуктивное сопротивление, чем верхние. Поэтому ток ротора вытесняется в верхние слои проводников. Из-за этого активное сопротивление обмотки ротора увеличивается, что ведет к увеличению активного тока $I_2 \cos \varphi_2$ и вращающего момента. С увеличением скорости ротора частота его э.д.с. f_{2s} уменьшается, явление вытеснения тока ротора прекращается, активное сопротивление ротора автоматически уменьшается.

Для увеличения пускового момента М.О. Доливо-Добровольский предложил асинхронный двигатель с двухклеточным ротором. В верхних пазах укладывается короткозамкнутая обмотка с $R_2 > X_2$ из латуни или бронзы. В нижних пазах укладывается короткозамкнутая обмотка с $R_2 < X_2$ из меди. При пуске двигателя, когда $f_1 = f_2$ нижняя обмотка имеет большое индуктивное сопротивление. Поэтому вращающий момент в основном создается верхней обмоткой с большим R_2 , благодаря чему уменьшается пусковой ток и увеличивается пусковой момент. С увеличением скорости ротора частота его э.д.с. f_{2s} уменьшается и доходит до 1–2 Гц при нормальной скорости, что ведет к резкому уменьшению индуктивного сопротивления нижней обмотки, называемой

рабочей обмоткой. Кроме того активное сопротивление этой обмотки намного меньше чем активное сопротивление верхней (пусковой) обмотки. Поэтому в рабочем режиме ток в основном проходит по нижней (рабочей) обмотке.

9.8. Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей

Скорость вращения ротора определяется по формуле:

$$n_2 = n_1(1-S) \quad (9.16)$$

или

$$n_2 = \frac{60f_1}{p}(1-S),$$

где n_2 — скорость вращения ротора;

n_1 — скорость вращения магнитного поля статора;

f_1 — частота тока статора;

p — число пар полюсов;

S — скольжение.

Следовательно, для изменения скорости вращения двигателя достаточно изменить один из параметров — f , p или S .

1. Изменение частоты питающего напряжения. Для этого необходимо применять специальные генераторы или преобразователи частоты, которые весьма дороги. Однако появление тиристоров создало возможность изготовления простых экономичных статических преобразователей. Их применение упрощает управление механизмами: отпадает необходимость в редукторах, трансмиссиях, коробках скоростей. Этот способ широко применяется при необходимости одновременного регулирования скорости вращения нескольких двигателей, а также вращения с большой скоростью.

2. Изменение скольжения. Из формул 9.14 и 9.15 видно что максимальный момент соответствует критическому скольжению, когда $R_2 = X_{2c}$. Изменяя активное сопротивление обмотки ротора, можно изменять положение максимума графика $M=f(S)$ (рис.9.12 б). Например, при увеличении активного сопротивления характеристика сдвигается вправо и при неизменном моменте скольжение увеличивается.

Изменение скольжения путем введения в цепь ротора реостатов возможно только для двигателей с фазным ротором. Схема при этом аналогична схеме пуска двигателя при помощи пусковых реостатов (рис. 9.12 а). Разница между ними в том, что регулировочные реостаты рассчитаны на длительный режим работы. Изменяя сопротивление регулировочных реостатов, можно плавно изменять скольжение. Например, при увеличении сопротивления скольжение увеличивается, скорость ротора уменьшается. Однако, механическая характеристика при этом получается ещё

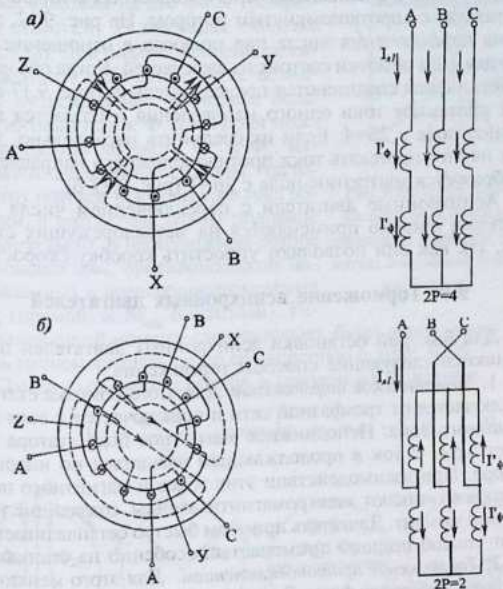


Рис. 9.17. Схемы включения обмоток двухскоростного асинхронного двигателя: а) последовательное соединение катушек обмотки; б) параллельное соединение катушек обмотки.

более мягкой. Другой недостаток этого способа — это значительные электрические потери на реостатах.

Изменять скольжение можно также уменьшая напряжение сети. Если при работающем двигателе уменьшить напряжение, ток ротора уменьшается, а скольжение увеличивается. В результате уменьшается скорость вращения ротора. Однако, значительное уменьшение напряжения может привести к резкому уменьшению момента и останову двигателя.

3. Изменение числа пар полюсов. Этот способ даёт возможность ступенчатого изменения скорости вращения и применяется только в специальных многоскоростных асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором. На рис. 9.17. дана схема переключения числа пар полюсов в отношении 2:1. Каждая фаза обмотки состоит из двух частей. Когда обе части обмотки фазы соединяются последовательно (рис. 9.17 а), в них протекают токи одного направления и создается магнитное поле с $2p=4$. Если их соединить параллельно, то в них начнут протекать токи противоположного направления и образуется магнитное поле с $2p=1$ (рис. 9.17 б).

Асинхронные двигатели с переключением числа пар полюсов широко применяются на металлорежущих станках, так как они позволяют упростить коробку скоростей.

9.9. Торможение асинхронных двигателей

Для быстрой остановки асинхронных двигателей применяются следующие способы торможения:

1. *Динамическое торможение.* Для этого обмотка статора отключается от трехфазной сети и подключается к сети постоянного тока. Неподвижное магнитное поле статора создает э.д.с. и ток в продолжающем вращаться по инерции роторе. При взаимодействии этих токов и магнитного поля статора возникают электромагнитные силы, создающие тормозной момент. Двигатель при этом быстро останавливается. Этот способ широко применяется, особенно на станках.

2. *Торможение противовключением.* Для этого меняются местами любые две фазы. В результате магнитное поле начинает вращаться в противоположную сторону. Ротор быстро останавливается и в этот момент надо двигатель отключить от сети. В противном случае ротор начнет вращаться в противоположную сторону. Этот способ применяется реже.

Причины: 1) необходима аппаратура, реагирующая на нулевую скорость; 2) в момент торможения выделяется большое количества тепла.

3. Применяются также торможение при помощи электромагнитных муфт и тормозов с электромагнитным управлением.

9.10. Однофазный асинхронный двигатель

На статоре этого двигателя располагаются две обмотки: 1) рабочая обмотка, похожая на две фазы трехфазной обмотки; 2) пусковая обмотка (рис. 9.18). При подаче переменного напряжения в рабочей обмотке возникает пульсирующее магнитное поле. Магнитный поток Φ этого поля можно разделить на части Φ_1 и Φ_2 , направленные в разные стороны. Частота этих потоков равна частоте тока обмотки, а амплитуды равны половине амплитуды Φ . В неподвижном роторе возникают два, противоположно направленных и вращающихся момента $M_{пр}$ (прямой) и $M_{обр}$ (обратный). Результирующий момент, следовательно, будет равен нулю. Теперь начнем вращать ротор со скоростью n_2 (рис. 9.19).

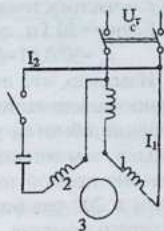


Рис. 9.18. Схема однофазного асинхронного двигателя: 1-рабочая обмотка; 2-пусковая обмотка; 3-ротор.

Тогда скольжение ротора в прямом направлении

$$S_{пр} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \text{ откуда } n_2 = n_1 - S \cdot n_1 \quad (9.17)$$

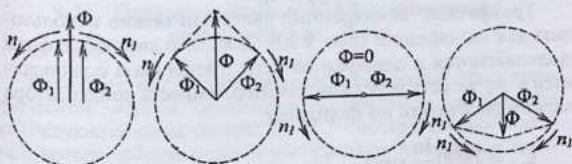


Рис. 9.19. Разложение пульсирующего магнитного потока на два вращающихся.

Скольжение по отношению к обратному полю

$$S_{обр} = \frac{n_1 + n_2}{n_1} = \frac{n_1 + n_1(1 - S_{пр})}{n_1} = 2 - S_{пр}, \quad (9.18)$$

где n_1 — скорость вращения Φ_1 и Φ_2 .

Частоты токов, создаваемых Φ_1 и Φ_2 в роторе

$$f_{пр} = S_{пр} \cdot f; \quad f_{обр} = (2 - S_{пр}) \cdot f, \quad (9.19)$$

где f — частота тока сети.

Если $f = 50$ Гц, скольжение $S_{пр} = 0,01$, то

$$f_{пр} = 50 \cdot 0,01 = 0,5 \text{ Гц}; \quad f_{обр} = (2 - 0,01) \cdot 50 = 99,5 \text{ Гц}.$$

Известно, что индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте. Следовательно, индуктивное сопротивление обмотки ротора прямому току почти в 200 раз меньше, чем сопротивление, оказываемое обратному току. Поэтому прямой ток и прямой вращающий момент будут почти в 200 раз больше обратного тока и обратного вращающего момента. Таким образом, если двигатель привести во вращение в любую сторону и потом нагрузить, то он будет продолжать вращение в эту сторону.

Для создания пускового момента ток на пусковую обмотку подается через конденсатор. В этом случае токи обмоток будут сдвинуты по фазе примерно на 90° . В результате взаимодействия магнитных потоков обмоток создается вращающий момент и двигатель начинает вращаться. После запуска двигателя пусковую обмотку надо отключить, так как она рассчитана на кратковременный режим работы. Однофазные асинхронные двигатели изготавливаются на мощность не более 500 ватт и в большинстве случаев они применяются в бытовых приборах.

Трехфазные асинхронные двигатели можно использовать как однофазные (рис. 9.20). Для этого две любые фазы подключаются к однофазной сети, третья фаза подключается в эту же сеть через конденсатор. Емкость конденсатора можно рассчитать по формулам:

$$C_p = 2800 \frac{I_n}{U} \text{ мкФ} \quad \text{— для схемы 9.20 а (обмотки статора}$$

соединены звездой);

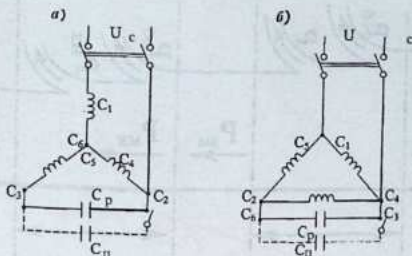


Рис. 9.20. Схемы пуска трехфазного асинхронного двигателя от однофазной сети: а) при соединении обмоток статора звездой; б) при соединении обмоток статора треугольником.

$$C_p = 4800 \frac{I_n}{U} \text{ мкф} - \text{ для схемы 9.20 б (обмотки статора соединены треугольником),} \quad (9.21)$$

где C_p — рабочий конденсатор;
 I_n — номинальный ток двигателя;
 U — напряжения сети.

Номинальное напряжение конденсатора определяется по формуле

$$U_k = 1,15 \cdot U. \quad (9.22)$$

Рабочий конденсатор постоянно подключен к двигателю, пусковой конденсатор C_n после запуска отключается.

9.11. Потери энергии и КПД асинхронных двигателей (рис. 9.21)

В соответствии с энергетической диаграммой часть электрической энергии, подаваемой на двигатель, расходуется на следующие виды потерь: P_{c1} , P_{c2} — потери в стали статора и ротора, потери в стали ротора из-за их малости можно не принимать во внимание; $P_{мех}$ — механические потери складывающихся частей о воздух.

КПД двигателя равен:

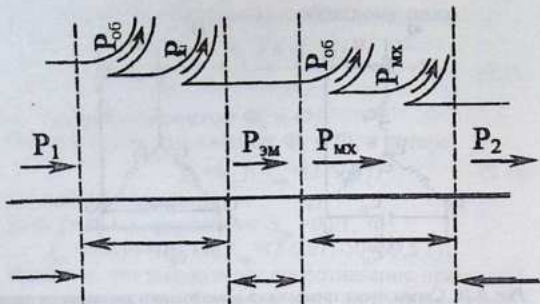


Рис. 9.21. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{P_1 - (P_{01} + P_{02} + P_{с1} + P_{с2})}{P_1} \cdot 100\% =$$

$$= \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} \cdot 100\%$$

где P_2 — мощность на валу двигателя.

Для большинства современных асинхронных двигателей КПД имеет значение 80–90%, а для мощных двигателей 90–96%.

Самое большое значение КПД соответствует при работе с мощностью, чуть меньшей номинальной нагрузки.

На рис.9.22, а приведена кривая КПД асинхронного двигателя.

9.12. Рабочие характеристики и коэффициент мощности асинхронных двигателей

Зависимость скорости вращения, тока, коэффициента мощности $\cos\phi$, КПД и вращающего момента от относительной мощности P/P_n при постоянном напряжении и частоте называется рабочими характеристиками (рис.9.22).

Асинхронные двигатели, как наиболее распространенные в промышленности, являются основными потребителями электроэнергии. На холостом ходу угол ϕ велик, так как двигатель потребляет только реактивный ток. С увели-

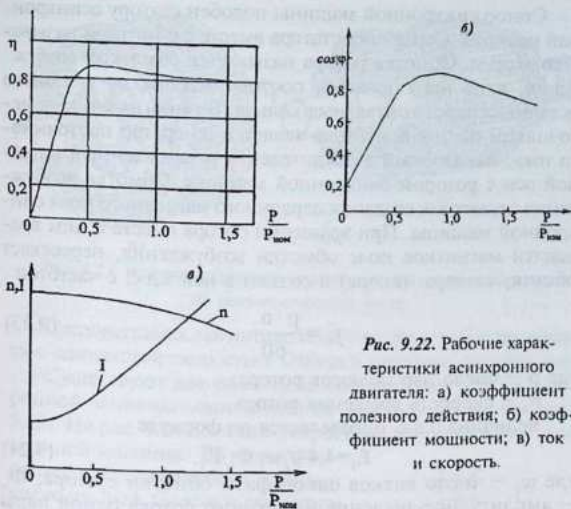


Рис. 9.22. Рабочие характеристики асинхронного двигателя: а) коэффициент полезного действия; б) коэффициент мощности; в) ток и скорость.

чением нагрузки возрастает активная составляющая тока, реактивная составляющая при этом мало изменяется, так как основной магнитный поток примерно постоянен. Таким образом, при увеличении нагрузки угол φ уменьшается, т.е. увеличивается $\cos \varphi$. При дальнейшем увеличении нагрузки выше номинальной коэффициент мощности уменьшается, так как сильно увеличиваются магнитные потоки рассеяния. Поэтому асинхронные двигатели должны быть достаточно нагружены; наибольшее значение $\cos \varphi$ получается при нагрузке чуть меньше номинальной.

9.13. Синхронные машины. Устройство и принцип работы

В синхронных машинах в установившемся режиме отношение скорости вращения ротора к частоте тока в цепи, подключенной к обмотке якоря, не зависит от нагрузки в области допустимых нагрузок.

Статор синхронной машины подобен статору асинхронной машины. Сердечник статора вместе с обмоткой называется якорем. Обмотка ротора называется обмоткой возбуждения, и на него подается постоянный ток от внешнего источника через контактные кольца. Во многих случаях источником постоянного тока является генератор постоянного тока, называемый возбудителем и установленный на одной оси с ротором синхронной машины. Обмотка возбуждения служит для создания первичного магнитного поля синхронной машины. При вращении ротора вместе с ним вращается магнитное поле обмотки возбуждения, пересекает обмотку статора (якоря) и создает в ней э.д.с. с частотой

$$f_i = \frac{p \cdot n_2}{60}, \quad (9.23)$$

где p — число пар полюсов ротора;

n_2 — скорость вращения ротора.

Величина э.д.с. определяется по формуле

$$E_i = 4,44 f_i \omega_1 \Phi_m K_i, \quad (9.24)$$

где ω_1 — число витков одной фазы обмотки статора; Φ_m — амплитудное значение магнитного потока одной пары полюсов обмотки возбуждения; K_i — коэффициент статора (якоря).

Э.д.с. статора создает трехфазную симметричную систему, и при подключении симметричной нагрузки в статоре создается трехфазная симметричная система токов. Эти токи как и в асинхронном двигателе создают вращающееся магнитное поле. Направление вращения магнитного поля статора соответствует направлению вращения ротора. Скорость вращения магнитного поля статора определяется по формуле:

$$n_1 = \frac{60 f_i}{p} \quad (9.25)$$

Подставив значение f_i из формулы 9.23 в 9.25, получим

$$n_1 = \frac{60 \cdot p \cdot n_2}{60 p} = n_2 \text{ или } n_1 = n_2. \quad (9.26)$$

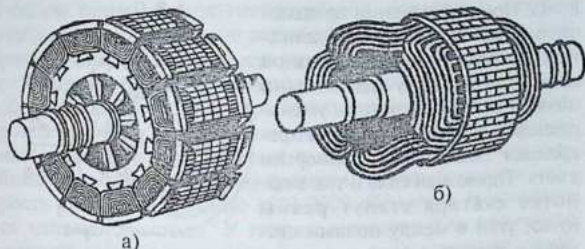


Рис. 9.23. Роторы синхронной машины: а) явнополюсный ротор; б) неявнополюсный ротор.

Следовательно, магнитное поле статора и ротор вращаются с одинаковой скоростью. Откуда и название синхронный.

Существуют две различные конструкции ротора синхронной машины—явнополюсная и неявнополюсная (рис. 9.23). На рис. 9.24 показано устройство явнополюсной синхронной машины. Её полюса выступают из поверхности ротора и число их $2p \geq 4$. Скорость вращения этих машин не должна превышать 1000–1500 об/мин, так как при больших скоростях центробежные силы могут разрушить ротор. Поэтому для быстроходных машин поменяется неявнополюсный ротор (рис. 9.25), в котором обмотка возбуждения укладывается в пазы ротора. Число полюсов неявнополюсного ротора $2p=2$ и $2p=4$.

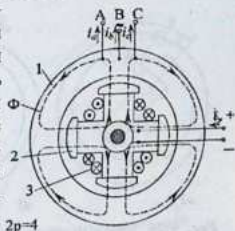


Рис. 9.24. Устройство явнополюсной синхронной машины: 1-статор; 2-полюсы ротора; 3-обмотка ротора.

При работе синхронной машины в режиме генератора ротор и его магнитное поле опережают магнитное поле статора на угол θ (рис. 9.26 а). При этом взаимодействие токов статора и поля машины создает тормозную силу, направленную против вращения ротора. Эту силу должен преодолеть первичный двигатель, механическая энергия которого преобразуется в электрическую. Поле ротора как бы ведет за собой поле статора. Э.д.с. статора больше напряжения сети

$E_1 > U$. При уменьшении вращающего момента первичного двигателя под воздействием тормозной силы угол θ между магнитными полями статора и ротора уменьшается. Когда $E_1 = U$ машина прекращает подачу электроэнергии в сеть. Тормозная сила и ток в обмотке статора станут равны нулю, угол θ между полями статора и ротора тоже становится равным нулю (рис. 9.26 б).

Если вместо вращающего момента (первичного двигателя) на ротор подключить механическую нагрузку, то ротор и его магнитное поле в своем вращении будут отставать от магнитного поля статора на угол θ (рис. 9.26 в). Опять при взаимодействии токов статора и поля

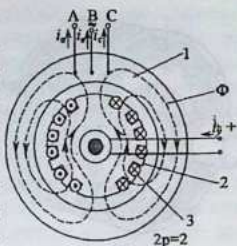


Рис. 9.25. Устройство неявнополюсной синхронной машины: 1-статор; 2-ротор; 3-обмотка ротора.

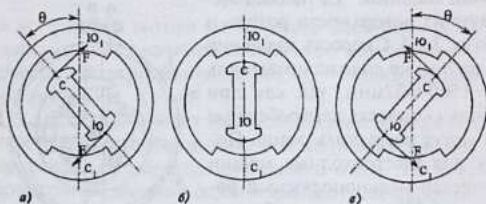


Рис. 9.26. Рабочий процесс синхронной машины: а) генераторный режим; б) переходный режим; в) режим двигателя.

машины возникает электромагнитная сила, создающая вращающий момент, которая стремится продвинуть ротор вперед. Под действием вращающего момента электрическая энергия сети преобразуется в механическую. Таким образом, синхронная машина переходит в режим двигателя.

9.14. Синхронные генераторы

Синхронные генераторы соединяются с первичными двигателями непосредственно. В качестве первичных дви-

гателей применяются гидротурбины, паровые и газовые турбины и относительно редко двигатели внутреннего сгорания. Синхронный генератор, приводимый в движение от гидротурбины называется гидрогенератором, имеет обычно малую скорость вращения (примерно десятки оборотов в минуту) и выполняется явнополюсным. Синхронный генератор, приводимый в движение от паровой турбины называется турбогенератором, имеет большую скорость вращения (обычно 1500-3000 об/мин) и выполняется неявнополюсным. У гидрогенераторов для получения нужной частоты переменного тока явнополюсный ротор выполняется с десятками полюсов. Чтобы получить тот же ток неявнополюсный ротор имеет два или четыре полюса.

При нагрузке синхронного генератора в обмотке статора возникает ток, создающий магнитное поле. Воздействие магнитного поля статора на магнитное поле ротора называется реакцией якоря, которая оказывает сильное воздействие на работу синхронного генератора.

1. Характеристика холостого хода — это зависимость напряжения генератора от тока возбуждения $U=f(I_f)$ при токе нагрузки $I=0$ и нормальной скорости вращения $n=n_n$ (рис. 9.27). На холостом ходу э.д.с. якоря (статора) и напряжение равны между собой

$$E=U, \text{ т.к. } I=0.$$

2. Внешняя характеристика — это зависимость напряжения якоря от тока нагрузки $U=f(I_a)$ при постоянных скорости вращения $n=n_n=\text{const}$, токе возбуждения $I_f=\text{const}$ и коэффициенте мощности $\cos\varphi=\text{const}$ (рис. 9.28). При индуктивной нагрузке реактивный ток размагничивает машину (с увеличением нагрузки напряжение уменьшается). С увеличением емкостной нагрузки напряжение генератора увеличивается.

3. Регулировочная характеристика — это зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при постоянных значениях

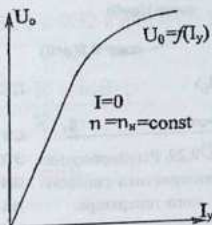


Рис. 9.27. Характеристика холостого хода синхронного генератора.

напряжения, скорости вращения и коэффициента мощности (рис.9.29).

9.15. Вращающий момент синхронной машины

Полная мощность трехфазного синхронного генератора при симметричной нагрузке

$$P = 3 E_1 \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (9.27)$$

где E_1 — э.д.с. якоря; I — ток якоря; φ — угол сдвига фаз между э.д.с. и током якоря. Эту мощность гене-

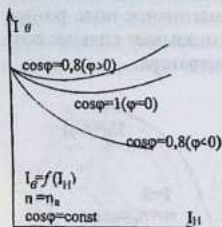


Рис. 9.29. Регулировочная характеристика синхронного генератора

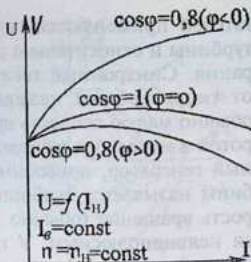


Рис. 9.28. Внешняя характеристика синхронного генератора.

ратору передает первичной двигатель. Если пренебречь потерями в машине, то момент, преодолеваемый первичным двигателем:

$$M = \frac{3U \cdot I \cdot \cos \varphi}{\omega_p}, \quad (9.28)$$

где ω_p — угловая скорость ротора.

Эта формула справедлива и для синхронного двигателя, но при этом момент M становится движущим. Э.д.с. генератора расходуется на создание напряжения между его зажимами, уравнивания э.д.с. от потоков рассеяния и реакции якоря и падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора:

$$\bar{E}_1 = \bar{U} + \bar{I}(X_p + X_a) + \bar{I} \cdot R_1 = \bar{U} + \bar{I} \cdot X_1 + \bar{I} \cdot R_1, \quad (9.29)$$

где X_p — индуктивное сопротивление рассеяния; X_a — индуктивное сопротивление реакции якоря; R_1 — активное сопротивление якоря.

$$X_1 = X_p + X_a.$$

На рис. 9.30 приведена векторная диаграмма синхронного генератора.

При этом активное напряжение $I \cdot R_1$ из-за малого значения не учтено. Из векторной диаграммы:

$$AB = E_1 \cdot \sin \theta = I \cdot X_1 \cdot \cos \varphi. \quad (9.30)$$

Следовательно

$$\frac{E_1 \cdot \sin \theta}{X_1} = I \cdot \cos \varphi. \quad (9.31)$$

Угловая скорость ротора равна

$$\omega_p = 2\pi \cdot n_2 / 60 = 2\pi f_1 / p = \omega / p. \quad (9.32)$$

Рис. 9.30. Векторная диаграмма синхронного генератора.

где $n_2 = \frac{60 f_1}{p}$ (из формулы 9.23);

$\omega = 2\pi f_1$ — угловая частота.

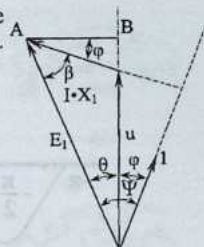
Подставив значения формул 9.31 и 9.32 в формулу 9.28, получим:

$$\begin{aligned} M &= \frac{3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi}{\omega p} = \frac{3 \cdot U \cdot E_1 \cdot \sin \theta \cdot p}{X_1 \cdot \omega} = \\ &= \frac{3 \cdot U \cdot \sin \theta \cdot p \cdot I_k}{\omega} = M_{\max} \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (9.33)$$

где $I_k = \frac{E_1}{X}$ — ток короткого замыкания генератора.

$$M_{\max} = \frac{3 \cdot U \cdot I_k \cdot p}{\omega} \text{ — максимальный момент.}$$

Таким образом, вращающий момент синхронной машины и ее мощность пропорциональны синусу угла сдвига между осями полюсов ротора и результирующего магнитного поля машины (рис. 9.26). Зависимость момента от синуса угла θ называется угловой характеристикой синхронной машины (рис. 9.31).



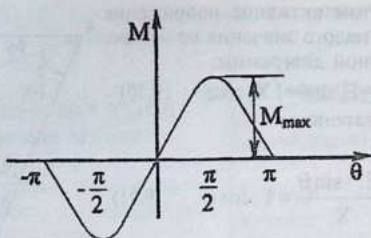


Рис. 9.31. Угловая характеристика синхронной машины.

9.16. Синхронные двигатели

В режиме двигателя синхронная машина потребляет энергию из сети и превращает ее в механическую энергию. Момент машины является движущим. При этом в формуле 9.33 угол $\theta < 0$. Физически это означает то, что в двигателе полюсы ротора отстают от вращающегося магнитного поля статора. Для того, чтобы продолжить синхронное вращение ротора необходимо, чтобы момент нагрузки не превышал наибольшего значения момента $M_{\max}$. В противном случае равновесие между моментами нарушится, машина выйдет из синхронизма, скорость ротора начнет уменьшаться, возникнут неопустимы колебания тока и вращающего момента. При этом двигатель должен быть немедленно отключен от сети.

Практически работа машины в качестве двигателя возможна только тогда, когда момент нагрузки меньше $M_{\max}$. Обычно при номинальной нагрузке угол θ равен $20-30^\circ$. При этом номинальный момент двигателя M_n не превышает $0,5 M_{\max}$.

При подключении двигателя в сеть ротор будет неподвижен.

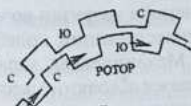
Пусть в этот момент взаимное расположение полюсов ротора и магнитного поля статора будет таким, как изображено на рис. 9.32 а. Из-за того, что разноименные полюса стремятся расположиться друг против друга, возникает момент, действующий на ротор (его направление показано на рис. 9.32 а). Через время равное половине периода тока, питающего статор, поле статора повернется на одно полюсное деление, т.е. полюсы поля статора поменяются местами. Из-за механической инерции за это время ротор

практически не сдвинется с места. Взаимное расположение полюсов статора и ротора станет таким, как изображено на рис.9.32 б. Теперь момент, действующий на ротор, изменит свое направление на противоположное. В результате ротор не сдвинется с места, так как на него действуют кратковременные толчки, изменяющие свое направление с частотой тока статора.

Для пуска синхронного двигателя надо произвести разгон ротора до синхронной скорости. В настоящее время широко применяется асинхронный пуск (рис. 9.33). Для его осуществления на полюсах ротора располагают специальную пусковую обмотку, подобную корот-



а)



б)

Рис. 9.32. Взаимодействие полюсов статора и ротора в момент пуска.

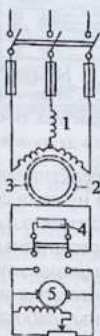


Рис. 9.33. Схема «асинхронного пуска» синхронного двигателя: 1-обмотка статора; 2-обмотка возбуждения (ротора); 3-короткозамкнутая обмотка; 4-сопротивление; 5-возбудитель.

козамкнутой обмотке асинхронного двигателя (типа «белые колесо»). При пуске обмотку возбуждения нельзя оставлять разомкнутой или замкнутой. В разомкнутой обмотке магнитное поле статора наводит очень большую э.д.с., опасную для изоляции проводов и обслуживающего персонала. В замкнутой обмотке возникают большие токи, что аналогично тому, что двигатель будет нагружен и он не войдет в синхронизм. Поэтому во время пуска обмотка возбуждения подключается на сопротивление, величина которой примерно в 10 раз больше, чем её сопротивление. Обмотка статора подключается в трехфазную сеть и возникает вращающееся магнитное поле. Оно индуцирует в короткозамкнутой обмотке токи, создающие враща-

ющий момент, двигатель разгоняется до некоторой скорости n , близкой к синхронной ($n \approx 0,95 n_1$). Затем обмотка возбуждения отключается от сопротивления и подключается к источнику постоянного тока. В результате под действием вращающегося магнитного поля статора и полюсов ротора двигатель втягивается в синхронизм.

При вращении ротора с синхронной скоростью в короткозамкнутой обмотке ток не возникает. Только при изменениях нагрузки возникают токи и вращающий момент, препятствующий колебаниям скорости.

Механическая характеристика синхронного двигателя является абсолютно жесткой (рис. 9.34), т.е. его скорость практически не зависит от нагрузки. Этот вывод можно сделать также из того, что $M_{\max}$ пропорционален U , а не U^2 , как в асинхронном двигателе. При изменении тока возбуждения изменяются э.д.с. обмотки статора и коэффициент мощности. При малых токах возбуждения э.д.с. статора будет меньше напряжения сети ($E < U$). При этом машина будет недовозбужденной, потреблять реактивную мощность. С увеличением тока возбуждения $\cos \varphi$ и E увеличивается. Когда э.д.с. E и напряжение сети станут равными, реактивная мощность, потребляемая от сети, станет равным нулю, а $\cos \varphi = 1$. При еще большем увеличении тока возбуждения э.д.с. станет $E > U$ и двигатель будет отдавать в сеть реактивный ток. Таким образом, в синхронной машине изменение тока возбуждения приводит к изменению реактивного тока и реактивной мощности сети. Синхронные машины, работающие в режиме перевозбуждения и являющиеся генераторами реактивной мощности, называются синхронными компенсаторами.

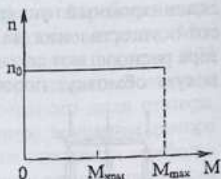


Рис. 9.34. Механическая характеристика синхронного двигателя.

Для нормальной работы асинхронных двигателей, трансформаторов необходим реактивный ток, который они потребляют из сети. Это приводит к уменьшению $\cos \varphi$ системы. Если рядом с такими потребителями в сеть подключить синхронный компенсатор, то он будет их снабжать

реактивной мощностью. В результате увеличивается коэффициент мощности генераторов электростанций, уменьшаются потери напряжения в линии. Синхронные компенсаторы имеют облегченную конструкцию, так как не несут механическую нагрузку. Но так как они длительное время работают в перевозбужденном режиме, то сечение проводов обмотки возбуждения берется несколько увеличенным.

9.17. Асинхронный исполнительный двигатель

В системах автоматики и вычислительной техники широко применяется двухфазный асинхронный двигатель с полым немагнитным ротором. Устройство двигателя показано на рис. 9.35. Двигатель имеет внешний и внутренний статоры, между которыми вращается тонкостенный (0,2-

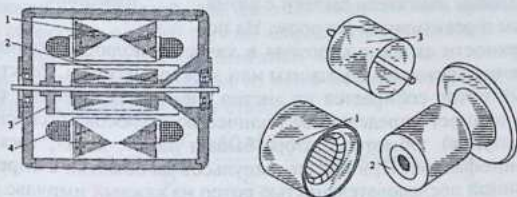
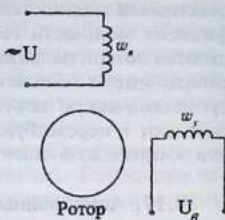


Рис. 9.35. Двухфазный исполнительный асинхронный двигатель:

1-внешний статор; 2-внутренний статор; 3-ротор; 4-обмотки статора.

1,0 мм) ротор из алюминиевого сплава, имеющий форму стакана. На внешнем статоре расположены две обмотки (рис. 9.36): 1) обмотка возбуждения w_v , на которую подается переменное напряжение от сети; 2) обмотка управления w_u , которая питается напряжением управления U_y , значение которого изменяется под воздействием управляющего сигнала. Для создания вращающего момента необходимо, чтобы между U_v и U_y был сдвиг по фазе, что можно сделать подключением конденсатора в цепь обмотки управления. Магнитное поле обмотки возбуждения создает в полom роторе вихревые токи. При взаимодействии этих токов и магнитного поля в обмотках управления возникает вращающий момент. В результате двигатель начинает вращаться.

Если активное сопротивление ротора будет малым и разорвется цепь обмотки управления, то ротор все равно продолжает вращаться. Поэтому для увеличения активного сопротивления ротора он выполняется в виде тонкостенного алюминиевого стаканчика.



9.18. Шаговые двигатели

Шаговые двигатели питаются импульсами электрической энергии и на каждый импульс поворачиваются на угол, называемый шагом. Шаговые двигатели бывают с активным и реактивным ротором. На поверхности активного ротора в качестве полюсов располагаются постоянные магниты или электромагниты. Реактивный ротор собирается из листов электротехнический стали и имеет определенное количество полюсов (полюсных выступов). Обмотка статора бывает одно-, двух-, трех- и многофазной. При подаче импульсов на обмотки с определенной последовательностью ротор на каждый импульс поворачивается на один шаг.

На рис. 9.37 изображена схема многофазного шагового двигателя с реактивным ротором. При подаче первого импульса на первую и вторую обмотки ротор поворачивается на один шаг. При подаче второго импульса на первую и третью обмотки ротор поворачивается еще на один шаг и

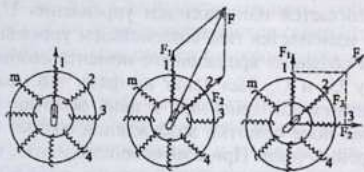


Рис. 9.37. Шаговый двигатель.

т.д. В большинстве случаев эти импульсы подаются при помощи электронного кольцевого коммутатора.

Шаговые двигатели, применяемые на станках с программным управлением, имеют очень маленький угол поворота. Например, шаговый двигатель ШД-4 на один импульс может поворачиваться на 3 или 1,5° при частоте приемистости 800 Гц. *Частотой приемистости* называется предельная частота следования импульсов, при которой возможен пуск и остановка двигателя без потери шага. Шаговый двигатель ШД-5Д на каждый импульс может поворачиваться на 1,5 и 0,75° при частоте приемистости 2000 Гц.

Задачи

Задача 9.1. Четырехполюсный асинхронный двигатель подключен к трехфазной сети частотой тока $f=50$ Гц и вращается со скоростью $n_2=1440$ об/мин. Определить скольжение.

Решение: 1. Так как двигатель 4-х полюсный, то число пар полюсов $p=2$. Исходя из этого находим скорость вращения магнитного поля статора:

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/мин.}$$

2. Скольжение равно:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\% = \frac{1500 - 1440}{1500} \cdot 100\% = 4\%.$$

Задача 9.2. Асинхронный двигатель питается от сети трехфазного тока с частотой $f_1=50$ Гц, магнитное поле статора имеет скорость вращения $n=1000$ об/мин. Определить число пар полюсов.

Решение: 1. Число пар полюсов равно:

$$p = \frac{60f_1}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{1000} = 3.$$

Задача 9.3. При номинальной нагрузке трехфазный двух-полюсный асинхронный двигатель имеет скольжение $S=4\%$, частота тока статора $f_1=50$ Гц. Определить скорость ротора.

Решение: 1. Скорость вращения магнитного поля статора

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ об/мин.}$$

2. Скорость вращения ротора находим из выражения

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%$$

$$S_{n1} = 100n_1 - 100n_2$$

$$100n_2 = 100n_1 - S_{n1}$$

$$n_2 = \frac{100n_1 - S_{n1}}{100} = \frac{100 \cdot 3000 - 4 \cdot 3000}{100} = 2880 \text{ об/мин.}$$

Задача 9.4. Магнитный поток трехфазного асинхронного двигателя $\Phi_u = 4 \cdot 10^{-3}$ Вб, э.д.с. статора, соединенного треугольником, равна $E=220$ В, частота тока $f_1=50$ Гц, коэффициент обмотки статора $K_1=0,95$. Определить число витков одной фазы обмотки статора.

Решение: Число витков одной фазы обмотки статора находим из формулы

$$E_1 = 4,44 f_1 \omega_1 \cdot \Phi_u \cdot K_1$$

$$\omega_1 = \frac{E_1}{4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_u \cdot K_1} = \frac{220}{4,44 \cdot 50 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95} = 260 \text{ витков.}$$

Задача 9.5. Индуктивное сопротивление неподвижного ротора $X_2=1,45$ Ом. Определить индуктивное сопротивление вращающегося ротора при скольжении $S=0,04$.

Решение: Индуктивное сопротивление вращающегося ротора при скольжении $S=0,04$

$$X_{2s} = X_2 \cdot S = 1,45 \cdot 0,04 = 0,058 \text{ Ом.}$$

Задача 9.6. У асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором обмотка статора соединена звездой и на него подан трехфазный ток напряжением 380 В и частотой $f_1=50$ Гц. В паспорте двигателя приведены следующие номинальные данные:

Скольжение $S=4\%$, число витков каждой фазы статора $w_1=80$, ротора $w_2=10$, магнитный поток $\Phi_m=1,3 \cdot 10^{-2}$ Вб, коэффициент обмотки статора $K_1=0,94$, ротора $K_2=0,97$. Определить э.д.с. статора и ротора при неподвижном и вращающемся роторе, коэффициент трансформации.

Решение: 1. Э.д.с. одной фазы статора:

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 \Phi_m K_1 = 4,44 \cdot 50 \cdot 80 \cdot 1,3 \cdot 10^{-2} \cdot 0,94 = 217 \text{ В.}$$

2. Э.д.с. неподвижного ротора:

$$E_2 = 4,44 f_1 w_2 \Phi_m K_2 = 4,44 \cdot 50 \cdot 10 \cdot 1,3 \cdot 10^{-2} \cdot 0,97 = 28 \text{ В.}$$

3. Э.д.с. ротора при скольжении $S=4\%$

$$E_{2s} = E_2 S = 28 \cdot 0,04 = 1,12 \text{ В.}$$

4. Коэффициент трансформации

$$K_E = \frac{E_1}{E_2} = \frac{217}{28} = 7,75.$$

Задача 9.7. В паспорте трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором приведены следующие номинальные данные: номинальная мощность $P_n=11$ кВт, напряжение $U_n=380$ В, скорость ротора $n_2=975$ об/мин, КПД $\eta=0,855$, $\cos \varphi=0,83$, кратность пускового тока $I_n/I_n=7$, кратность пускового момента $M_n/M_n=2$, скорость максимального вращения магнитного поля статора $n_1=1000$ об/мин.

Определить: ток, потребляемый двигателем;

- номинальный, пусковой и максимальный моменты;
- номинальный и пусковой токи; — можно ли запустить двигатель при уменьшении напряжения сети на 20%;
- номинальное скольжение;
- частоту току ротора;
- потери электроэнергии

Решение: 1) Мощность, потребляемая двигателем от сети:

$$P_i = P_n / \eta_n = 11 / 0,855 = 12,86 \text{ кВт}.$$

2. Номинальный момент двигателя

$$M_n = 9,55 \cdot P_n / n_2 = 9,55 \cdot 11000 / 975 = 107,7 \text{ н·м}.$$

3. Номинальный ток:

$$P_n = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cos \varphi_n \cdot \eta$$

$$I_n = \frac{11000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,855 \cdot 0,83} = 23,6 \text{ А};$$

пусковой ток

$$I_n = I_n \cdot 7 = 23,6 \cdot 7 = 165,2 \text{ А}.$$

4. Максимальный момент

$$M_{\max} = 2,2 \cdot M_n = 2,2 \cdot 107,7 = 237 \text{ н·м}$$

пусковой момент

$$M_n = 2 \cdot M_n = 2 \cdot 107,7 = 215,4 \text{ н·м}.$$

5. Номинальное скольжение

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\% = \frac{1000 - 975}{1000} \cdot 100\% = 2,5\%.$$

6. Частота тока ротора

$$f_2 = f_1 \cdot S = 50 \cdot 0,025 = 1,25 \text{ Гц}.$$

7. При уменьшении напряжения сети на 20% напряжение двигателя будет 0,8 U_n . Так как момент двигателя пропорционален квадрату напряжения, то пусковой момент будет равен

$$M'_n = (0,8 U_n)^2 \cdot M_n = 0,64 \cdot 215,4 = 138 \text{ н·м};$$

$$M'_n > M_n; 138 > 107,7.$$

Следовательно, двигатель можно запустить.

Задача 9.8. В паспорте синхронного генератора приведены следующие данные: число витков обмотки статора $w_1=226$, коэффициент обмотки $K_1=0,8$, скорость вращения $n_1=1500$ об/мин, число пар полюсов $p=2$, максимальный магнитный поток обмотки возбуждения $\Phi_u=0,01$ Вб. Определить э.д.с. холостого хода генератора.

Решение: частота э.д.с.:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p},$$

отсюда

$$f = \frac{P \cdot n_1}{60} = \frac{2 \cdot 1500}{60} = 50 \text{ Гц}.$$

2) Э.д.с. генератора:

$$E_{10} = 4,44 f_1 \cdot w_1 \cdot \Phi_u \cdot K_1 = 4,44 \cdot 50 \cdot 226 \cdot 0,01 = 401 \text{ В}.$$

ГЛАВА 10

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

10.1. Общие понятия

По своему назначению машины постоянного тока бывают генераторами и двигателями. Генераторы преобразуют механическую энергию в электрическую, двигатели преобразуют электрическую энергию в механическую.

Одна и та же машина может работать как генератором, так и двигателем. Ранее этим свойством обратимости машин постоянного тока широко пользовались. Например, на воздушных судах и автомобилях устанавливались стартер-генераторы. При запуске двигателей воздушных судов и автомобилей они работали в режиме двигателя (в качестве стартера), а в рабочем режиме работали в качестве генератора. Однако, когда одна и та же машина работает и двигателем и генератором, ухудшаются ее рабочие характеристики. Например, уменьшается КПД. Поэтому в настоящее время стартер-генераторы практически не применяются.

Генераторы постоянного тока применяются при электролизе, зарядке аккумуляторов, электрической сварке, устройствах привода и т.д. Двигатели постоянного тока применяются в электрическом транспорте, прокатных станах, подъемниках шахт, автоматических системах.

10.2. Устройство машин постоянного тока

Машина постоянного тока состоит из неподвижной части — станины и подвижного якоря. Изнутри к станине прикреплены полюса с обмотками возбуждения, создающие в машине основное магнитное поле. Магнитный поток этого поля замыкается через якорь и станину (рис 10.1). Сердечники полюсов собираются из листов электротехнической

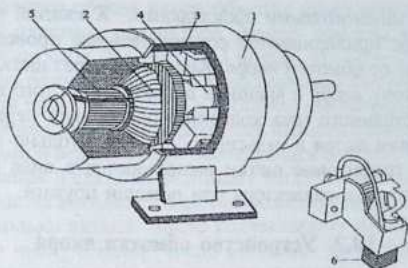


Рис. 10.1. Устройство машины постоянного тока: 1-станина; 2-якорь; 3-основные полюса; 4-дополнительные полюса; 5-коллектор; 6-щётка.

стали толщиной 0,5–1 мм, иногда из листов конструкционной стали толщиной 2 мм. Обычно листы не изолируются друг от друга, так как в стационарном режиме магнитный поток не изменяется. Концы полюсов заканчиваются выступами. Наконечники полюсов дают возможность крепления обмоток возбуждения и необходимого распределения магнитной индукции в воздушном

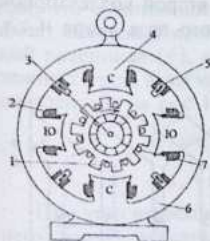


Рис. 10.2. Поперечное сечение машины постоянного тока:

1-сердечник якоря; 2-обмотка возбуждения; 3-ось; 4-основной полюс; 5-дополнительный полюс; 6-станина; 7-проводники обмотки якоря.

промежутке между полюсами и якорем. В машинах мощностью более 1 кВт между основными полюсами устанавливаются дополнительные полюса (рис 10.2). Они меньше основных полюсов и служат для улучшения коммутации. Сердечник якоря собирается из штампованных дисков электротехнической стали толщиной 0,5 мм. На поверхности якоря выполняются каналы, в которые укладываются проводники обмотки якоря. На одной оси с якорем устанавливается коллектор (рис 10.1). Цилиндрический коллектор состоит из медных пластин, изолированных друг

от друга миканитовыми прокладками. К каждой пластине коллектора привариваются соединительные проводники — «петушки» от обмотки якоря. Коллектор через щетки соединяет обмотку якоря с внешней цепью. Кроме того в генераторах постоянного тока коллектор преобразует переменный ток обмотки якоря в пульсирующий ток. Угольно-графитовые или графитовые щетки выполняются в виде призм и укладываются к коллектору при помощи пружин.

10.3. Устройство обмотки якоря

Рассмотрим простой генератор с двухполюсным якорем, на поверхности которого выполнено 6 каналов (пазов). На рис. 10.3 показана развернутая схема обмотки якоря. Обмотка якоря выполняется двухслойной, т.е. в каждом пазу друг на друга укладываются два слоя. Верхний слой обозначен сплошной линией, нижний слой — пунктирной линией. На рисунке провод от первой коллекторной пластины идет в верхний слой первого паза якоря, потом в нижний слой четвертого паза и после этого на вторую пластину коллектора. Потом провод от второй коллекторной пластины идет в верхний слой второго паза якоря и т.д.

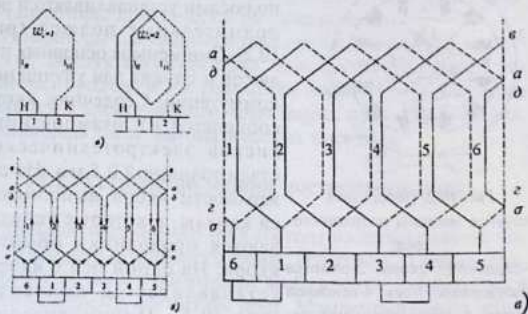


Рис. 10.3. Устройство обмотки якоря: а) секции обмотки якоря; б, в) развертки обмотки якоря.

После полного обхода якоря обмотка опять возвращается к первой пластине коллектора. Значит обмотка якоря замыкается на себя. На рис. 10.3 видно, что обмотка якоря состоит из одинаковых частей, называемых секцией. Концы секций присоединяются к соседнем коллекторным пластинам. В одном пазу укладываются нижний слой предыдущей секции и верхний слой последующей секции. При вращении якоря в секциях возникает э.д.с. В лобовых частях секций эдс не возникает. Секция может состоять из одного или несколько витков. Число коллекторных пластин соответствует числу секций. Число активных проводников обмотки якоря можно определить по формуле:

$$N=2\omega_c \cdot K,$$

где K — число коллекторных пластин; ω_c — число витков секций.

На рис. 10.3 б показаны направления э.д.с. активных проводников. Эти направления определяются по правилу правой руки. Так как обмотка якоря замкнута на себя, то сумма э.д.с. проводников равна нулю. Однако, при обходе обмотки видно, что направления э.д.с. под первой и четвертой коллекторными пластинами меняются. Это говорит о том, что обмотка состоит из двух параллельных ветвей и имеет два узла. Узел под четвертой пластиной имеет высокий потенциал (+), а под первой пластиной — низкий потенциал (—). К этим местам прижимаются щетки. В момент, показанный на рис 10.3б, напряжение между щетками:

$$\begin{aligned} U_1 &= e_1 + e_4 + e_2 + e_5 + e_3 + e_6 = \\ &= e_4 + e_1 + e_5 + e_2 + e_6 + e_3. \end{aligned} \quad (10.1)$$

При этом штрихом обозначены э.д.с. проводников нижнего слоя. Если якорь повернуть на 60° , величина напряжения и полярность щеток сохраняются, так как шестой паз занимает место первого, первый — место второго и т.д. Однако, при повороте якоря на угол меньший чем 60° положение изменится. Например, на рис 10.3 в показана развертка якоря при повороте на 30° . При этом две секции оказываются короткозамкнутыми, и каждая параллельная ветвь будет состоять из двух секций. Напряжение обмотки якоря для этого момента будет равно

$$U_2 = e_1 + e_4 + e_2 + e_3 = e_4 + e_1 + e_3 + e_2. \quad (10.2)$$

Таким образом, при вращении якоря направление его напряжения будет постоянным, а величина изменяется от U_1 до U_2 . Чем больше будет секций, тем меньше будут колебаний напряжения.

10.4. Э.д.с. якоря

Для определения э.д.с. якоря необходимо знать магнитную индукцию на его поверхности. Средняя величина магнитной индукции определяется как отношение магнитного потока пары полюсов к поверхности якоря, которую пересекает этот поток

$$B_{cp} = \frac{\Phi}{\tau \cdot l}, \quad (10.3)$$

где Φ — магнитный поток пары полюсов; τ — полюсное деление; l — активная длина секции.

Полюсное деление определяется из следующего выражения:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p}, \quad (10.4)$$

где D — диаметр якоря; $2p$ — число полюсов.

Следовательно,

$$B_{cp} = \frac{\Phi}{\frac{\pi \cdot D}{2p} \cdot l} = \frac{2p \cdot \Phi}{\pi D \cdot l}. \quad (10.5)$$

В соответствии с законом электромагнитной индукции э.д.с. одного активного проводника:

$$E_1 = B_{cp} \cdot l \cdot V = \frac{2p \cdot \Phi}{\pi \cdot D \cdot l} \cdot l \cdot V = \frac{2p \cdot \Phi}{\pi D} \cdot V, \quad (10.6)$$

где V — линейная скорость якоря, которая равна.

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}, \quad (10.7)$$

где n — скорость вращения якоря, об/мин.

Таким образом,

$$E_1 = \frac{2p \cdot \Phi}{\pi \cdot D} \cdot \frac{\pi D \cdot n}{60} = \frac{2p \cdot \Phi \cdot n}{60} \quad (10.8)$$

Э.д.с. обмотки якоря равна сумме э.д.с. проводников одной параллельной ветви

$$E = E_1 \cdot \frac{N}{2a} = \frac{2p\Phi \cdot n}{60} \cdot \frac{N}{2a} = \frac{p \cdot N}{60a} \cdot \Phi \cdot n = c_e \cdot \Phi \cdot n, \quad (10.9)$$

где $c_e = \frac{p \cdot N}{60a}$ — постоянный коэффициент;

$2a$ — число параллельных ветвей.

10.5. Реакция якоря (рис. 10.4)

В режиме холостого хода магнитное поле машины создается только обмоткой возбуждения (рис. 10.4 а). При подключении нагрузки возникает магнитное поле якоря (рис. 10.4 б). Токи в проводах, обозначенных +, текут за плоскость рисунка, а в проводах, обозначенных точками, токи текут к нам. Направления магнитных силовых линий определены по правилу буравчика.

Магнитное поле нагруженной машины определяется путем наложения друг на друга магнитных обмоток воз-

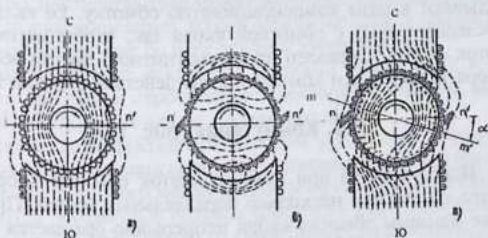


Рис. 10.4. Реакция якоря: а) магнитное поле обмотки возбуждения; б) магнитное поле обмотки якоря; в) результирующее магнитное поле.

буждения и якоря. При этом магнитное поле обмотки возбуждения будет устойчивым, а магнитное поле якоря изменяется с изменением нагрузки.

Действие магнитного поля якоря на магнитное поле обмотки возбуждения называется реакцией якоря. Линия $p-p'$, проведенная через середину между полюсами, называется геометрической нейтралью. Линия, соединяющая противоположные точки поверхности якоря, в которых магнитная индукция равна нулю называется физической нейтралью ($m-m'$). В ненагруженной машине геометрическая и физическая нейтраль совпадают.

Под действием реакции якоря магнитное поле машины искажается. Суммарный магнитный поток в генераторах поворачивается в направлении вращения якоря. При этом физическая нейтраль смещается относительно геометрической нейтрали на угол α (рис 10.4 в). При работе генератором поле усиливается под сбегающим краем полюсов и ослабляется под набегающим (рис 10.4 в). Поэтому средняя магнитная индукция нагруженной машины будет меньше, чем в ненагруженной. Соответственно уменьшается э.д.с. якоря. Таким образом, реакция якоря оказывает размагничивающее действие на машину.

При работе машины двигателем физическая нейтраль смещается в сторону, противоположную вращению. Поле усиливается под набегающим краем полюсов и ослабляется под сбегающим.

Для устранения реакции якоря на основных полюсах укладывают в пазы компенсационную обмотку. Её включают последовательно с обмоткой якоря так, чтобы магнитный поток ее был направлен против магнитного потока обмотки якоря и тем самым компенсировал действие реакции якоря.

10.6. Коммутация (рис. 10.5)

Известно, что при помощи щеток обмотка якоря делится на две или несколько параллельных ветвей. При работе машины обмотка якоря непрерывно вращается относительно щеток. При этом секции обмоток непрерывно переходят из одной параллельной ветви в другую с токами противоположных направлений (рис. 10.5 а). В процессе пере-

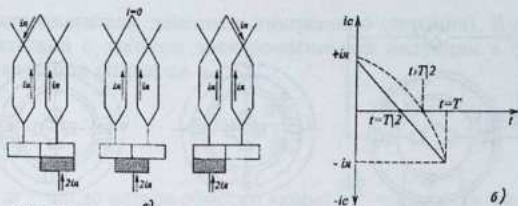


Рис. 10.5. Ток коммутации: а) изменение тока секции при переходе от одной параллельной ветви к другой; б) график изменения тока коммутации.

ключения секция кратковременно окажется короткозамкнутой и в ней направление тока изменится на противоположное. Переключение секции и возникающие при этом явления в ней называются коммутацией. Периодом коммутации называется время, в течение которого секция замкнута накоротко. Ток коммутации и переходное сопротивление между щеткой и коллекторными пластинами в период коммутации изменяется линейно (рис. 10.5 б). Однако, при изменении тока в секции появится э.д.с. самоиндукции. Кроме того, в машине коммутируются одновременно несколько секций, что приводит к появлению э.д.с. взаимоиндукции, которые стремятся сохранить прежнее направление тока секции. По этой причине, а также из-за неравномерного распределения тока под щеткой изменение тока в начале коммутации происходит медленнее чем в конце. В результате возникает искрение под сбегающим краем полюсов. При больших плотностях тока может возникнуть дуговой разряд. Этот разряд ионизирует воздух между щеткой и коллектором, что может еще больше усилить дуговой разряд.

Возникновение искры под щетками может быть и по другим причинам: неровность коллекторных пластин, вибрация щеток, загрязнение коллектора и т.д.

Наиболее эффективным методом улучшения коммутации является компенсация э.д.с. самоиндукции и взаимоиндукции. Для этого между основными полюсами устанавливаются добавочные полюсы (рис 10.6). При этом щетки должны быть установлены на геометрической нейтрالي. Обмотки добавочных полюсов соединяются последовательно с обмоткой якоря и их магнитный поток направлен про-

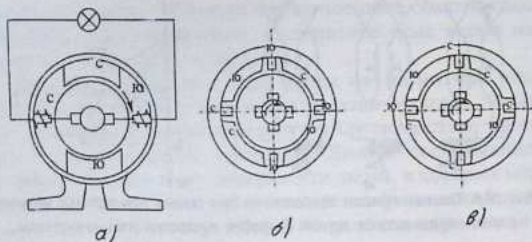


Рис. 10.6. Дополнительные полюса: а) схема соединения; б) размещение дополнительных полюсов на двигателе; в) размещение дополнительных полюсов на генераторе.

тив магнитного потока якоря. Так как магнитный поток добавочных полюсов пропорционален току нагрузки, то компенсация достигается на всех режимах работы машины. В генераторах полярность добавочного полюса должна совпадать с полярностью основного полюса в направлении вращения (рис. 10.6 в). В двигателях полярность добавочного полюса должна совпадать с полярностью основного полюса против направления вращения (рис. 10.6, б). Для того, чтобы токи в обмотках добавочных полюсов были пропорциональны току нагрузки их магнитная цепь должна быть ненасыщенной. Для достижения этого воздушный промежуток между сердечником якоря и добавочными полюсами выполняется сравнительно большим.

10.7. Генераторы постоянного тока

Напряжение постоянного тока от сети подается только на обмотку возбуждения (рис. 10.7). В результате в машине появляется возбуждающее магнитное поле. Якорь вращается первичным двигателем (турбина,

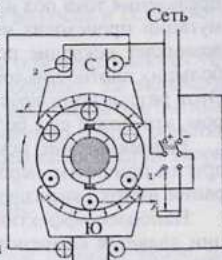


Рис. 10.7. Схема для разъяснения принципа работы машины постоянного тока: 1-переключатель; 2-обмотка возбуждения.

электродвигатель, двигатель внутреннего сгорания). В соответствии с законом электромагнитной индукции в обмотке якоря создается э.д.с.:

$$e = \omega \cdot \frac{d\phi}{dt}, \quad (10.10)$$

где ω — число витков обмотки якоря; $\frac{d\phi}{dt}$ — скорость изменения магнитного потока.

При отсутствии нагрузки ток якоря равен нулю. Генератор работает в режиме холостого хода и первичный двигатель преодолевает только момент трения. При подключении нагрузки по обмотке якоря проходит ток. Согласно закону Ампера магнитное поле обмоток возбуждения действует с определенной силой на проводники якоря. Эти силы создают электромагнитный момент, направленный против момента первичного двигателя. С увеличением нагрузки растут электромагнитные силы. Соответственно должны расти механические силы для вращения якоря. Уравнение генератора определяется следующим выражением:

$$E = U + I_a \cdot R_a, \quad (10.11)$$

где E — э.д.с. якоря, U — напряжение между зажимами генератора, I_a — ток якоря, R_a — сопротивление обмотки якоря, $I_a \cdot R_a$ — падение напряжения в обмотке якоря.

На холостом ходу $I_a = 0$. Поэтому

$$E = U + I_a \cdot R_a = U. \quad (10.12)$$

Из формулы 10.10. следует, что для получения постоянного во времени напряжения магнитный поток должен изменяться равномерно. Однако длительное время делать это невозможно. В машинах постоянного тока магнитный поток под полюсами обмоток возбуждения изменяется периодически по синусоидальному закону. Соответственно изменяется и э.д.с. обмотки якоря. Для получения постоянного напряжения надо переменное напряжение обмотки якоря выпрямить. Эту задачу выполняет коллектор. При изменении направления э.д.с. коллектор автоматически переключает концы обмоток якоря, и в результате направление напряжения остается постоянным. На рис 10.8 витки 1 и 2 обмотки якоря сдвинуты между собой на угол 90° . При помощи коллектора

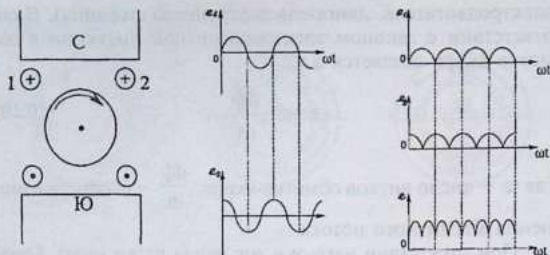


Рис. 10.8. Уменьшение пульсации э.д.с. при помощи коллектора.

эти э.д.с. преобразуются в пульсирующие э.д.с. e_1 и e_2 . Так как обмотка якоря имеет большое число витков и угол сдвига между ними по поверхности якоря небольшой, то пульсации напряжения будут небольшими. Таким образом, на выходе генератора получим почти постоянное напряжение. Следовательно, коллектор в генераторах выполняет две функции:

1. преобразует переменное напряжение якоря в постоянное.

2. через щетки передает ток от генератора на потребители.

Генератор независимого возбуждения (рис. 10.9). Генераторы постоянного тока делятся на генераторы *независимого возбуждения* и генераторы с *самовозбуждением*.

В генераторах независимого возбуждения основное магнитное поле создается постоянными магнитными магнитами или обмотками возбуждения, ток на которые подается от внешних, независимых источников тока (рис. 10.9 а). Поэтому магнитный поток обмотки возбуждения не зависит от нагрузки генератора. Рассмотрим основные характеристики генератора независимого возбуждения. Зависимость э.д.с. генератора от тока возбуждения при постоянной скорости вращения и отключенной нагрузке называется характеристикой холостого хода.

$$E = f(I_{\theta}) \text{ при } I_a = 0 \text{ и } n = \text{const.}$$

Так как э.д.с. пропорциональна магнитной индукции, ток возбуждения — напряженности магнитного поля, то

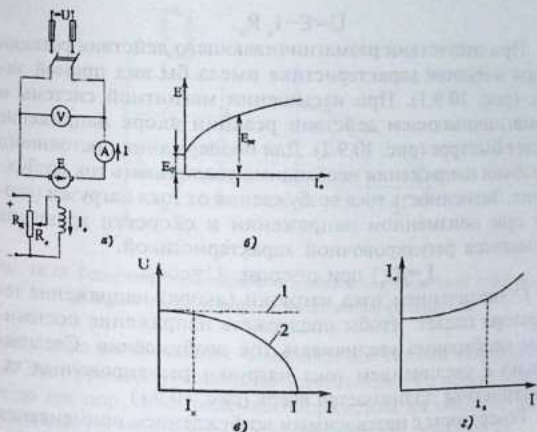


Рис. 10.9. Генератор независимого возбуждения: а) схема соединений; б) характеристика холостого хода; в) внешняя характеристика; г) регулировочная характеристика.

зависимость $E=f(I_a)$ будет похожа на $B=f(H)$. Таким образом, характеристика холостого хода отражает свойства магнитного сердечника.

Для получения этой характеристики необходимо вращать генератор с номинальной скоростью $n=n_n$ при разомкнутых его зажимах. За счет остаточной магнитной индукции полюсов э.д.с. генератора при $I_a=0$ не будет равна нулю, а будет равна некоторому первоначальному значению E_0 . С ростом тока возбуждения пропорционально растет э.д.с. генератора пока магнитная система не насыщена. По мере насыщения сердечников полюсов рост э.д.с. замедляется и при полном насыщении E практически не увеличивается.

Зависимость напряжения генератора от тока нагрузки при постоянных значениях тока возбуждения и скорости вращения называется внешней характеристикой (рис. 10.9 в).

$$U=f(I_a) \text{ при } n=\text{const}, I_a=\text{const.}$$

С ростом тока нагрузки (якоря) падение напряжения на нем растет, что ведет к уменьшению напряжения генератора.

$$U = E - I_a \cdot R_a$$

При отсутствии размагничивающего действия реакции якоря внешняя характеристика имела бы вид прямой линии (рис. 10.9.1). При насыщении магнитной системы и размагничивающем действии реакции якоря напряжение падает быстрее (рис. 10.9.2). Для поддержания постоянного значения напряжения необходимо увеличивать ток возбуждения. Зависимость тока возбуждения от тока нагрузки (якоря) при неизменном напряжении и скорости вращения называется регулировочной характеристикой.

$$I_a = f(I_n) \text{ при } n = \text{const}, U = \text{const}.$$

С увеличением тока нагрузки (якоря) напряжение генератора падает. Чтобы поддержать напряжение постоянным необходимо увеличивать ток возбуждения. Следовательно с увеличением тока нагрузки регулировочная характеристика поднимается вверх (рис. 10.9.г)

Генераторы с независимым возбуждением применяются в электроприводе в системе Г-Д (генератор-двигатель). Основным недостатком его является необходимость постороннего источника питания.

Генераторы с самовозбуждением. Принцип самовозбуждения основан на свойстве магнитных материалов сохранять определенное значение остаточной магнитной индукции в течение двигательного времени. Напряжение на обмотку возбуждения подается от самого генератора. В зависимости от способа присоединения обмотки возбуждения к обмотке якоря различают генераторы параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

Генератор параллельного возбуждения (рис. 10.10)

В этом генераторе обмотка возбуждения подключена к обмотке якоря параллельно через реостат $R_{ш}$. Такой генератор называют также шунтовым. Условием самовозбуждения является совпадение направлений магнитных потоков обмотки возбуждения и остаточной магнитной индукции. При этом начальная э.д.с. E_o , поданная на обмотку возбуждения, вызовет в ней ток и магнитный поток, что приведет к увеличению э.д.с. якоря. Это ведет к еще большему

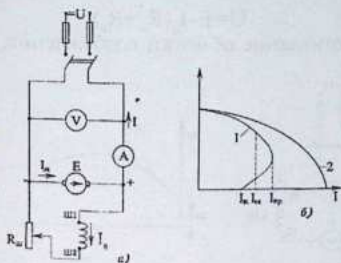


Рис. 10.10. Генератор параллельного возбуждения (шунтовой генератор): а) схема соединений; б) внешняя характеристика.

росту тока возбуждения и магнитного потока полюсов и т.д. Этот процесс увеличения э.д.с. генератора продолжается до тех пор, пока падение напряжения на обмотке возбуждения не уравнивается э.д.с. генератора, т.е. $E = I_f \cdot r_{ш}$.

Характеристика холостого хода и регулировочная характеристика у этого генератора похожи на характеристики генератора независимого возбуждения.

В генераторах параллельного возбуждения с увеличением тока нагрузки напряжение падает быстрее (рис. 10.10. б.1). Причиной этого является подача на обмотку возбуждения пониженного напряжения, что связано с падением напряжения на обмотке якоря и размагничивающим действием реакции якоря. В результате ток возбуждения уменьшается. Поэтому, начиная с некоторого значения $I_{кр}$, ток нагрузки уменьшается даже при уменьшении сопротивления нагрузки. Значение $I_{кр}$ обычно составляет $(1,5+2,5) i_{н}$. На рис. 10.10.б характеристика 2—это внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением.

Генератор последовательного возбуждения (рис. 10.11) В этом генераторе обмотка возбуждения соединяется последовательно с обмоткой якоря. Такой генератор называют также серийным. Напряжение между зажимами генератора определяется формулой

$$U = E - I_a(R_a + R_p), \quad (10.13)$$

где R_p — сопротивление обмотки возбуждения.

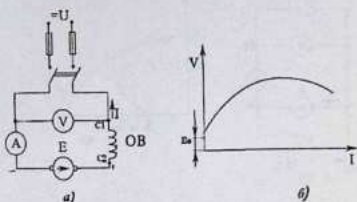


Рис. 10.11. Генератор последовательного возбуждения (серийный генератор): а) схема соединений; б) внешняя характеристика.

Так как ток возбуждения равен току якоря, то свойства такого генератора определяются лишь внешней характеристикой, а остальные характеристики могут быть сняты только при включении генератора на независимое возбуждение. На рис. 10.11 б показана внешняя характеристика генератора. При небольших токах нагрузки магнитный поток и напряжение растут пропорционально току. При нагрузках близких к номинальной наступает насыщение сердечников полюсов. При дальнейшем увеличении тока нагрузки напряжение на выходе генератора уменьшается, так как основной магнитный поток почти не увеличивается из-за насыщения. Падение напряжения в обмотках якоря и возбуждения, а также размагничивающее действие реакции якоря продолжают увеличиваться. Поэтому внешняя характеристика становится падающей. Это ограничивает применение генераторов последовательного возбуждения.

Генератор смешанного возбуждения. В генераторах смешанного возбуждения магнитный поток создается параллельной и последовательной обмотками возбуждения (рис. 10.12), размещенных на полюсах. Обычно применяется согласное включение обмоток возбуждения, при котором их магнитные потоки складываются, что позволяет получить почти не изменяющееся напряжение генератора (рис. 10.12 б.1). Причиной этого является то, что с увеличением тока нагрузки растет магнитный поток последовательной обмотки возбуждения, ком-

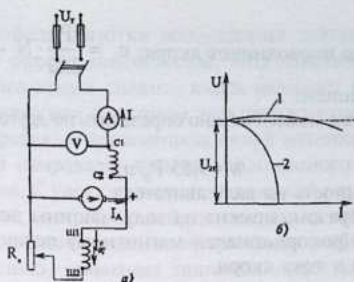


Рис. 10.12. Генератор смешанного возбуждения; а) схема соединений; б) внешняя характеристика.

пенсирова падение напряжения в цепи якоря и обмоток возбуждения, а также размагничивающее действие реакции якоря. При встречном включении обмоток возбуждения размагничивающее действие последовательной обмотки вызывает резкое падение внешней характеристики (рис. 10.12, б.2). Поэтому они применяются в сварочных генераторах, в которых при больших изменениях напряжения в процессе сварки ток практически не должен изменяться.

10.8. Момент на валу машины постоянного тока

Согласно закону Ампера на проводник якоря действует сила:

$$F_{\text{вр}} = B_{\text{ср}} \cdot l \cdot I = \frac{\Phi \cdot 2p}{\pi \cdot d} \cdot l \cdot \frac{I_{\text{я}}}{2a} = \frac{p\Phi}{\pi da} \cdot I_{\text{я}}, \quad (10.14)$$

где d — диаметр якоря; l — длина якоря; $\Phi \cdot 2p$ — полный магнитный поток машины.

Момент, создаваемый каждым проводником:

$$M_{\text{вр}} = F_{\text{вр}} \cdot \frac{d}{2} = \frac{p\Phi}{2\pi a} \cdot I_{\text{я}}. \quad (10.15)$$

Полный момент машины:

$$M = M_{\text{вр}} \cdot N = \frac{p\Phi \cdot N}{2\pi a} \cdot I_{\text{я}} = c_{\text{м}} \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}, \quad (10.16)$$

где N — число проводников якоря; $c_n = \frac{P}{2\pi a} \cdot N$ — постоянный коэффициент.

На практике момент можно определить по другой формуле:

$$M \approx 9,55 P_2 / n, \quad (10.17)$$

где P_2 — мощность на валу двигателя.

Таким образом, момент на валу машины постоянного тока прямо пропорционален магнитному потоку обмотки возбуждения и току якоря.

Механическая мощность машины:

$$P_m = F \cdot V, \quad (10.18)$$

где $V = \frac{\omega d}{2}$ — линейная скорость на поверхности якоря; ω — угловая скорость якоря; F — сила, действующая на якорь.

Значит

$$P_m = \frac{2M}{d} \cdot \omega \cdot \frac{d}{2} = M \cdot \omega. \quad (10.19)$$

Если подставить в эту формулу выражение момента (формула 10.16), то получим

$$\begin{aligned} P_m &= \frac{P}{2\pi \cdot a} \cdot N \cdot \Phi \cdot I_a \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60} = \\ &= \Phi \cdot N \frac{P \cdot n}{60a} \cdot I_a = E \cdot I_a = P_{эм}, \end{aligned} \quad (10.20)$$

где $E = \Phi \cdot N \frac{P \cdot n}{60a}$ — э.д.с. якоря (формула 10.9). $P_{эм}$ — электромагнитная мощность машины.

10.9. Двигатели постоянного тока

Напряжение постоянного тока от внешней сети подается как на обмотку якоря, так и на обмотку возбуждения. В проводниках якоря возникает ток. Обмотка возбуждения создает основное магнитное поле. Согласно закону Ампера

магнитное поле обмотки возбуждения действует на проводники с определенной силой. Под действием момента, создаваемого этими силами, якорь начинает вращаться.

В соответствии с законом электромагнитной индукции (закон Фарадея) в проводниках якоря возникает э.д.с. Эта э.д.с. будет направлена против приложенного к двигателю напряжения. С увеличением механической нагрузки увеличивается ток, потребляемый двигателем из сети. В результате увеличивается падение напряжения в обмотке якоря. Следовательно, уравнение двигателя имеет вид:

$$U = E + I_a \cdot R_a, \quad (10.21)$$

где U — напряжение, поданное на двигатель.

Таким образом, напряжение, поданное на двигатель, расходуется на преодоление э.д.с. обмотки якоря и на создание падения напряжения в ней. На холостом ходу когда $I_a = 0$ напряжение практически равно э.д.с. ($U = E$). С увеличением механической нагрузки скорость двигателя уменьшается, что ведет к уменьшению э.д.с. В результате увеличивается ток, потребляемый из сети. Таким образом, э.д.с. якоря регулирует мощность, потребляемую двигателем из сети.

Пуск двигателя постоянного тока. В первый момент пуска скорость двигателя $n=0$. Поэтому э.д.с. якоря $E=0$.

$$E = c_e \cdot \Phi \cdot n = 0.$$

Поэтому напряжение, поданное на двигатель, полностью падает в обмотке якоря:

$$U = E + I_a \cdot R_a = I_a \cdot R_a.$$

Ток якоря будет очень большим и превышать номинальный ток в

$$I_{a\text{н}} = \frac{U}{R_a} = I_{a\text{н}} (15 + 20) \text{ раз}. \quad (10.23)$$

Поэтому при пуске двигателя последовательно с обмоткой якоря подключается пусковой реостат. Сопротивление пускового реостата подбирается таким, чтобы пусковой ток не превышал номинальный в

$$I_{a\text{н}} = \frac{U}{R_s + R_a} = I_{a\text{н}} (1,5 + 2,0) \text{ раз}, \quad (10.24)$$

где $I_{\text{я}}$ — пусковой ток двигателя; $R_{\text{п}}$ — сопротивление пускового реостата; $I_{\text{я}}$ — номинальный ток якоря.

С увеличением скорости двигателя э.д.с. E увеличивается. Это дает возможность уменьшения сопротивления пускового реостата. В конце пуска реостат полностью отключается, и ток якоря будет равен:

$$I_a = \frac{U - E}{R_a} \quad (10.25)$$

Двигатели параллельного и независимого возбуждения. В двигателе параллельного возбуждения обмотки якоря и возбуждения соединяются между собой параллельно и они питаются от одного источника тока (рис. 10.13). В двигателе независимого возбуждения напряжение на обмотку якоря и обмотку возбуждения подается от разных источников питания. Значит, в этих двигателях токи обмоток возбуждения и якоря не зависят друг от друга.

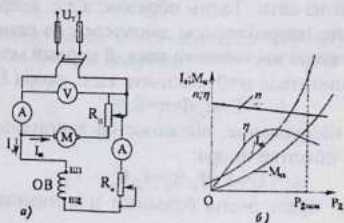


Рис. 10.13. Двигатель параллельного возбуждения (шунтовой двигатель): а) схема соединений; б) рабочие характеристики.

Схема двигателя параллельного возбуждения показана на рис. 10.13, а. Обмотка якоря подключается к сети через пусковой реостат $R_{\text{п}}$. В начале пуска пусковой реостат включается на полное сопротивление. С увеличением скорости якоря увеличивается его э.д.с. Для дальнейшего увеличения скорости двигателя необходимо уменьшать сопротивление пускового реостата. Запуск двигателя заканчивается при полном отключении пускового реостата. Пусковой ре-

остат нельзя длительное время оставлять под током, так как он рассчитан на кратковременный режим работы.

Для быстрого уменьшения пускового тока надо быстро увеличивать э.д.с. якоря. Поэтому двигатель запускается при максимальном токе обмотки возбуждения. При этом магнитный поток машины и э.д.с. якоря будут максимальными. Кроме того, в момент пуска надо создать максимальный вращающий момент. Для этого также необходим максимальный магнитный поток. Зависимость скорости вращения двигателя от момента называется механической (скоростной) характеристикой при постоянных значениях напряжения U и тока возбуждения I_a .

$$n=f(M) \text{ при } I_a=\text{const и } U=\text{const.}$$

Из формулы вращающего момента находим выражение тока

$$M=c_m \cdot I_a \cdot \Phi,$$

отсюда

$$I_a = \frac{M}{c_m \cdot \Phi}.$$

Подставляя в уравнение двигателя (формула 10.21) выражения тока I_a и э.д.с. (формула 10.9), получим:

$$U = E + I_a \cdot R_a = c_e \Phi \cdot n + \frac{M}{c_m \cdot \Phi} \cdot R_a. \quad (10.26)$$

Из этой формулы находим выражение скорости

$$c_e \cdot \Phi \cdot n = U - R_a \cdot \frac{M}{c_m \cdot \Phi};$$

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - M \frac{R_a}{c_e \cdot c_m \cdot \Phi^2} = n_0 - \vartheta \cdot M, \quad (10.27)$$

где $n_0 = \frac{U}{c_e \Phi}$ — скорость холостого хода двигателя;

$\vartheta = \frac{R_a}{c_e \cdot c_m \cdot \Phi^2}$ — постоянный или угловой коэффициент (определяет угол наклона механической характеристики).

Из формулы 10.27 видно, что механическая характеристика двигателя постоянного тока представляет собой прямую линию (рис 10.13 б).

С увеличением нагрузки скорость двигателя уменьшается не очень сильно и составляет (5+10)% от номинальной скорости. Такая механическая характеристика называется жесткой. Зависимость скорости вращения n , КПД η , вращающего момента M , тока I_a от полезной мощности P_2 при постоянных значениях напряжения U и тока возбуждения I_f называются рабочими характеристиками (рис. 10.13 б).

Двигатели параллельного возбуждения называются шунтовыми двигателями и поэтому концы обмотки возбуждения обозначаются буквами Ш1 и Ш2.

Двигатель последовательного возбуждения (рис. 10.14). В этом двигателе обмотки возбуждения и якоря соединены между собой последовательно и, следовательно, ток возбуж-

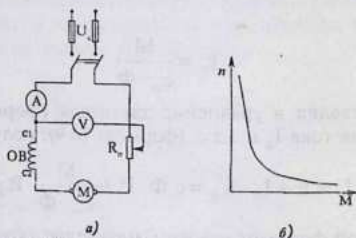


Рис. 10.14. Двигатель последовательного возбуждения (серьезный двигатель): а) схема соединений; б) механическая характеристика.

дения равен току якоря. При небольших нагрузках (25+30)% магнитная система машины не насыщена и поэтому магнитный поток машины будет пропорционален току, т.е. $\Phi = k \cdot I$, где k — коэффициент пропорциональности. При этом вращающий момент будет пропорционален квадрату тока

$$M = c_m \cdot I \cdot \Phi = c_m \cdot I^2. \quad (10.28)$$

Поэтому эти двигатели в момент пуска могут создавать большой вращающий момент.

Скорость вращения двигателя обратно пропорциональна магнитному потоку

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - M \frac{(R_a + R_s)}{c_e \cdot c_m \cdot \Phi^2}, \quad (10.29)$$

где R_a — сопротивление обмотки возбуждения.

Следовательно, при малых токах или пуске без нагрузки скорость двигателя может быть недопустимо большой, что может привести к механическому разрушению двигателя. Поэтому недопустима работа двигателя на холостом ходу или при нагрузке меньше 25% от номинальной. Также недопустимо применение ременной передачи, так как обрыв или сброс ремня ведет к «разносу» двигателя.

По этим причинам такие двигатели применяются в подъемных устройствах, электротранспорте, так как из-за их большой массы ток холостого хода и магнитный поток будут большими.

Благодаря большим пусковым моментам, у данных двигателей электрический транспорт в короткое время может набрать большую скорость.

Из механической характеристики видно (рис. 10.14 б), что в двигателях последовательного возбуждения с увеличением нагрузки скорость быстро падает. Это связано с тем, что происходит большое падение напряжения в обмотках якоря и возбуждения, что ограничивает применение этих двигателей. Эти двигатели называют также серийными и поэтому концы обмоток возбуждения обозначают буквами С1, С2.

Двигатели смешанного возбуждения. В этих двигателях имеется как параллельная, так и последовательная обмотки возбуждения (рис. 10.15 а). При согласном включении обмоток возбуждения общий магнитный поток машины с увеличением нагрузки возрастает.

$$n = \frac{U}{c_e (\Phi_m + \Phi_s)} - M \frac{(R_a + R_s)}{c_e c_m (\Phi_m + \Phi_s)^2}, \quad (10.30)$$

где Φ_m — магнитный поток параллельной обмотки возбуждения; Φ_s — магнитный поток последовательной обмотки возбуждения.

Поэтому такой двигатель имеет более мягкую механическую характеристику по сравнению с двигателем параллельного возбуждения и более жесткую по сравнению с

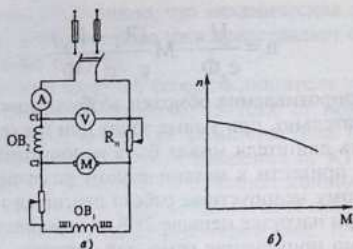


Рис. 10.15. Двигатель смешанного возбуждения: а) схема соединений; б) механическая характеристика.

двигателем последовательного возбуждения (рис. 10.15 б). В зависимости от назначения доля магнитного потока Φ_c может меняться в широких пределах.

Двигатели смешанного возбуждения применяются, когда требуется большой пусковой момент, быстрое ускорение при пуске и допустимы значительные изменения скорости при изменении нагрузки (компрессоры, насосы, ножницы).

При встречном включении обмоток возбуждения общий магнитный поток машины падает.

$$n = \frac{U}{c_e(\Phi_{ш} - \Phi_c)} - M \frac{(R_a + R_c)}{c_e \cdot c_m(\Phi_{ш} - \Phi_c)^2} \quad (10.31)$$

Поэтому скорость двигателя с увеличением нагрузки может увеличиться, т.е. работа двигателя будет неустойчивой, из-за чего двигатели смешанного возбуждения с встречным включением обмоток возбуждения не применяются.

Регулирование скорости вращения двигателей постоянного тока. Исходя из формулы

$$n = \frac{U}{c_e \cdot \Phi} - M \frac{R_a}{c_e \cdot c_m \cdot \Phi^2}$$

скорость вращения двигателей постоянного тока можно регулировать изменением магнитного потока обмотки возбуждения, сопротивления цепи якоря и напряжения.

Наиболее удобным, экономичным и распространенным способом является способ регулирования скорости изменением магнитного потока путем изменения тока возбуждения. Ток возбуждения составляет 3-5% тока якоря и он может изменяться при помощи регулировочного реостата. С уменьшением тока возбуждения магнитный поток уменьшается, а скорость увеличивается. При номинальном режиме предусматривается наибольший магнитный поток, а значит — наименьшая скорость. Поэтому можно только уменьшать магнитный поток, увеличивая скорость вверх от номинальной.

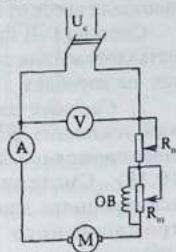


Рис. 10.16. Схема регулирования скорости вращения двигателя последовательного возбуждения шунтированием обмотки возбуждения.

В двигателях последовательного возбуждения для изменения тока возбуждения обмотка возбуждения шунтируется, т.е. параллельно обмотке включается сопротивление (рис. 10.16).

Скорость вращения двигателя можно изменять включением в цепь якоря реостата, рассчитанного на длительный режим работы. С увеличением сопротивления цепи якоря скорость вращения двигателя уменьшается. Этот способ дает возможность регулировать скорость вниз от номинальной и связан со значительными потерями электроэнергии на реостате. Поэтому этот способ применяется в основном для двигателей небольшой мощности.

Третий способ — путем изменения напряжения, подаваемого на двигатель. Так как напряжение сети не должно быть выше номинального напряжения двигателя, то этот способ также дает возможность регулировать скорость вниз от номинальной. Этот способ применяется с помощью следующих систем:

1. Система генератор—двигатель (Г-Д, рис. 10.17). Система состоит из асинхронного двигателя М1, генератора и двигателя М2 постоянного тока. Асинхронный двигатель с постоянной скоростью вращает генератор постоянного тока Г, напряжение с которого подается на двигатель постоянного тока М2. Скорость двигателя постоянного тока можно изменять двумя путями:

- а) изменяя ток возбуждения генератора вниз от номинальной;
 б) изменяя ток возбуждения двигателя вверх от номинальной.

Система Г-Д применяется на металлорежущих станках, в шахтах, на кораблях.

2. Система электромашинный усилитель ЭМУ — генератор постоянного тока (рис. 10.18). Система состоит из асинхронного двигателя, электромашинного усилителя (обычно они устанавливаются на одной оси и в одном корпусе) и двигателя постоянного тока. Электромашинный усилитель так же, как и генератор постоянного тока является источником постоянного тока. Только обмотка возбуждения называется обмоткой управления и их может быть несколько. Даже если машина будет двухполюсной на ней устанавливаются две пары щеток. Две из них короткозамкнуты.

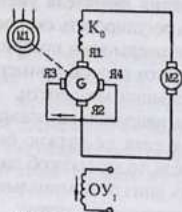


Рис. 10.18. Система ЭМУ-ДПТ:

M_1 -асинхронный двигатель;
 M_2 -двигатель постоянного тока (ДПТ); G -электромашинный усилитель (ЭМУ); OY_1 -обмотка управления; K_0 -компенсационная обмотка.

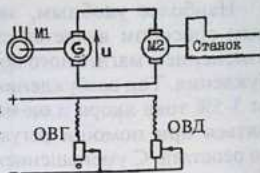


Рис. 10.17. Система Г-Д:
 M_1 -асинхронный двигатель; G -генератор постоянного тока; M_2 -двигатель постоянного тока; $ОВГ$ и $ОВД$ -обмотки возбуждения генератора и двигателя.

Асинхронный двигатель M_1 с постоянной скоростью вращает ЭМУ, напряжение с которого подается на двигатель постоянного тока M_2 . Изменяя токи обмоток управления, можно в широких пределах изменять напряжение ЭМУ, что приводит к изменению скорости вращения двигателя. Этот способ применяется на металлорежущих станках, кораблях и т.д.

3. Система магнитный усилитель (МУ) — двигатель постоянного тока (рис 10.19). Двигатель постоянного тока M вклю-

чается в цепь рабочей обмотки. При изменении тока в обмотке управления ω_u изменяется сопротивление и токи рабочей обмотки. В результате изменяется скорость вращения двигателя.

4. Система тиристорный преобразователь (ТП) — двигатель постоянного тока (рис. 10.20). Тиристорный преобразователь — это управляемый выпрямитель. Изменяя напряжение на его выходе, можно изменять скорость вращения двигателя постоянного тока.

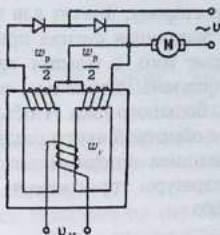


Рис. 10.19. Система МУ-ДПТ:

ω_u — обмотка управления;

ω_p — рабочая обмотка; М — двигатель постоянного тока.

Торможение двигателей постоянного тока. Для этого в основном применяются два способа:

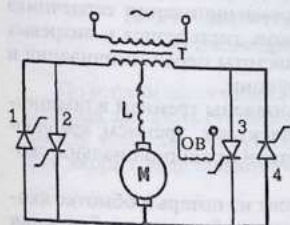


Рис. 10.20. Система ТП-ДПТ (тиристорный преобразователь-двигатель постоянного тока): Т — трансформатор; 1, 2, 3, 4 — тиристоры; М — двигатель постоянного тока.

1. Динамическое торможение — при этом обмотка якоря отключается от сети и подключается на сопротивление. Якорь по инерции продолжает вращаться. В якоре и сопротивлении возникает ток. Согласно закону Ампера возникают силы, направленные против направления вращения якоря. Якорь при этом быстро останавливается сам. Чем меньше сопротивление, тем больше ток и тем быстрее останавливается двигатель. Этот способ широко применяется,

так как для торможения необходимо только сопротивление и двигатель останавливается сам.

2. Торможение противовключением — для этого изменяют направление тока в обмотке якоря. При этом электромагнитные силы также изменяют свое направление и за очень короткое время скорость якоря станет равной нулю. В этот момент двигатель необходимо отключить от сети. В противном случае он начнет вращаться в противоположном направлении.

ную сторону. Значит для этого способа необходима аппаратура, выдающая сигнал при скорости якоря, близкой к нулю. Кроме того, в момент торможения э.д.с. якоря и ток будут направлены одинаково, что является причиной возникновения большого тока. Чтобы уменьшить этот ток последовательно с обмоткой якоря соединяют сопротивление. Все связано с большими потерями электрической энергии и усложнением аппаратуры торможения. Поэтому этот способ применяется редко.

10.10. Потери электроэнергии и КПД

При работе любой электрической машины совершаются потери электрической энергии. Эти потери совершаются в сердечниках электрической машины, при трении, в проводах обмоток. Потери в сердечниках P_c или магнитные потери возникают за счет перемагничивания сердечника якоря и полюсных наконечников, гистерезиса и вихревых токов. Эти потери зависят от частоты перемагничивания и максимальной магнитной индукции.

Механические потери обусловлены трением в подшипниках, трением щеток по коллектору, трением вращающихся частей в воздухе. Эти потери пропорциональны скорости вращения.

Электрические потери состоят из потерь в обмотке якоря, в контакте щетки-коллектор, в обмотках возбуждения и добавочных полюсов.

$$P_{\Sigma} = I_a^2 \cdot R_a + P_{\text{щ}} + I_a^2 \cdot R_{\text{доб}} + I_a^2 \cdot R_2 + U \cdot R_{\Sigma} \quad (10.32)$$

Потери в щеточных контактах $P_{\text{щ}} = \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_a$ определяются падением напряжения в контакте щетка-коллектор, который принят для графитовых щеток 2 В, для металло-графитовых щеток 0,6 В.

За счет реакции якоря и коммутации в обмотке якоря с сердечниками возникают добавочные потери $P_{\text{доб}}$. Эти потери составляют $(0,01 \div 0,005) U_n \cdot I_n$ КПД для генератора

$$\eta_g = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U \cdot I}{U \cdot I + (P_c + P_{\text{мех}} + P_{\Sigma} + P_{\text{доб}})} \cdot 100\% \quad (10.33)$$

для электродвигателя

$$\eta_2 = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U \cdot I + (P_c + P_{\text{всх}} + P_z + P_{\text{доб}})}{U \cdot I} \cdot 100\%, \quad (10.34)$$

где P_2 — полезная мощность машины; P_1 — полная мощность машины; U — напряжение между зажимами машины; I — ток, проходящий через машину.

Зависимость КПД от нагрузки показана на рис 10.13. При малых нагрузках КПД небольшой, так как потери холостого хода относительно P_2 будут большими. С ростом нагрузки КПД также растет, так как потери холостого хода постоянны и практически не зависят от нагрузки. Вообще КПД составляет 70–93%. При этом большие цифры относятся к мощным машинам.

10.11. Двигатели постоянного тока с цилиндрическим якорем

По устройству эти двигатели похожи на двухфазный асинхронный двигатель с полым немагнитным ротором (рис. 10.21). Между внешним и внутренним статором располагается полый якорь в виде стаканчика из пластмассы, на котором раз-

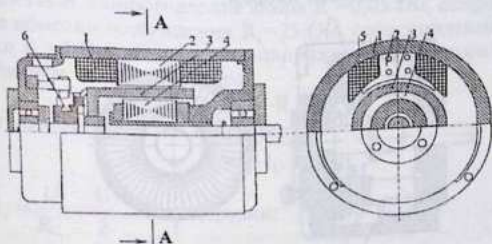


Рис. 10.21. Двигатель постоянного тока с цилиндрическим якорем: 1- обмотка возбуждения; 2-полюса; 3-полый якорь; 4-внутренний статор; 5-станина; 6-коллектор.

мешается якорная обмотка, соединенная с коллектором. Изготавливается также печатный якорь из медной фольги.

Эти двигатели обладают следующими достоинствами.

1. Из-за отсутствия сердечника индуктивное сопротивление якоря маленькое. Из-за малой массы якоря момент инерции будет небольшим. Поэтому двигатель может вращаться с большой скоростью.

2. Отсутствие сердечников, применение постоянных магнитов вместо обмоток возбуждения является причиной малых электрических потерь большого КПД.

3. Из-за небольшой индуктивности обмотки якоря улучшается процесс коммутации, который проходит почти без искрения.

10.12. Двигатель постоянного тока с дисковым якорем

Устройство двигателя показано на рис. 10.22. Между полюсными наконечниками и кольцевыми магнитопроводами располагается цилиндрический якорь. Роль обмотки возбуждения выполняют постоянные магниты. Если якорь выполнен с печатной обмоткой, то коллектор не нужен, так как щетки сами скользят по проводникам якоря. Этот двигатель обладает достоинствами двигателя постоянного тока с цилиндрическим якорем.

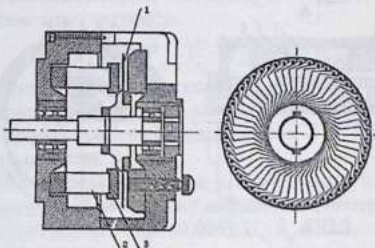


Рис. 10.22. Двигатель постоянного тока с дисковым якорем: 1-диск; 2-постоянный магнит; 3-наконечники полюсов.

Задачи

Задача 10.1. Скорость вращения двигателя постоянного тока $n=1000$ об/мин, магнитный поток $\Phi=2,0 \cdot 10^{-2}$ Вб, постоянный коэффициент $c_e=10$. Определить э.д.с. якоря.

Решение: 1) Э.д.с. якоря равна:

$$E = c_e \Phi \cdot n = 10 \cdot 2,0 \cdot 10^{-2} \cdot 1000 = 200 \text{ В.}$$

Задача 10.2. Магнитная индукция машины постоянного тока $B=1,0$ Тл, длина якоря $l=0,25$ м, полюсное деление $\tau=0,1$ м. Определить магнитный поток машины.

Решение: в соответствии с формулой 10.3

$$\Phi = B \cdot \tau \cdot l = 1,0 \cdot 0,1 \cdot 0,25 = 0,025 \text{ Вб.}$$

Задача 10.3. Магнитный поток машины постоянного тока $\Phi=5 \cdot 10^{-2}$ Вб, число пар полюсов $p=2$, скорость вращения $n=1000$ об/мин, число пар параллельных ветвей $a=2$, число активных проводников якоря $N=120$. Определить э.д.с. якоря.

Решение: в соответствии с формулой 10.9.

$$E = \frac{p \cdot N}{60a} \Phi \cdot n = \frac{2 \cdot 120}{60 \cdot 2} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 1000 = 100 \text{ В.}$$

Задача 10.4. Э.д.с. генератора параллельного возбуждения $E=118$ В. Сопротивление якоря $R_a=0,05$ Ом, сопротивление обмотки возбуждения $R_v=25$ Ом, сопротивление нагрузки $R_n=2$ Ома. Определить напряжение генератора.

Решение: Э.д.с. генератора

$$E = U + I_a \cdot R_a.$$

В этой формуле ток I_a неизвестен

$$I_a = I_n + I_v,$$

где $I_n = \frac{U}{R_n} = \frac{U}{2}$ — ток нагрузки;

$$I_v = \frac{U}{R_v} = \frac{U}{25} \text{ — ток возбуждения.}$$

Следовательно,

$$E = U + \left(\frac{U}{R_n} + \frac{U}{R_a} \right) \cdot R_a = U + 0,05 \left(\frac{U}{25} + \frac{U}{2} \right)$$

или

$$118 = U + \frac{(2+25)}{1000} \cdot U; U = \frac{118000}{1027} = 114,9 \text{ В.}$$

Задача 10.5. Э.д.с. генератора параллельного возбуждения $E=240$ В, номинальный ток $I_n=108$ А, ток возбуждения $I_a=2$ А. Определить электромагнитную мощность.

Решение: 1) ток якоря равен

$$I_a = I_n - I_a = 108 - 2 = 106 \text{ А;}$$

2) электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = E \cdot I_a = 240 \cdot 106 = 25440 \text{ Вт.}$$

Задача 10.6. На двигатель параллельного возбуждения подано напряжения $U=220$ В. Пусковой ток без пускового реостата $I_n=275$ А, э.д.с. якоря $E=210$ В. Определить ток двигателя.

Решение: 1) в момент пуска $E=0$. Исходя из этого находим сопротивление якоря

$$U = E - I_n \cdot R_a = I_n \cdot R_a;$$

$$R_a = \frac{U}{I_n} = \frac{220}{275} = 0,8 \text{ Ом;}$$

2) ток двигателя равен

$$I = \frac{U - E}{R_a} = \frac{220 - 210}{0,8} = 12,5 \text{ А.}$$

Задача 10.7. Ток якоря двигателя последовательного возбуждения $I_a=18$ А, сопротивление якоря $R_a=0,3$ Ом, сопротивление обмотки возбуждения $R_b=0,2$ Ом. Определить переменные потери.

Решение: 1. полное сопротивление обмоток двигателя

$$R = R_a + R_b = 0,3 + 0,2 = 0,5 \text{ Ом;}$$

2) переменные потери равны:

$$\Delta P_{\text{в}} = I_{\text{в}}^2 \cdot R = 18^2 \cdot 0,5 = 162 \text{ Вт}.$$

Задача 10.8. Двухполюсный двигатель параллельного возбуждения подключен в сеть $U=220 \text{ В}$. Ток, потребляемый двигателем $I_1=62 \text{ А}$, сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}}=110 \text{ Ом}$, сопротивление якоря $R_{\text{я}}=0,15 \text{ Ом}$, магнитный поток $\Phi=0,02 \text{ Вб}$, количество проводников якоря $N=420$, число параллельных ветвей $a=1$. Определить э.д.с. якоря, скорость вращения двигателя, номинальный вращающий момент, КПД, сопротивление пускового реостата при $I_{\text{н}}=3 I_{\text{н}}$, величину пускового тока при отсутствии пускового реостата.

Решение: 1) ток возбуждения

$$I_{\text{в}} = \frac{U}{R_{\text{в}}} = \frac{220}{110} = 2 \text{ А};$$

2) ток якоря $I_{\text{я}} = I_1 - I_{\text{в}} = 62 - 2 = 60 \text{ А};$

3) э.д.с. якоря $E = U - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} = 220 - 60 \cdot 0,15 = 211 \text{ В};$

4) вращающий момент двигателя

$$M_{\text{н}} = c_{\text{м}} \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} = \frac{\rho \cdot N}{2\pi a} \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} = \frac{1 \cdot 420}{2 \cdot 3,14 \cdot 1} \cdot 0,02 \cdot 60 = 80 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $\rho=1$ т.к. двигатель двухполюсный;

5) скорость вращения двигателя

$$\begin{aligned} E &= c_{\text{е}} \cdot \Phi \cdot n, \text{ отсюда } n = \frac{E}{c_{\text{е}} \Phi} = \frac{E}{\frac{\rho N}{60a} \cdot \Phi} = \\ &= \frac{211}{\frac{1 \cdot 420}{60 \cdot 1} \cdot 0,02} = 1507 \text{ об/мин}; \end{aligned}$$

6) номинальная мощность

$$M_{\text{н}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{н}}}{n_{\text{н}}}; \quad P_{\text{н}} = \frac{M_{\text{н}} \cdot n_{\text{н}}}{9,55} = \frac{80 \cdot 1507}{9,55} = 12624 \text{ Вт};$$

7) мощность, потребляемая двигателем

$$P_1 = U \cdot I_1 = 220 \cdot 62 = 13640 \text{ Вт};$$

8) КПД при номинальной нагрузке

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{12264}{13640} = 0,925;$$

9) так как в момент пуска $E=0$, то

$$U = E + I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{н}}) = I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{н}}),$$

где $R_{\text{н}}$ — сопротивление пускового реостата.

Так как пусковой ток $I_{\text{н}} = 3 \cdot I_{\text{я}}$, то

$$\begin{aligned} 3 \cdot I_{\text{я}} &= \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{н}}}, \text{ отсюда } R_{\text{н}} = \frac{U}{3 \cdot I_{\text{я}}} - R_{\text{я}} = \\ &= \frac{220}{3 \cdot 62} - 0,15 = 1,05 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

10) пусковой ток без пускового реостата равен

$$I = \frac{U}{R_{\text{я}}} = \frac{220}{0,15} = 1466 \text{ А}.$$

Задача 10.9. Двигатель последовательного возбуждения подключен в сеть $U=220 \text{ В}$. Скорость вращения якоря 1500 об/мин, ток $I_{\text{я}}=44 \text{ А}$, вращающий момент $M=55 \text{ Н}\cdot\text{М}$. Общее сопротивление обмоток якоря и возбуждения $R=0,4 \text{ Ом}$. Определить электромагнитную, полезную и потребляемую мощности, электрические потери в обмотках, магнитные и механические потери, КПД при номинальной нагрузке.

Решение: 1) э.д.с. якоря

$$E = U - I_{\text{я}} \cdot R = 220 - 44 \cdot 0,4 = 202,4 \text{ В};$$

2) электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = E_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}} = 202,4 \cdot 44 = 8905,6 \text{ Вт};$$

3) полезная мощность

$$P_2 = \frac{M \cdot n}{9,55} = \frac{55 \cdot 1500}{9,55} = 8638,6 \text{ Вт};$$

4) мощность, потребляемая при номинальной нагрузке

$$P_1 = U_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}} = 220 \cdot 44 = 9680 \text{ Вт};$$

5) электрические потери в обмотках

$$\Delta P_{\text{э}} = I^2 \cdot R = 44^2 \cdot 0,4 = 193,6 \text{ Вт};$$

6) механические и магнитные потери

$$\Delta P_{\text{мех}} + P_{\text{м}} = P_{\text{эл}} - P_2 = 8905,6 - 8638,6 = 267 \text{ Вт};$$

7) КПД при номинальной нагрузке

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{8638,6}{9680} = 0,892.$$

ГЛАВА 11

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ

11.1. Системы автоматике

Человечество всегда стремится механизировать и автоматизировать свой труд. При механизации человек освобождается от тяжелого и изнуряющего, порой опасного труда, сохраняя за собой функции управления. При автоматизации производственных процессов функции управления и контроля выполняют устройства автоматике. Человек при этом участвует в предварительной настройке, регулировании и периодическом управлении автоматическими устройствами. Наука, изучающая средства и способы, освобождающие человека от непосредственного управления машинами и механизмами, называется автоматикой.

Автоматика состоит из следующих систем (рис. 11.1):

1. Системы автоматического контроля - они применяются для автоматического контроля различных процессов и параметров. Например, вести контроль величин тока, напряжения, давления и т.д. и выдавать сигнал при превышении их значений сверх допустимых значений. На рис. 11.1а показана функциональная схема системы автоматического контроля. Датчик измеряет параметр объекта и преобразует его в электрический сигнал. Усилитель усиливает этот сигнал и подает на исполнительный элемент. Исполнительный элемент может показывать, записать величину контролируемого параметра, давать сигнализацию и производить отбор согласно этому параметру.

2. Системы автоматического управления - в этих системах управляющий сигнал на управляемый элемент подается от руки или в автоматическом порядке (рис. 11.1, б). От управляющего элемента управляющий сигнал подается

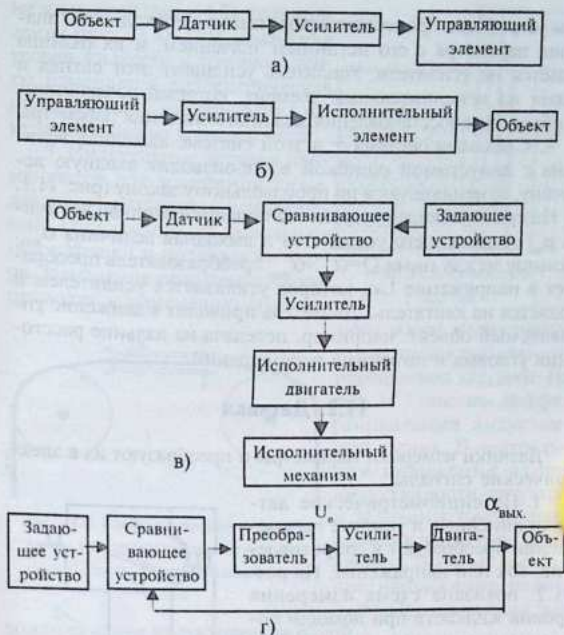


Рис. 11.1. Функциональные схемы систем автоматики: а) автоматическая система контроля; б) автоматическая система управления; в) автоматическая система регулирования; г) следящая система.

на усилитель, который усиливает этот сигнал и подаёт на исполнительный элемент. Исполнительный элемент на объекте выполняет необходимую работу. Например, работа станков с программным управлением задаётся при помощи программ, записанных на магнитных лентах, дисках.

3. Системы автоматического регулирования — в этих системах автоматически поддерживается заданное значение параметра (рис. 11. 1, в). Сигналы от задающего элемента и от датчика подаются на сравнивающий элемент. На сравниваю-

шем устройстве происходит сравнение необходимого значения параметра с его истинным значением, и их разница подаётся на усилитель. Усилитель усиливает этот сигнал и подаёт на исполнительный элемент, который воздействует на объект для восстановления заданного значения параметра.

4. Следящая система — в этой системе выходная величина с допустимой ошибкой воспроизводит входную величину, изменяющуюся по произвольному закону (рис. 11.1, г). На сравнивающее устройство подаются входная величина $\alpha_{\text{вх}}$ от задающего устройства и выходная величина $\alpha_{\text{вых}}$. Разницу между ними $Q = \alpha_{\text{вх}} - \alpha_{\text{вых}}$ преобразователь преобразует в напряжение U_0 , которое усиливается усилителем и подаётся на двигатель. Двигатель приводит в движение управляемый объект: например, передача на дальние расстояния угловых и линейных перемещений.

11.2. Датчики

Датчики измеряют параметры и преобразуют их в электрические сигналы.

1. Потенциометрические датчики линейные и угловые перемещения преобразуют в сопротивление, ток или напряжение. На рис. 11.2. показана схема измерения уровня жидкости при помощи потенциометрического датчика. При изменении уровня жидкости движется движок потенциометра и в результате изменяется выходное напряжение U_2 .

2. Ёмкостные датчики. В соответствии с формулой

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (11.1)$$

определения ёмкости конденсатора ёмкостные датчики можно выполнить, изменяя площадь обкладок S , расстояние между ними, диэлектрическую проницаемость. Например, ёмкостные датчики применяются для измерения уров-

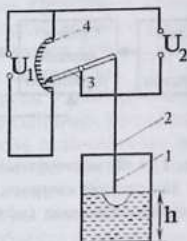


Рис. 11.2. Потенциометрический датчик: 1-пробка; 2-рычаг; 3-подвижный контакт; 4-потенциометр.

ня жидкостей (рис. 11.3), толщины ленты (рис. 11.4). При изменении уровня жидкости и толщины ленты изменяется диэлектрическая проницаемость, что приводит к изменению тока во внешней цепи.

3. Индуктивные датчики применяются для измерения силы, давления, различных перемещений. Они состоят из неподвижной катушки и подвижного якоря. Изменение положения якоря приводит к изменению воздуш-

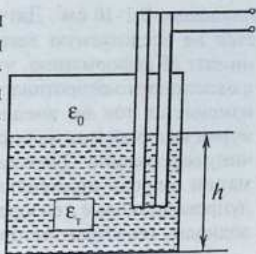


Рис. 11.3. Ёмкостный датчик.

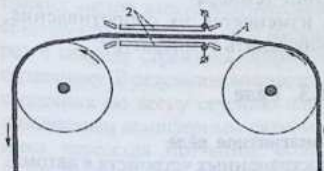


Рис. 11.4. Схема измерения толщины ленты при помощи емкостного датчика: 1-лента; 2-неподвижные электроды.

ного зазора, индуктивности и индуктивного сопротивления катушки. На рис. 11.5 показан дифференциальный индуктивный датчик. В нейтральном положении якоря индуктивности катушек и величины токов, проходящих через них, одинаковы. Поэтому выходное напряжение равно нулю. При изменении по-

ложения якоря индуктивность одной катушки увеличивается, а другой уменьшается. Равенство токов нарушается и на выходе появляется напряжение, величина которого пропорциональна величине перемещения якоря.

4. Тензометрические датчики (рис. 11.6) применяются для измерения деформации различных деталей. Датчик выполняется из тонкой, диаметром 0,02-0,04 мм проволоки. Проволока в форме зигзага приклеивается между двумя листами бумаги

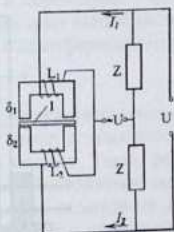


Рис. 11.5. Индуктивный датчик.

площадью 0,1-10 см². Датчик наклеивается на исследуемую деталь и воспринимает её деформацию, что приводит к изменению его сопротивления. При этом изменяется ток во внешней цепи, измеряя который можно определить величину деформации. Для измерения деформации широко применяются также полупроводниковые тензорезисторы, тензодиоды, тензотранзисторы.

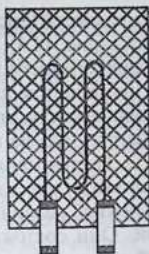


Рис. 11.6. Тензометрический датчик.

Термосопротивления изготавливаются из тонкой медной или платиновой проволоки и применяются для измерения температуры. При изменении температуры окружающей среды изменяется их сопротивление, измеряя которое можно определить температуру.

11.3. Реле

1. Нейтральное электромагнитное реле

Одним из самых распространенных устройств в автоматике является реле. При подаче на реле входного сигнала выходной сигнал изменяется скачком.

На рис. 11.7. показано устройство нейтрального электромагнитного реле. Магнитная система состоит из сердечника, ярма и якоря. При прохождении тока через обмотку

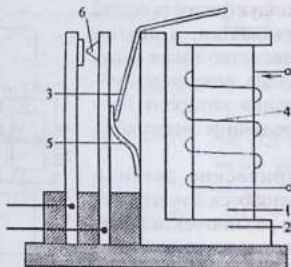


Рис. 11.7. Нейтральное электромагнитное реле: 1-сердечник; 2-ярмо; 3-якорь; 4-обмотка; 5-пружина; 6-контакт.

создаётся магнитное поле, под действием которого якорь притягивается к сердечнику. Якорь другой стороной давит на контактную систему, заставляя их замыкаться или размыкаться. Контакты управляют различными электрическими устройствами. Для уменьшения вихревых токов магнитная система реле переменного тока выполняется из

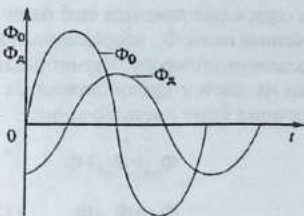


Рис. 11.8. Графики основного и демпферного магнитных потоков.

тонких листов электротехнической стали. Переменный ток в секунду сто раз меняет своё направление. Поэтому якорь сто раз в секунду стремится оторваться и вновь притянуться к сердечнику. В результате возникает шум. Для устранения шума сердечник по всему сечению или части его замыкается так называемым демпферным витком. Магнитный поток сердечника, пересекая этот виток, создаёт в нём ток. Магнитный поток Φ_d этого тока и основной магнитный поток Φ_0 имеют различные начальные фазы (рис. 11.8.). В момент прохождения основного потока Φ_0 через ноль магнитный поток демпферного витка Φ_d не будет равен нулю и будет держать якорь в притянутом состоянии.

Устройство и принцип работы нейтрального магнитного реле постоянного тока такое же, как и переменного тока. Отличием является то, что магнитная система выполняется из сплошной стали и нет необходимости в демпферном витке.

2. Поляризованное реле

Обычное электромагнитное реле нечувствительно к направлению постоянного тока. Для этого в магнитную систему реле добавляется постоянный магнит. Такое реле называется поляризованным (рис. 11.9.). Постоянный магнит создаёт основной поток Φ_0 . Этот поток делится на два одинаковых потока Φ_{01} и Φ_{02} , направленных в противоположные стороны. Поэтому при отсутствии управляющего сигнала якорь будет расположен в середине воздушного промежутка. При подаче на обмотку управляющего сигнала

в сердечнике появится ещё один магнитный поток Φ_y , направленный в определенную сторону. Магнитные потоки на левой и правой половинах сердечника будут иметь значения:

$$\Phi_{\text{лев}} = \Phi_{01} + \Phi_y$$

$$\Phi_{\text{пр}} = \Phi_{01} - \Phi_y \quad (11.2)$$

Так как магнитный поток на левой стороне сердечника будет сильнее, то якорь отклонится влево и замкнётся с левым контактом. Если изменить полярность управляющего сигнала, то якорь отклонится вправо и замкнётся с правым контактом.

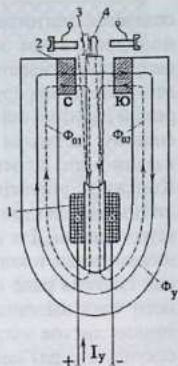


Рис. 11.9. Поляризованное реле: 1-обмотка; 2-полюса; 3-якорь; 4-подвижной контакт.

3. Реле времени

У реле времени контакты замыкаются (размыкаются) с известным по времени запаздыванием. Известны следующие типы реле времени:

1. Электромагнитное реле времени - в нем время запаздывания создается часовым механизмом;

2. Электропневматическое реле времени - в нем запаздывания создается пропусканием воздуха из цилиндра через отверстие, изменяя диаметр которого можно изменять время запаздывания;

3. Электромашинное реле времени - в нем время запаздывания пропорционально числу оборотов двигателя;

Электронное реле времени - в нем время запаздывания пропорционально времени заряда и разряда конденсатора.

4. Магнитоуправляемые контакты (герконы)

На рис. 11.10 показаны устройства герконов. В стеклянную ампулу запаяны пластины из магнитного материала с высокой магнитной проницаемостью. Для получения хорошего контакта на концы пластин нанесены покрытия из материала с высокой электропроводностью. Для предохра-

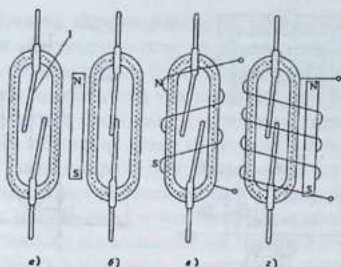


Рис. 11.10. Герконы.

нения контактов от окисления из ампулы выкачивается воздух и заполняется инертным газом. При поднесении к ампуле постоянного магнита пластины сближаются и контакты замыкаются (размыкаются) (рис. 11.10. а, б).

Вместо постоянного магнита можно использовать обмотку, намотанную поверх ампулы. При подаче тока на обмотку возникает магнитное поле, которое сближает пластины и замыкает контакты (рис. 11.10 в).

На рис. 11.10 г показано реле с обмоткой и постоянным магнитом. При отсутствии управляющего сигнала постоянный магнит замыкает контакты. При подаче управляющего сигнала возникающее магнитное поле размыкает контакты, так как магнитное поле постоянного магнита и обмотки направлены противоположно друг другу.

11.4. Магнитные усилители

Магнитные усилители устойчивы к вибрациям и механическим воздействиям и обладают большой мощностью. Они просты по устройству, надёжны в эксплуатации и недороги. Они бывают дроссельные и трансформаторные.

1. Простейший дроссельный магнитный усилитель (рис. 11.11) состоит из рабочей обмотки и обмотки управления. На рабочую обмотку через нагрузку подаётся переменный ток от сети. Обмотка управления питается постоянным током. Следовательно, в магнитных усилителях напряжённость магнитного поля создаётся токами рабочей обмотки и об-

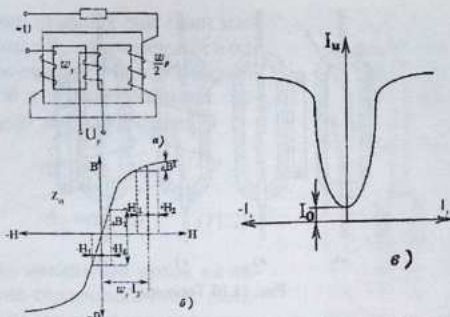


Рис. 11.11. Дроссельный магнитный усилитель: а) схема; б) кривая намагничивания сердечника; в) рабочая характеристика.

мотки управления. Ток нагрузки рабочей обмотки выполняет роль дроссельной заслонки. На рис. 11.11 б показана кривая намагничивания сердечника.

Известно, что намагничивающая сила:

$$F = I \cdot w = H \cdot l, \quad 11.3$$

где F - намагничивающая сила; w - число витков обмотки; l - длина магнитных силовых линий

Число витков и длина магнитных силовых линий не меняется. Поэтому напряжённость магнитного поля пропорциональна току. При отсутствии тока в обмотке управления и изменении тока рабочей обмотки от $-I_{1P}$ до $+I_{1P}$ напряжённость магнитного поля изменяется от $-H$ до $+H$, а магнитная индукция изменяется на величину ΔB . При прохождении тока I_u через обмотку управления напряжённость магнитного поля будет равна $I_u \cdot w_u$ (w_u - число витков обмотки управления). Если при этом ток рабочей обмотки изменить на такие же величины, то напряжённость магнитного поля изменится от $+H_1$ до $+H_2$, а магнитная индукция изменится на величину ΔB^1 . Следовательно, в первом случае изменение магнитной индукции будет намного больше, чем во втором. Соответственно и э.д.с. самоиндукции в рабочей обмотке в первом случае будет больше, чем во втором. Известно, что э.д.с. самоиндукции направлена

против причины, вызвавшей её, т.е. против тока. Если синусоидальное напряжение сети не изменяется, то ток рабочей обмотки в первом случае будет меньше, чем во втором.

Изменяя постоянный ток обмотки управления, т.е. изменяя магнитное состояние сердечника, можно изменить ток рабочей обмотки. Пока сердечник не будет насыщен основная часть напряжения расходуется на преодоление э.д.с. самоиндукции рабочей обмотки. При этом на нагрузке падение напряжения и ток будет маленьким. При переходе сердечника в насыщенное состояние э.д.с. самоиндукции практически исчезнет, напряжение полностью будет падать на нагрузке, и ток рабочей обмотки увеличится.

На рис. 11.11в показана рабочая характеристика — зависимость тока рабочей обмотки (тока нагрузки) I_{II} от тока обмотки управления I_U . На рисунке видно, что с увеличением тока обмотки управления увеличивается ток рабочей обмотки. При этом изменение небольшого тока обмотки управления приводит к изменению большого тока рабочей обмотки. Следовательно, устройство работает как усилитель.

Принцип работы магнитного усилителя можно пояснить и по-другому. При переходе сердечника в насыщенное состояние абсолютная магнитная проницаемость сердечника уменьшается, это приводит к уменьшению индуктивности и индуктивного сопротивления рабочей обмотки:

$$L_p = \mu_n \frac{\omega_p^2 \cdot S}{\ell} \quad (11.4)$$

$$X_{LP} = 2\pi \cdot f \cdot L_p, \quad (11.5)$$

где ω_p — число витков рабочей обмотки; S — сечение сердечника; ℓ — длина магнитных силовых линий; L_p — индуктивность рабочей обмотки; X_{LP} — индуктивное сопротивление рабочей обмотки.

При уменьшении индуктивного сопротивления увеличивается ток рабочей обмотки. Значит, насыщая сердечник изменениями небольшого постоянного тока обмотки управления, можно производить изменения большого тока рабочей обмотки.

2. Трансформаторный магнитный усилитель (рис. 11.12.). Синусоидальное напряжение подаётся на обмотку w_1 , обмотка w_2 соединяется с нагрузкой Z_H . В ненасыщенном состоянии сердечника ток обмотки w_1 изменяет магнитный поток сердечника в больших пределах. Этот поток создаёт в

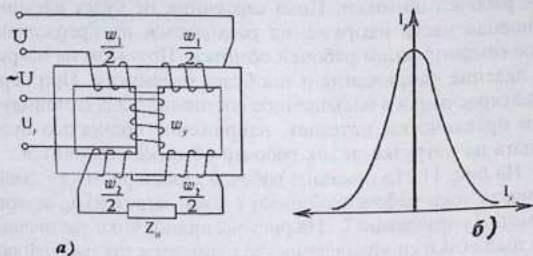


Рис. 11.12. Трансформаторный магнитный усилитель:
а) схема; б) рабочая характеристика.

обмотке w_2 э.д.с., создающая ток на нагрузке Z_H . Насколько будут большими изменения магнитного потока, настолько будут большими эдс в обмотке w_2 . Увеличивая ток в обмотке управления w_1 , можно насытить сердечник. В результате э.д.с. обмотки w_2 и ток нагрузки уменьшаются. Следовательно, с увеличением тока I_1 обмотки управления ток нагрузки уменьшается. Рабочая характеристика - зависимость тока нагрузки от тока обмотки управления показана на рис. 11.12б. Сравнивая рабочие характеристики дроссельного и трансформаторного магнитного усилителей, можно сделать вывод, что они являются зеркальными отображениями друг друга. Причиной этого является то, что э.д.с., возбуждаемая в цепи нагрузки в дроссельном магнитном усилителе, выполняет роль заслонки, а в трансформаторном магнитном усилителе - роль источника энергии для нагрузки.

11.5. Ферромагнитный стабилизатор напряжения

В стабилизаторах напряжения используются линейные и нелинейные элементы. В линейных элементах зависимость между током и напряжением имеет линейный характер. В

нелинейных элементах зависимость между током и напряжением имеет нелинейный характер. Например, активное сопротивление, конденсатор, ненасыщенный магнитный сердечник — это линейные элементы, а катушка с насыщенным сердечником — это нелинейный элемент.

Рассмотрим кривую зависимости между током и напряжением катушки с ферромагнитным сердечником (рис. 11.13а, б). В ненасыщенном состоянии сердечника (участок ОА рис. 11.13б) с ростом тока пропорционально ему растёт напряжение. С насыщением сердечника с ростом тока рост напряжения (после точки В) замедляется. Этим свойством ферромагнитного сердечника пользуются в ферромагнитных стабилизаторах напряжения.

На рис. 11.13в показана упрощённая схема феррорезонансного стабилизатора напряжения. В качестве линейного элемента в этой схеме использован конденсатор. Напряжения U_c конденсатора и катушки $U_L = U_{\text{вых}}$ сдвинуты между собой почти на 180° . Поэтому входное напряжение $U_{\text{вх}} = U_c - U_L$. При этом не учтены активные сопротивления конденсатора и катушки, а также высшие гармонические состав-

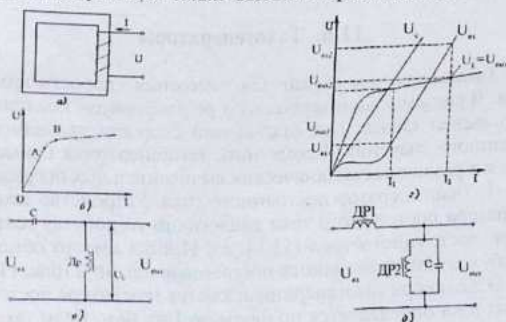


Рис. 11.13. Ферромагнитный стабилизатор напряжения: а) ферромагнитный сердечник с катушкой; б) зависимость между током и напряжением катушки с ферромагнитным сердечником; в) схема простого ферромагнитного стабилизатора напряжения; г) графики, поясняющие принцип работы стабилизатора; д) схема стабилизатора напряжения с ферромагнитным контуром.

ляющие напряжений и токов. На рис. 11.13г показаны графики напряжений U_L и U_C . По формуле $U_{ВХ} = U_C - U_L$ начертим график входного напряжения $U_{ВХ}$. Для этого находим несколько точек, соответствующих разностям ординат U_C и U_L при одинаковых токах. Теперь по графикам находим значения входного и выходного напряжений, соответствующих токам I_1 и I_2 . Току I_1 на входе соответствует напряжение $U_{ВХ1}$, а на выходе $U_{ВЫХ1}$. Току I_2 на входе соответствует напряжение $U_{ВХ2}$, а на выходе $U_{ВЫХ2}$. Разница входных напряжений $\Delta U_{ВХ} = U_{ВХ2} - U_{ВХ1}$ намного больше разницы выходных напряжений $\Delta U_{ВЫХ} = U_{ВЫХ2} - U_{ВЫХ1}$. Следовательно, при больших изменениях входного напряжения выходное напряжение изменяется очень мало, т.е. схема работает в качестве стабилизатора напряжения. Для повышения уровня стабилизации, увеличения КПД, снятия высокочастотных колебаний применяются более сложные схемы. Одна из таких схем показана на рис. 11.3, д. В этой схеме в качестве линейного элемента использован дроссель Dr_1 с ненасыщенным сердечником, а в качестве нелинейного элемента — резонансный контур L_2C . Dr_2 — это катушка с насыщенным сердечником.

11.6. Тахогенераторы

Тахогенераторы служат для измерения скорости вращения. В системах автоматического регулирования тахогенератор выдаёт сигнал при отклонении скорости вращения от заданного значения. Кроме того, тахогенераторы применяются в различных механических вычислительных операциях.

1. Тахогенератор постоянного тока. Устройство тахогенератора постоянного тока аналогично устройству генератора постоянного тока (11.14, а). Иногда вместо обмоток возбуждений применяются постоянные магниты (рис. 11.14, б). Э.д.с. якоря тахогенератора, как и в генераторе постоянного тока определяется по формуле $E = c_e \Phi \cdot n$. Если тахогенератор не нагружен и магнитный поток Φ не изменяется, то зависимость между э.д.с. и скоростью линейна. Такая зависимость называется идеальной выходной характеристикой (рис. 11.14, в). В нагруженном тахогенераторе из-за реакции якоря, падения напряжения в проводах и щетках выходная характеристика становится нелинейной. Поэто-

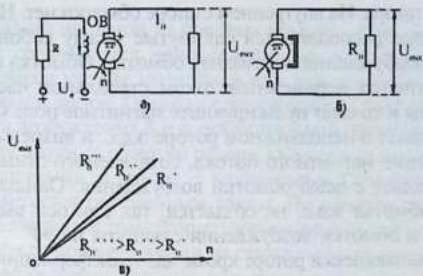


Рис. 11.14. Тахогенератор постоянного тока: а) с обмоткой возбуждения; б) с постоянным магнитом вместо обмотки возбуждения; в) выходные характеристики.

му сопротивление тахогенератора должно быть неизменным и в несколько раз больше сопротивления обмотки якоря. Выходное напряжение

$$E_{\text{вых}} = K \cdot U_{\text{в}} \cdot n,$$

где K - постоянный коэффициент;

$U_{\text{в}}$ - напряжение обмотки возбуждения;

n - скорость вращения ротора.

2. Асинхронный тахогенератор (рис. 11.15) состоит из немагнитного в форме стаканчика ротора, внешнего и внут-

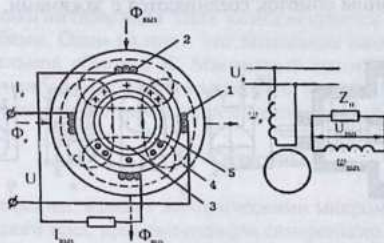


Рис. 11.15. Асинхронный тахогенератор: а) устройство; б) схема соединений: 1-обмотка возбуждения; 2-выходная обмотка; 3-ротор; 4-внешний статор; 5-внутренний статор.

ренного статора. На внутреннем статоре обмотки нет. На внешнем статоре располагаются сдвинутые между собой на 90° обмотка возбуждения и выходная обмотка. Обмотка возбуждения питается переменным током стабильной частоты и амплитуды и создаёт пульсирующее магнитное поле Φ_e . Этот поток создаёт в неподвижном роторе э.д.с. и вихревые токи. Направление магнитного потока, создаваемого этими токами, совпадает с осью обмотки возбуждения. Однако в выходной обмотке э.д.с. не создаётся, так как оси выходной обмотки и обмотки возбуждения сдвинуты на 90° .

Во вращающемся роторе кроме эдс трансформации создаётся вращающаяся э.д.с. Магнитное поле суммарной э.д.с. по направлению совпадает с осью выходной обмотки и создаёт в ней э.д.с., пропорциональную скорости вращения ротора.

11.7. Вращающиеся трансформаторы

Поворотные трансформаторы служат для получения напряжения, пропорционального углу α , $\sin \alpha$ или $\cos \alpha$. Они применяются, например, в устройствах вычислительной техники для определения гипотенузы прямоугольного треугольника по его катетам. Вращающийся трансформатор (рис. 11.16.) состоит из статора и ротора. Их сердечники собираются из листов электротехнической стали. В пазах сердечников укладываются обмотки: S и K — это обмотки статора, A и B — обмотки ротора. Эти обмотки сдвинуты между собой на угол 90° . Концы обмоток соединяются с зажимами, уста-

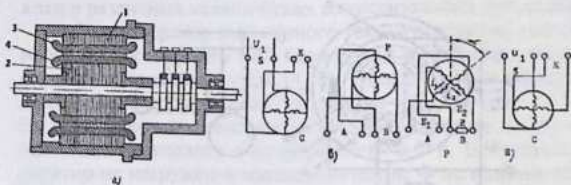


Рис. 11.16. Вращающийся трансформатор: а) устройство; б) схемы обмоток ротора и статора; в) схема соединений при нагруженном роторе: 1-статор; 2-ротор; 3-обмотки статора; 4-обмотки ротора.

новленными на одной из боковых крышек. Концы обмотки статора соединяются непосредственно, а концы обмоток ротора через мягкие проволоки или при помощи контактных колен и щеток. Обмотка статора (рис. 11.16б) состоит из обмотки возбуждения S и вспомогательной обмотки K. A и B — это косинусные обмотки ротора. Обмотки статора называют первичными, а ротора — вторичными. Обмотка возбуждения питается переменным током. По сравнению с обычным однофазным трансформатором вторичная обмотка (ротора) может поворачиваться на определенный угол. Ток обмотки возбуждения создаёт магнитное поле, которое пересекает обмотки ротора и создает в них э.д.с.

$$\begin{aligned} E_A &= E_M \cdot \sin \alpha \\ E_B &= E_M \cdot \cos \alpha, \end{aligned}$$

где E_M — максимальная величина э.д.с. ротора; α — угол поворота ротора.

Однако такая зависимость может быть при ненагруженном роторе. При наличии нагрузки по обмоткам ротора текут токи i_1 и i_2 , создающие продольную $F_{пр}$ и поперечную $F_{поп}$ намагничивающие силы (рис. 11.16в). Продольная намагничивающая сила, как в обычном трансформаторе, компенсируется увеличением тока в первичной обмотке. Поперечная намагничивающая сила $F_{поп}$ искажает магнитный поток трансформатора и синусоиду E_1 и E_2 . Поперечная намагничивающая сила компенсируется различными способами. Один из них — это замыкание накоротко вспомогательной обмотки K. Магнитный поток этой обмотки будет направлен против магнитного потока, создаваемого поперечной намагничивающей силой, и компенсирует его.

11.8. Сельсины

Сельсины, являясь электрическими микромашинами переменного тока, применяются для синхронного поворота или вращения двух или нескольких механически не связанных осей. Они работают в режиме индикации и трансформатора.

На рис. 11.17. показано устройство бесконтактного сельсина. На статоре расположены обмотки возбуждения и син-

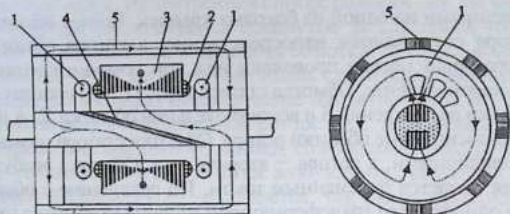


Рис. 11.17. Бесконтактный сельсин: 1-обмотка возбуждения; 2-обмотка синхронизации; 3-статор; 4-немагнитный слой; 5-магнитопровод.

хронизации. Обмотка синхронизации состоит из трёх одинаковых катушек, сдвинутых друг относительно друга на 120° . Они установлены на кольцевых сердечниках. Обмотка возбуждения состоит из двух кольцевых катушек, соединённых последовательно и расположенных по бокам обмотки синхронизации. Ротор собирается из стальных листов и по диагонали разделён на две части слоем немагнитной прокладки. По назначению сельсины бывают: сельсин - датчик (СД), сельсин- приёмник (СП) и дифференциальный сельсин. Сельсин- датчик передаёт угловые перемещения, сельсин- приёмник показывает величину этих угловых перемещений. Дифференциальный сельсин- датчик (ДСД) и дифференциальный сельсин- приёмник (ДСП) показывают алгебраическую сумму угловых перемещений двух механически не связанных осей.

1. Работа сельсинов в режиме индикации (рис. 11.18)

В этом режиме сельсины применяются для дистанционного измерения угловых перемещений. Обмотки возбуждения сельсинов подключаются к сети переменного тока, обмотки синхронизации соединяются между собой. В данной схеме работает один СП. На практике могут быть несколько СП. Переменный ток в обмотках возбуждения создаёт пуль-

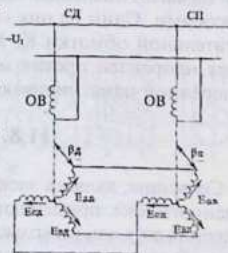


Рис. 11.18. Работа сельсинов в режиме индикации.

сирующее магнитное поле, которое создаёт в обмотках синхронизации э.д.с. Эти э.д.с. направлены противоположно друг другу. Поэтому при одинаковых угловых положениях сельсинов эти э.д.с. равны друг другу и в обмотках синхронизации, а также в соединительных проводах между ними, токи не возникают.

При повороте ротора СД на некоторый угол величина э.д.с. в его обмотке синхронизации изменится, а в обмотке синхронизации СП не изменится. В результате в обмотках синхронизации и в соединительных проводах между ними возникают уравнивающие токи, создающие вращающий момент. Этот момент действует на роторы СД и СП и стремится установить их в одинаковые угловые положения. Но так как ротор СД соединён с осью редуктора или какого-то другого механизма, то момент не в силах повернуть ротор СД. В результате поворачивается ротор СП на тот же угол, что и ротор СД, так как на роторе СП установлена только стрелка. Стрелка по шкале покажет угол СД.

2. Работа сельсинов в режиме трансформации (рис. 11.19)

В этом режиме сельсины применяются для дистанционного управления поворотом или вращением механизмов и машин. Переменный ток от сети подаётся только на обмотку возбуждения СД, обмотка возбуждения СП соединяется с усилителем. Обмотки синхронизации соединяются между собой. Ротор СД поворачивается от руки или каким-либо механизмом. Ротор СП соединяется с редуктором.

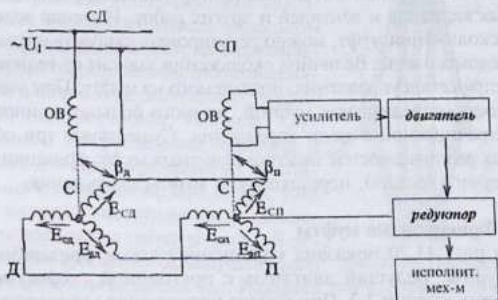


Рис. 11.19. Работа сельсинов в режиме трансформатора.

Магнитное поле обмотки возбуждения СД создаёт в его обмотке синхронизации э.д.с., которая по проводам передаётся на обмотку возбуждения СП. На СП магнитный поток обмотки синхронизации пересекает обмотку возбуждения и (как в трансформаторе) создаёт в ней э.д.с. При неподвижном роторе СД и когда ротор СП ещё не соединён с редуктором, величина этой э.д.с. будет максимальной. Однако перед каждым поворотом ротора СД величина э.д.с. обмотки возбуждения СП должна быть равна нулю. Для этого при неподвижном роторе СД ротор СП поворачивается на 90° и в этом положении соединяется с редуктором. После этого система будет готова к работе. Если после этого повернуть ротор СД на некоторый угол, изменится э.д.с. и магнитный поток в обмотках синхронизации сельсинов. В результате в обмотке возбуждения СП появится э.д.с., которая усиливается усилителем и подаётся на исполнительный двигатель. Двигатель приводит в движение редуктор, который выполняет две функции: 1) поворачивает исполнительный механизм на заданный угол для выполнения заданной работы; 2) одновременно поворачивает ротор СП на угол, на который повернулся ротор СД для восстановления равновесия системы.

11.9. Электромагнитные муфты

Электромагнитные муфты служат для соединения или разъединения вращающихся валов, открытия и закрытия различных клапанов и вентилей и других работ. Изменяя величину скольжения муфт, можно регулировать скорость вращения ведомого вала. Величина скольжения зависит от величины напряжения управления, подаваемого на муфту. При этом мощность, передаваемая муфтой, намного больше мощности, затрачиваемой в цепи управления. Существуют три основных разновидностей электромагнитных муфт: фрикционные (сухого трения), порошковые и муфты скольжения.

1. Фрикционные муфты

На рис. 11.20 показана упрощённая схема фрикционной муфты. Ведущий двигатель с постоянной скоростью вращает шестерни 2,3. При подаче напряжения управления на обмотку 12 электромагнита 13 его якорь 11 перемещает-

ся влево и прижимает фрикционный диск 15 к шестерне 2. В результате вращение от ведущего вала 16, шестерню 2, диска 15, шестерни 10 передаётся на ведомый вал 9.

Для вращения ведомого вала в другую сторону напряжение управления подаётся на обмотку 5 электромагнита 6. При этом якорь 7 прижимает фрикционный диск 4 к шестерне 3. В результате вращение от ведущего вала через шестерню 3, фрикционный диск 4, шестерню 8 подаётся на ведомый вал 9. На практике применяются более сложные, многодисковые фрикционные муфты, передающие большие вращающие моменты.

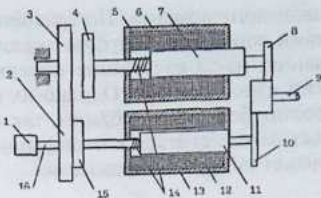


Рис. 11.20. Муфта сухого трения:

1-ведущий двигатель; 2,3-шестерни; 4,15-фрикционные диски; 5,12-обмотки; 6,13-электромагниты; 7,11-якоря; 8,10-шестерни; 9-ведущий вал; 14-пружина; 16-ведущий вал.

2. Порошковые муфты (рис. 11.21)

На ведущий и ведомый валы насаживают стальные диски муфты. Пространство между дисками заполняется ферромагнитным порошком из карбонильного железа. Ферромагнитный порошок обычно применяется в смеси с разделителем — графитом, окисью цинка, тальком, служащими для разделения порошка, а также для предохранения их от слипания и комкования. При подаче тока на катушку магнитное поле её спрессовывает порошок в твёрдую массу. В результате вращение от ведущего вала передаётся на ведомый вал. Изменяя ток катушки, можно изменять степень твёрдости порошковой массы и тем самым изменять величину пере-

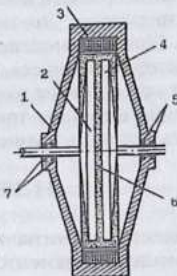


Рис. 11.21. Порошковая

муфта: 1-корпус; 2,4-стальные диски; 3-катушка; 5-контакты; 6-ферромагнитная масса.

даваемого момента. По сравнению с фрикционными муфтами порошковые муфты имеют меньше времени срабатывания, из-за отсутствия поверхностей трения механический износ меньше. Однако их нельзя применять при скоростях более 3000 об/мин, так как при этом порошок может переместиться к периферии зазора. Из-за этого муфта может потерять управление.

3. Муфты скольжения

Принцип работы этих муфт похож на принцип работы асинхронных двигателей (рис. 11.22). На ведущем валу установлен индуктор, на ведомом валу - якорь. Индуктор с полюсными выступами имеет обмотку, на которую ток подаётся через контактные кольца. Якорь выполняется в виде короткозамкнутой обмотки, полового стакана. При подаче тока на обмотку индуктора и его вращения вращается магнитное поле индуктора. Это поле пересекает якорь и наводит в нём токи. При взаимодействии этих токов и магнитного поля индуктора возникает вращающий момент, который приводит во вращение якорь и связанный с ним ведомый вал. Изменяя величину тока индуктора, можно плавно регулировать скорость вращения ведомого вала.

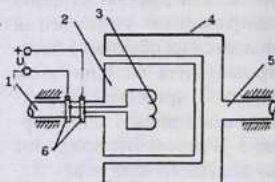


Рис. 11.22. Муфта скольжения: 1-ведущий вал; 2-индуктор; 3-обмотка; 4-якорь; 5-контактные кольца; 6-ведомый вал.

11.10. Электромагниты

Электромагниты применяются для прямолинейного перемещения элементов различных устройств. Они бывают постоянного и переменного токов. На рис. 11.23 показано устройство однофазного электромагнита. Его сердечник и якорь выполнены из листов электротехнической стали. При прохождении тока через катушку возникает магнитное поле и сила F , которая стягивает якорь внутрь катушки. Якорь приводит в движение связанный с ним механизм. Зависи-

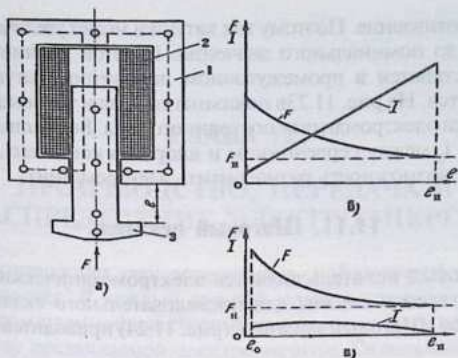


Рис. 11.23. Электромагнит: а) устройство электромагнита; б) тяговая характеристика электромагнита переменного тока; в) тяговая характеристика электромагнита постоянного тока: 1-сердечник; 2-катушка; 3-якорь.

мость тяговой силы F от величины перемещения l якоря называется тяговой электромагнитной характеристикой (рис. 11.23б). В однофазном электромагните тяговая сила в конце больше, чем в начале в 1,5-2 раза. В начале движения якоря воздушный промежуток между сердечником и якорем будет наибольшим. Поэтому магнитный поток, индуктивность катушки и индуктивное сопротивление будут наименьшими. Поэтому в начальный момент через катушку проходит наибольший ток. В конце движения якоря индуктивное сопротивление катушки увеличивается, и поэтому ток уменьшается в 5-15 раз. Однако якорь, не дойдя до конца, может остановиться в промежуточном положении. Причиной этого является то, что большой начальный ток может перегреть катушку и вывести электромагнит из строя. Для предотвращения этого якорь снабжается пружиной, которая доводит якорь до конца. Для предотвращения колебаний якоря сердечник замыкается демпферным витком.

Так как электромагниты постоянного тока питаются постоянным током, их сердечник и якорь выполняются из сплошной стали, и демпферный виток не нужен. Катушка электромагнита оказывает постоянному току только актив-

ное сопротивление. Поэтому ток катушки может увеличиваться от нуля до номинального значения. По этой причине, если якорь останется в промежуточном положении, катушка не перегреется. На рис. 11.23в показаны тяговая и токовые характеристики электромагнита постоянного тока. Воздушный промежуток l_0 между сердечником и якорем в конце его движения даёт возможность размагнитить электромагнит.

11.11. Шаговый искатель

Шаговый искатель является электромеханическим распределителем и служит для последовательного включения элементов. Шаговый искатель (рис. 11.24) приводится в дви-

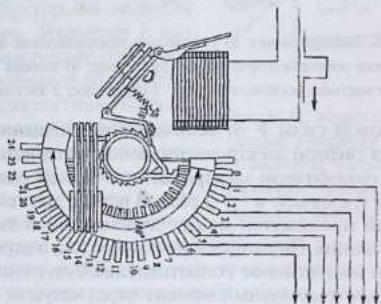


Рис. 11.24. Шаговый искатель: 1-якорь; 2-электромагнит; 3-неподвижные контакты; 4-подвижный контакт; 5-храповое колесо; 6-рычаг; 7-пружина.

жение при помощи электромагнита постоянного тока. При подаче управляющего сигнала на обмотку электромагнита якорь притягивается к сердечнику, преодолевая силу обратной пружины. При этом рычаг скользит по зубцам храпового механизма, делая один шаг. При этом, щётка (подвижной контакт), замыкаясь с последующим неподвижным контактом подключает очередной исполнительный элемент. В настоящее время в технике применяются шаговые искатели типа ШИ-25/4, ШИ-25/8, ШИ-50/2.

ГЛАВА 12

ПРОИЗВОДСТВО, ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Производство электроэнергии и снабжение ею это единый процесс. В каждый данный момент времени количество производимой электроэнергии должно быть равно количеству поставляемой электроэнергии. Отдельные электростанции не могут бесперебойно обеспечить потребителей электроэнергией. Поэтому они объединяются в единую энергосистему. В результате обеспечивается постоянство напряжения и частоты, так как колебания нагрузок воспринимаются сразу многими электростанциями.

Возможны следующие типы электростанций

КЭС — конденсаторные электростанции — они предназначены только для выработки электроэнергии.

ТЭЦ — теплоэлектроцентрали — в них кроме электроэнергии производится пар и горячая вода.

ГРЭС — государственные районные электростанции — это крупная районного масштаба конденсаторные электростанции.

В КЭС, ТЭЦ, ГРЭС в качестве топлива могут использоваться уголь, торф, горючие сланцы, газ, мазут. КЭС и ГРЭС обычно располагаются близко к месторождению топлива.

АЭС — атомные электростанции — в них используется энергия, выделяемая при расщеплении ядер атомов тяжелых элементов. Например, тепло, выделяемое при расщеплении ядер 1 кг урана эквивалентно количеству тепла, выделяемого при сжигании 3000 т каменного угля.

ГЭС — гидроэлектростанции — в них используется энергия воды рек, водохранилищ, приливов.

Имеется следующая шкала напряжений переменного тока: 220, 380, 660 В; 3, 6, 10, 20, 35, 110, 150, 220, 330, 500, 750, 1150 кВ.

Примерно 2/3 произведенной электроэнергии потребляет промышленность. Схемы снабжения электроэнергией промышленных предприятий зависят от их мощности и выполняются по ступенчатому принципу. На первой ступени напряжение подается на главную подстанцию, где напряжение 110-220 кВ понижается до 10-6 кВ. На второй ступени это напряжение подается на цеховые подстанции, где оно понижается до напряжений потребителей электроэнергии. На третьей ступени пониженное напряжение доводится до потребителей.

12.1. Схемы распределения электроэнергии между потребителями

Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ) линии и сети бывают до 1000 В и свыше 1000 В.

На рис. 12.1. показана однолинейная схема подстанции с тремя распределительными устройствами напряжением 110-35/10 кВ. Открытое распределительное устройство (ОРУ) на 110 кВ выполнено с тремя шинами: $I_{сш}$ и $II_{сш}$ —

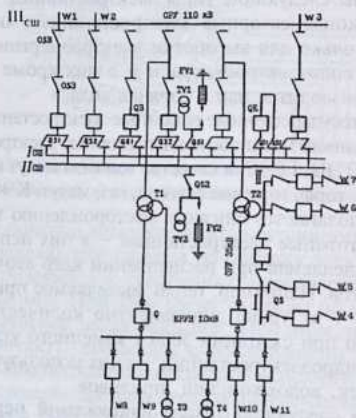


Рис. 12.1. Линейная схема подстанции на 110 (35) 10 кВ с тремя распределительными устройствами.

рабочие шины, $\Pi_{\text{сш}}$ — обходная шина, а также имеет присоединения к трем линиям электропередачи W_1, W_2, W_3 . В эту систему входят следующее оборудование и аппаратура: силовые трехобмоточные трансформаторы T_1 и T_2 , выключатели QK и QB, соединяющие шины, измерительные трансформаторы напряжения TV1 и TV2, разрядники FV1 и FV2. Такая схема позволяет ремонтировать любую систему шин. Например, при ремонте шины $I_{\text{сш}}$ надо отключить разъединитель QS1, при ремонте $\Pi_{\text{сш}}$ — QS2, при ремонте обходной шины $\Pi_{\text{сш}}$ — QSB. Любую линию электропередачи (например W_1) можно присоединить к шинам $I_{\text{сш}}$ или $\Pi_{\text{сш}}$, включив разъединители QS1 и QS2 шиносоединительного выключателя ОК и этот выключатель.

Открытое распределительное устройство (ОРУ) на 35 кВ имеет одну систему шин с двумя секциями I и II. Они могут соединяться друг с другом выключателем QC. От обмотки 35 кВ трансформатора T1 через секцию I питаются линии W_4 и W_5 . От обмотки 35 кВ трансформатора T2 через секцию II питаются линии W_6 и W_7 .

Комплектное распределительное устройство наружной установки КРУН состоит из двух секций I и II, подключенных к обмоткам 10 кВ трансформаторов T1 и T2. От первой секции питаются W_8, W_9 и трансформатор T3. От второй секции питаются линии W_{10}, W_{11} и трансформатор T4. Трансформаторы T3 и T4 питают пониженным напряжением различное оборудование и аппаратуру подстанции.

В рассмотренной схеме показаны только силовые цепи. Однако, любая энергосистема имеет средства контроля и управления этой системой.

Схема квартирной электропроводки показана на рис 12.2. Потребители питаются от магистральной линии трехфазного тока. В этой схеме счетчик Wh подключен на фазу A и нейтральный провод N. К счетчику через автоматические выключатели SF1 и SF2 подключены осветительная и розеточная линии. К осветительной линии подключены лампа EL1, выключатель S1, люстра с лампами EL2-EL4, выключатель S2, лампа ELS, выключатель S4 и лампы EL6, EL7 через выключатель S3. К розеточной линии подключены розетки X1 и X2.

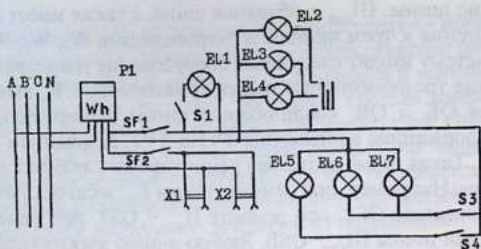


Рис. 12.2. Схема квартирной электропроводки.

12.2. Расчет проводов

Напряжение потребителя бывает меньше напряжения источника за счет падения напряжения в проводах линии при прохождении тока. Разница между напряжениями источника и потребителя называется падением напряжения.

$$\Delta U = U_1 - U, \quad (12.1)$$

где U_1 — напряжение источника; U — напряжение на потребителя.

Допустимое падение напряжения зависит от вида нагрузки. Например, для силовых нагрузок допускается падение напряжения 6%, для осветительной сети — 2,5%. В противном случае снижаются пусковые и вращающие моменты двигателей, уменьшается световой поток осветительных устройств. Вообще, электропроводка должна обеспечивать бесперебойную подачу электроэнергии потребителю, противопожарную безопасность и электрическую безопасность человека.

1. Расчет проводов по допустимому падению напряжения

Падение напряжения:

$$\Delta U = U_1 - U = I \cdot R, \quad (12.2)$$

где I — ток провода; R — сопротивление провода.

Сопротивление провода:

$$R = \frac{2l}{\gamma \cdot S},$$

где l — длина линии; S — сечение провода; γ — удельная проводимость провода.

В большинстве случаев падение напряжения выражается в процентах к напряжению потребителя и его называют относительным падением напряжения:

$$U_r = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100\%. \quad (12.3)$$

Находим сечение провода:

$$\Delta U = I \cdot R = I \frac{2l}{\gamma \cdot S}, \quad (12.4)$$

отсюда

$$S = \frac{2I \cdot l}{\Delta U \gamma} = \frac{2l \cdot I \cdot 100}{U_r \cdot U \cdot \gamma}.$$

Если последнее выражение умножить и разделить на U , то получим

$$S = \frac{2 \cdot 100 \cdot P \cdot l}{U_r \cdot U^2 \cdot \gamma},$$

где $P = U \cdot I$ — мощность.

Для цепи однофазного переменного тока

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad (12.5)$$

В симметричной трехфазной системе падение напряжения в фазе

$$\Delta U_{\phi} = I \cdot R \cdot \cos \varphi, \quad (12.6)$$

где I — линейный ток; $R = l / \gamma \cdot S$ — сопротивление одного провода.

Так как линейное напряжение больше фазного в $\sqrt{3}$ раз

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot \Delta U_{\phi} = \sqrt{3} \cdot I \cdot R \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot I \frac{l \cdot \cos \varphi}{\gamma \cdot S},$$

значит

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot I \cdot \cos \varphi}{\Delta U \gamma} = \frac{100 \cdot l \cdot \sqrt{3} \cdot I \cdot \cos \varphi}{U_r \cdot \gamma \cdot U}$$

Умножив и разделив на U , получим

$$S = \frac{100 \cdot l \cdot P}{\gamma \cdot U_r \cdot U^2},$$

где $P = \sqrt{3} U \cdot I \cdot \cos \varphi$ — активная мощность симметричной трехфазной системы.

2. Расчет сечения проводов по допустимому нагреву.

Потребители электрической энергии одновременно не включаются в сеть. Кроме того, двигатели все время не работают с полной мощностью. Поэтому при расчетах принимается во внимание не установленная мощность, а одновременно потребляемая потребителями мощность, которая называется расчетной мощностью. Отношение расчетной мощности к установленной называется коэффициентом потребности.

$$K_n = \frac{P_p}{P_y} \text{ или } K_n = \frac{I_p}{I_y}, \quad (12.8)$$

где P_p и I_p — одновременно используемая (расчетная) мощность и ток; P_y и I_y — установленные мощность и ток; K_n — коэффициент потребности.

Для осветительных нагрузок коэффициент потребности имеет следующие величины:

1. Для внешней осветительной сети $K_n = 1,0$.
2. Для домашней осветительной сети $K_n = 0,7+0,8$.
3. Для предприятий $K_n = 0,7+0,9$.
4. Для длительно работающих двигателей $K_n = 0,8$.

Если в подъемных механизмах количество двигателей будет от 1 до 5, то $K_n = 0,8$; от 5 до 10 $K_n = 0,65$. Для двигателей, установленных на станках и работающих в повторно кратковременном режиме при количестве двигателей от 1 до 5 $K_n = 0,8$; от 5 до 10 $K_n = 0,5$.

Для сети с однофазным переменным и постоянным током расчетный ток для осветительных нагрузок

$$I_p = \frac{K_n \cdot P_y}{U} = \frac{P_p}{U} \quad (12.9)$$

Для цепи с трехфазным током

$$I_p = \frac{K_n \cdot P_y}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (12.10)$$

Для двигателя постоянного тока величина номинального тока

$$I_n = \frac{P_n}{U \cdot \eta} \quad (12.11)$$

Номинальный ток трехфазного двигателя

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \eta} \quad (12.12)$$

где η – КПД двигателя.

Величины η и $\cos \varphi$ для двигателей берутся из справочников и каталогов. Для двигателей малой мощности (до 10–12 кВт) произведение $\eta \cdot \cos \varphi$ можно взять 0,7–0,8.

Расчетный ток двигателей

$$I_p = K_n \cdot I_n = K_n \cdot I_y \quad (12.13)$$

Сечения проводов определяются из таблиц по допустимому нагреву. В таблицах даются сечения проводов при длительно допустимых токах, величины которых не должны быть менее расчетных токов

$$I_{дл} \geq I_p \quad (12.14)$$

$I_{дл}$ – длительно допустимый ток.

12.3. Расчет плавких вставок предохранителей

Плавкие вставки должны предохранять провода от токов коротких замыканий и перегрузочных токов. При прохождении токов больших чем расчетные плавкие вставки должны перегорать. Номинальный ток плавкой вставки $I_{вст}$ должен быть равным или больше расчетного тока защиты линии

$$I_{вст} \geq I_p \quad (12.14)$$

Номинальный ток плавкой вставки для одного двигателя рассчитывается следующим образом:

а) исходя из номинального тока двигателя

$$I_{\text{вст}} \geq \alpha \cdot I_n; \quad (12.15)$$

б) исходя из пускового тока

$$I_{\text{вст}} \geq \frac{I_n}{\beta} = \frac{K_1 \cdot I_n}{\beta}, \quad (12.16)$$

где I_n — номинальный ток двигателя;

I_n — пусковой ток двигателя;

α — коэффициент, зависящий от режима работы двигателя (при длительном режиме $\alpha=1$, повторно-кратковременном режиме $\alpha=1,25$);

β — коэффициент, учитывающий условия пуска (при нормальных условиях $\beta=2,5$, при тяжелых $\beta=1,6 \div 2$);

K_1 — кратность пускового тока.

Для группы работающих двигателей ток плавкой вставки:

$$I_{\text{вст}} = \frac{\sum I_{n.дв} + (I_n - I_n)}{2,5}, \quad (12.17)$$

где $\sum I_{n.дв}$ — сумма номинальных токов одновременно работающих двигателей.

12.4. Действие электрического тока на организм

Степень поражения током зависит от силы тока и его частоты, а также пути прохождения его в организме. Ток частотой 25-50 Гц сильно действует на организм человека. При токе 25 миллиампер начинаются судороги, и человек не может разжать пальцы, которыми от охватил токовый провод. В соответствии с правилами техники безопасности ток 50 миллиампер считается опасным для человека. Сопротивление организма человека составляет от 800 до 10000 Ом. Например, если сопротивление организма человека составляет 1200 Ом, то для него является опасным напряжение в

$$U = I \cdot R = 0,05 \cdot 1200 = 60 \text{ В.}$$

Мощность источника при этом

$$P = U \cdot I = 60 \cdot 0,05 = 3 \text{ Вт.}$$

Если мощность источника при этом будет намного меньшей, то поражение током высокого напряжения от такого источника будет менее опасным, так как ток будет маленьким. Для сухих помещений считается опасным напряжение 65 В, в помещениях с относительной влажностью 75% — 36 В, в помещениях с относительной влажностью 100%, металлических кабинах, котлах — 12 В.

12.5. Меры по предупреждению поражения током человека

Для предохранения человека от поражения током при соприкосновении с устройствами, находящимися под напряжением, применяются защитная одежда, ограждения, блокировки, защитное заземление.

1. Защитное заземление.

При нарушении изоляции проводов металлические части электроустановок окажутся под высоким напряжением. При прикосновении этой части происходит поражение током человека, стоящего на земле. Для предупреждения этого металлические части электроустановок соединяются с землей (рис. 12.3). Заземление выполняется из стальных труб, лент и угольников. Они забиваются в землю на необходимую глубину и соединяются между собой стальными лентами сваркой. Сопротивление заземления не должно пре-

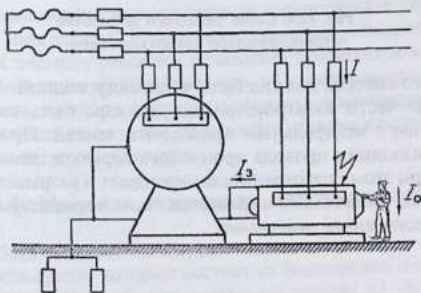


Рис. 12.3. Схема защитного заземления.

выйшать 4-10 Ом. Сопротивление человека, соприкоснувшегося с металлической частью электроустановки, оказывается соединенным параллельно сопротивлению R_0 заземления. Так как сопротивление человека намного больше сопротивления заземления, то через него будет проходить очень маленький ток, безопасный для человека.

2. Защитное заземление четырехпроводной цепи с трехфазным током (рис.12.4).

Если в рассмотренной (рис. 12.3) схеме заземления трехпроводной системы один линейный провод коснется металлической части, то предохранитель может не сработать.

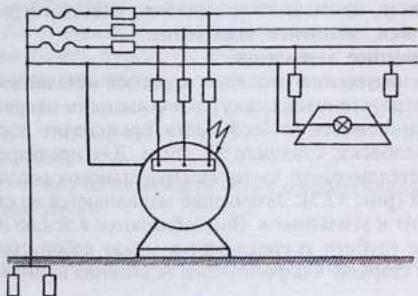


Рис. 12.4. Схема защитного заземления четырехпроводной трехфазной цепи.

Для этого система должна быть четырехпроводной. Металлические части электроустановки должны быть надежно соединены с нейтральным проводом и землей. При нарушении изоляции провода произойдет короткое замыкание фазы. При этом предохранитель перегорает и разрывает цепь этой фазы. Такая схема называется также *четырёхпроводная сеть с заземленной нейтралью*.

ГЛАВА 13

ЭЛЕКТРОПРИВОД И АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ

Электромеханическая система, предназначенная для механизации и автоматизации рабочего процесса называется электроприводом. В состав электропривода входят двигатель, рабочий механизм, передающее и управляющее устройства. Управляющее устройство управляет работой электропривода. Например, регулирует величину напряжения и частоты, мощность рабочего механизма, скорость вращения двигателя, направление его вращения. Передающее устройство может быть изготовлено в виде редуктора. Тогда при помощи передающего устройства можно изменять скорость вращения привода.

В настоящее время электроприводы делятся на три группы: 1) групповые, 2) индивидуальные, 3) многодвигательные. В групповом приводе один двигатель через передаточные устройства управляет работой многих механизмов. В индивидуальном приводе рабочий механизм приводится в движение своим двигателем. Однако элементы рабочего механизма через системы передач приводятся в движение тем же двигателем. В многодвигательном электроприводе каждый элемент рабочего механизма приводится в движение своим двигателем. Например, в универсальных станках шпиндель, суппорт и другие элементы приводятся в движение своим двигателем. В тяжелых станках каждый механизм имеет свой двигатель.

13.1. Нагрев и охлаждение электродвигателей

Работа каждого электродвигателя связана с потерями электроэнергии, которые состоят из постоянной и переменной частей. Постоянные потери не зависят от нагрузки — это потери, связанные с трением в подшипниках, вентиля-

цией, это потери в стали. Переменные потери зависят от величины нагрузки и они расходятся на нагрев обмоток.

Вообще, с ростом нагрузки увеличивается температура двигателя. Разница между температурой двигателя и температурой окружающей среды называется перегревом:

$$\tau = t - t_0, \quad (13.1)$$

где τ — температура перегрева;

t — температура двигателя;

t_0 — температура окружающей среды. При расчетах температура окружающей среды берется $t_0 = 40^\circ\text{C}$.

Температура перегрева зависит от изоляции проводов обмоток. Например температура перегрева для синтетических органических пленок равна 80°C , хлопчатобумажной изоляции — 65°C .

На рис. 13.1. показаны графики нагрева двигателей при различных нагрузках. В начальный момент температура двигателя равна температуре окружающей среды. В это время почти все тепло расходуется на нагрев двигателя и поэтому кривые графика круто идут вверх.

Чем больше температура двигателя, тем больше тепла передается в окружающую среду и нагрев двигателя замедляется. Через определенное время количество выделенного тепла и количество тепла, передающегося

в окружающую среду уравниваются. При неизменной нагрузке температура двигателя принимает установившееся значение. Каждой нагрузке соответствует своя установившаяся температура $t_{\text{уст}}$. Чем больше нагрузка, тем выше график нагрева. С увеличением начальной температуры время нагрева двигателя до установившейся температуры уменьшается (рис. 13.2).

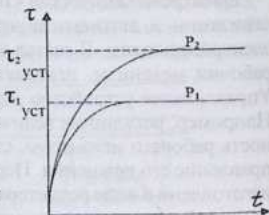


Рис. 13.1. Графики нагрева электродвигателей при различных постоянных нагрузках.

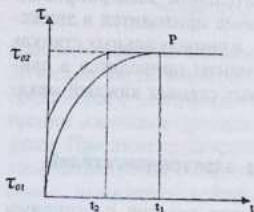


Рис. 13.2. Графики нагрева электродвигателей при различных начальных температурах.

Время охлаждения двигателя τ зависит от способов вентиляции и его массы. Обычно применяются вентиляторы, вытягивающие горячий воздух из двигателя. В двигателях с независимой вентиляцией воздух для охлаждения подается от наружных вентиляторов. Этот способ применяется только для мощных двигателей. На рис. 13.3 приведены графики охлаждения двигателей.

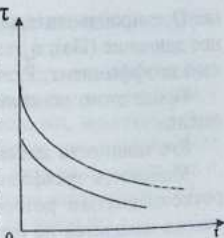


Рис. 13.3. Графики охлаждения двигателей.

13.2. Режимы работы электродвигателей и расчет их мощностей

Процесс изменения нагрузки рабочего механизма определяет его режим работы. Для учета этих изменений необходимо иметь диаграмму нагрузки. График изменения вращающего момента или мощности во времени называется нагрузочной диаграммой. Электродвигатели могут работать в следующих режимах: 1) продолжительный, 2) кратковременный, 3) повторно-кратковременный.

1. Продолжительный режим.

Этот режим рассмотрим при постоянной и изменяющейся нагрузке. При постоянной нагрузке температура перегрева постепенно достигает установившегося значения. В этом режиме работают вентиляторы, насосы, компрессоры и некоторые станки.

Если нагрузки двигателя не изменяются, то его мощность можно вычислить при помощи определенных формул, а затем по справочникам подобрать необходимый двигатель. При этом необходимо выполнить условие:

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{мех}},$$

где $P_{\text{н}}$ — номинальная мощность двигателя; $P_{\text{мех}}$ — мощность механизма.

Например, мощность двигателя вентилятора находится по следующей формуле:

$$P_{\text{в}} = \frac{Q \cdot H \cdot 10^{-1}}{\eta_{\text{в}} \cdot K_{\text{в}}} \text{ кВт}, \quad (13.2)$$

где Q — производительность вентилятора ($\text{м}^3/\text{с}$); H — полное давление (Па); η_v — КПД вентилятора; K_n — передаточный коэффициент; P_p — расчетная мощность двигателя.

После этого по каталогу подбираем необходимый двигатель.

Его мощность должна быть равной или больше P_p .

Мощность трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором для вращения центробежного насоса находится по формуле:

$$P_p = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta_n \cdot K_n} \cdot 10^{-3} \text{ кВт}, \quad (13.3)$$

где Q — производительность насоса ($\text{м}^3/\text{с}$); H — давление, создаваемое насосом; η_n — КПД насоса; K_n — передаточный коэффициент; γ — плотность воды.

Для определения мощности двигателя, работающего при длительной переменной нагрузке, необходим график нагрузки (рис 13.4). При этом применяется метод средних потерь. Сущность его заключается в том, что тепло, выделяемое двигателем в окружающую среду при работе согласно графику нагрузки, не будет превышать количества тепла, при работе двигателя с номинальной нагрузкой.

$$\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_n;$$

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_1 \cdot t_1 + \Delta P_2 \cdot t_2 + \dots + \Delta P_n \cdot t_n}{t_u}, \quad (13.4)$$

где $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n$ — это мощности потерь в течение времени $t_1, t_2, \dots, t_n$;

$\Delta P_{\text{ср}}$ — средняя мощность потерь за время цикла t_u ;

ΔP_n — мощность потерь при работе двигателя с номинальной нагрузкой за время цикла t_u .

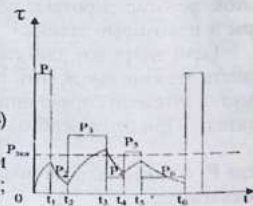


Рис. 13.4. Рабочий график электродвигателя при продолжительной переменной нагрузке.

Этот метод можно применять для расчета электродвигателей как переменного, так и постоянного токов.

Мощность двигателей можно находить методом эквивалентных величин. Например, мощность двигателя можно найти методом эквивалентного тока. Для этого ток, изменяющийся в течение цикла времени t_n , заменяется неизменяющимся током, который за время t_n выделяет столько же тепла, что и изменяющийся ток. Этот ток называется эквивалентным током $I_{\text{экв}}$ и его величина находится по формуле

$$I_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{I_0^2 \cdot t_n + I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot t_n + I_m^2 \cdot t_m}{K_1(t_n + t_r) + t_1 + t_2 + \dots + t_n}}, \quad (13.5)$$

где t_n и t_r — время пуска и торможения; $I_1, I_2, \dots, I_n$ — значения токов за время $t_1, t_2, \dots, t_n$; K_1 — коэффициент, учитывающий условия ухудшения охлаждения во время пуска и торможения (для двигателей постоянного тока $K_1=0,75$, для асинхронных двигателей $K_1=0,5$). Эквивалентный ток должен быть равным или меньше номинального тока двигателя.

$$I_n \geq I_{\text{экв}}.$$

Этот метод не применяется в отношении асинхронных двигателей с глубокими пазами или двуслойными обмотками, так как сопротивление обмотки ротора изменяется в широких пределах при пуске и торможении.

Для двигателей постоянного тока параллельного возбуждения и синхронных двигателей с постоянным возбуждением

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I \equiv I^2.$$

Поэтому для этих двигателей метод эквивалентного тока можно заменить методом эквивалентного момента:

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{M_0^2 \cdot t_n + M_1^2 \cdot t_1 + \dots + M_n^2 \cdot t_n + M_m^2 \cdot t_m}{K_1(t_n + t_r) + t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (13.6)$$

По каталогу подбирается двигатель. С моментом равным или больше $M_{\text{экв}}$ номинальная мощность двигателя

$$P_n = \frac{M_{\text{экв}} \cdot n_n}{9550}.$$

Если двигатель обладает жесткой механической характеристикой

$$P = M \cdot \omega \equiv M.$$

Поэтому эквивалентную мощность двигателя можно определить по следующей формуле

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{P_n^2 \cdot t_n + P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_n^2 \cdot t_n + P_1^2 \cdot t_1}{K_1(t_n + t_1) + t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (13.7)$$

Эквивалентная мощность должна быть равна или меньше номинальной мощности

$$P \geq P_{\text{экв.}}$$

2. Выбор мощности двигателя при кратковременном режиме работы.

Так как в этом режиме время работы двигателя очень короткое, то двигатель за это время не успевает нагреться до температуры установившегося значения (рис.13.5). За время паузы двигатель успевает остыть до температуры окружающей среды. В этом режиме работают двигатели зажимных устройств станков, подъемных мостов, шлюзовых устройств и т.д.

Двигатели кратковременного режима работы выпускаются на стандартное время работы: 10, 30, 60 и 90 мин.

Потери электрической энергии во время работы двигателя должны быть меньше потерь электроэнергии за время, указанное в паспорте.

Если график нагрузки будет одноступенчатым, двигатель подбирается по каталогу в соответствии с мощностью и временем работы, указанным в графике. При этом мощность двигателя, выбранная по каталогу, должна быть равной или чуть больше указанного в графике.

Если график нагрузки будет многоступенчатым, то расчет двигателя ведется по формулам эквивалентного тока, момента, мощности и в соответствии с найденным значе-

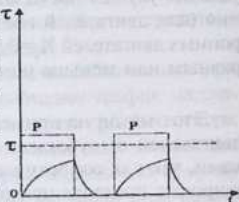


Рис. 13.5. График нагрузки электродвигателя при кратковременном режиме работы.

нием, а также согласно его скорости и времени работы подбирается из каталога. Во всех случаях необходимо выполнять условия:

$$P_{\text{экз}} \leq P_{\text{н}}, \quad M_{\text{экз}} \leq M_{\text{н}}, \quad I_{\text{экз}} \leq I_{\text{н}}$$

3. Расчет двигателя для повторно-кратковременного режима работы.

Этот режим характеризуется чередованием периодов работы и пауз. В период работы двигатель не успевает нагреться до установившегося значения температуры, а во время паузы не успевает остыть до температуры окружающей среды (рис. 13.6). В этом режиме работают электродвигатели кранов, лифтов, подъемников, ряд двигателей прокатных станков. В паспортах таких двигателей указана продолжительность включения (ПВ).

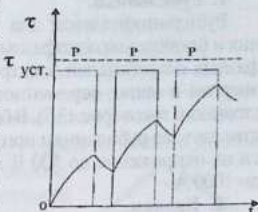


Рис. 13.6. График нагрузки электродвигателя при повторно-кратковременном режиме работы.

$$\text{ПВ} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n + t_0} \cdot 100\%, \quad (13.8)$$

где $t_1 + t_2 + \dots + t_n$ — общее время работы двигателя; t_0 — время паузы; $t_1 + t_2 + \dots + t_n + t_0$ — время цикла.

Электродвигатели выпускаются на стандартное ПВ=15, 25, 40, 60 %, при этом ПВ=25% считается номинальным.

Время цикла повторно-кратковременного режима не должно превышать 10 мин. Для расчета находим эквивалентную мощность по формуле 13.7. Потом в соответствии с заданным ПВ из каталога для крановых двигателей находим двигатель номинальной мощности. Если найденное ПВ не соответствует стандартному необходимо сделать перерасчет $P_{\text{экз}}$ на стандартное ПВ:

$$P_{\text{экз}2} = P_{\text{экз}1} \sqrt{\frac{\text{ПВ}1}{\text{ПВ}2}}, \quad (13.9)$$

где ПВ1 — заданное ПВ; ПВ2 — стандартное ПВ; $P_{\text{экп}}$ — найденное по формуле 13.7. значение $P_{\text{экп}}$.

13.3. Аппаратура ручного управления

1. Рубильники.

Рубильники служат для включения и отключения однофазных и трехфазных потребителей электрической энергии в цепях переменного и постоянного токов (рис. 13.7). В большинстве случаев рубильники применяются на напряжение до 500 В и на ток до 1000 А.

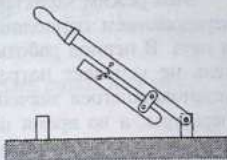


Рис. 13.7. Рубильник.

2. Кнопки.

Кнопки применяются для подключения, отключения и переключения потребителей электроэнергии (рис. 13.8). При нажатии кнопки, включающей потребителя, ее контакты замыкаются. При нажатии отключающей кнопки ее контакты размыкаются. Переключающая кнопка имеет и размыкающие и замыкающие контакты.

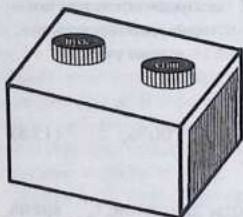


Рис. 13.8. Кнопка.

3. Пакетные выключатели и переключатели.

Они служат для включения и переключения потребителей электроэнергии одновременно в нескольких электрических цепях (рис. 13.9). Состоят они из подвижных и неподвижных контактов. Неподвижные контакты закреплены на выполненных из изоляционного материала кольцах (пакетах). Подвижные контакты укреплены на четырехугольной оси. К неподвижным контактам подключаются провода от сети, а к подвижным — потребители электроэнергии.

Подвижные контакты, попарно замыкаясь охватывают сверху и снизу неподвижные контакты.

4. Пусковые реостаты.

Назначение и схемы подключения пусковых реостатов были рассмотрены выше. Все реостаты состоят из стандарт-

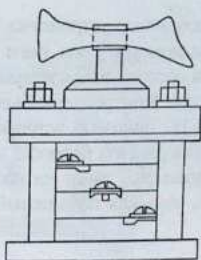
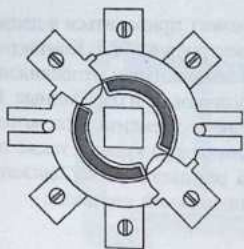


Рис. 13.9. Пакетный выключатель.

ных элементов, представляющих собой сопротивления, выполненные на изоляционной основе. Материалом для проволоки реостатов служат константан, манганин, нихром, фехраль и сталь. Один из элементов реостата показан на рис. 13.10. Основой для намотки проволоки в них служат фарфоровые полуцилиндры, закрепленные на стальной пластинке.

5. Контроллеры.

Контроллеры — это аппараты, служащие для переключения двигателей включения и отключения пусковых реостатов, изменения направления вращения двигателей. Контроллер — многоступенчатое, контактное

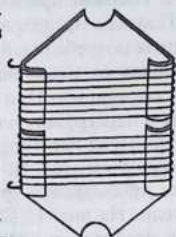


Рис. 13.10. Элемент реостата.

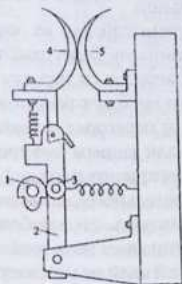


Рис. 13.11. Устройство одного элемента кулачкового контроллера: 1-кулачок; 2-рычаг; 3-колечко; 4-подвижный контакт; 5-неподвижный контакт.

переключающее устройство. Оно может приводиться в движение при помощи руки, ноги или электродвигателя. Контактная система состоит из нескольких пар подвижных и неподвижных контактов. Контроллеры бывают кулачковые и барабанные. На рис. 13.11. показано устройство одного элемента кулачкового контроллера. При повороте оси контроллера кулачок также поворачивается и давит на колесо. В результате рычаг движется вправо, замыкая подвижный и неподвижной контакты.

13.4. Аппаратура защиты

1. Плавкие предохранители.

Плавкие предохранители служат для защиты потребителей электроэнергии и проводов от токов перегрузок и коротких замыканий. При коротких замыканиях и перегрузках плавкая вставка предохранителя перегорает и цепь потребителя разрывается. По устройству различают пробковые и трубчатые предохранители. На рис. 13.12 показано устройство пробкового предохранителя.

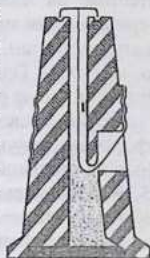


Рис. 13.12. Пробковый предохранитель:
1—плавкая вставка.

Электрические двигатели в момент пуска кратковременно потребляют большой ток. С переходом в нормальный режим ток становится равным номинальной величине. Поэтому обычные предохранители для их защиты непригодны. Причина: если предохранитель будет рассчитан на пусковой ток, то он не защитит двигатель от перегрузок в нормальном режиме: если предохранитель будет рассчитан на номинальный ток, то в момент пуска он перегорит и двигатель невозможно будет запустить. Поэтому для защиты электродвигателей применяются инерционные предохранители (рис. 13.13). При токах перегрузки тепло от нагревательного элемента передается к легкоплавкому спаю. Расплавляясь, он освобождает деталь, которая перемещается влево и разрывает цепь тока. При токах короткого замыкания легкоплавкий спай не успевает расплавиться, так как плавкая вставка перегорает быстрее.

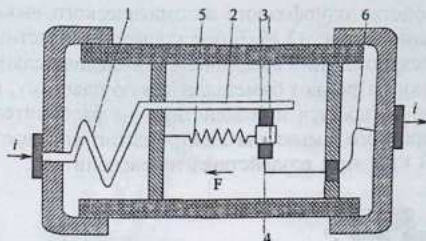


Рис. 13.13. Инерционный предохранитель: 1-нагревательный элемент; 2-пластина; 3-легкоплавкий спай; 4-деталь; 5-пружина; 6-плавкая вставка.

2. Автоматические выключатели.

Автоматические выключатели выполняют функции рубильников и предохранителей. Они включаются от руки и обеспечивают защиту электрических цепей от перегрузок и коротких замыканий. Они могут также разрывать цепь при понижении напряжения до определенного минимального значения (при наличии катушки минимального расцепителя). Рассмотрим принцип работы однополюсного автомата максимального тока (рис. 13.14). При максимальном токе электромагнит притягивает к себе якорь, который освобождает крючок. Под действием пружины размыкаются контакты.

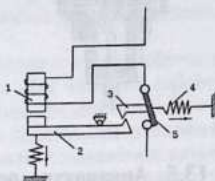


Рис. 13.14. Схема однополюсного воздушного автомата: 1-электромагнит; 2-якорь; 3-крючок; 4-пружина; 5-контакт.

В настоящее время для защиты потребителей и сети применяются различные автоматические выключатели. В них установлены биметаллическая пластина или электромагнит, либо оба вместе. При токах перегрузки биметаллическая пластина изгибается и отключает автомат, действуя на расцепитель. При токах короткого замыкания электромагнит приводит в движение якорь, который воздействует на расцепитель и автомат отключается.

Устройство однофазного автоматического выключателя показано на рис. 13.15. Биметаллическая пластина и обмотка электромагнита соединяются последовательно. Токи перегрузки нагревают биметаллическую пластину, которая при этом изгибается и воздействует на расцепитель. При токах короткого замыкания электромагнит втягивает якорь, который при этом воздействует на расцепитель.

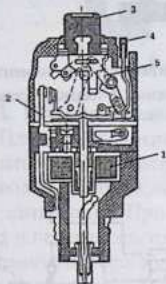


Рис. 13.15. Однофазный автоматический выключатель: 1-электромагнит; 2-биметаллическая пластина; 3-кнопка отключения; 4-кнопка включения; 5-расцепитель.

13.5. Аппаратура релейно-контакторного управления

1. Реле и контакторы.

Реле применяется для коммутации электрических цепей с током до 5 ампер, контакторы — от 5 до 4000 ампер. Устройство и принцип работы реле рассмотрены ранее в параграфе 11.3. Схема, поясняющая устройство и принцип работы контактора, приведена на рис 13.16.

При нажатии кнопки П (пуск) через обмотку контактора проходит ток, который создает магнитный поток в сердечнике контактора. В результате якорь, преодолев силу возвратной пружины, притягивается к сердечнику и замыкает главные контакты, через которые подается ток на двигатель Д. Одновременно замыкаются вспомогательные контакты, через которые подается ток на обмотку контактора, что дает возможность отпустить кнопку П (пуск). При нажатии кнопки С (стоп) катушка обесточивается, и якорь под воздействием возвратной пружины размыкает главные

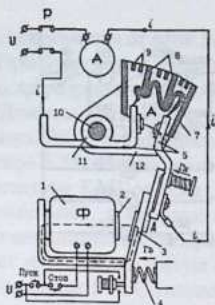


Рис. 13.16. Схема, поясняющая принцип действия контактора: 1-катушка; 2-сердечник; 3-якорь; 4-возвратная пружина; 5-главные контакты; 6-вспомогательные контакты; 7-дугогасящая камера; 8-изоляционные перегородки; 9-металлические пластины; 10-стальной сердечник; 11-катушка; 12-пластины-полюса.

контакты. При размыкании главных контактов между ними образуется дуга, которая гасится в дугогасящей камере. Изоляционные перегородки камеры растягивают дугу, а металлические пластины рассеивают образовавшиеся при этом ионизированные газы.

Быстрый выход дуги с контактов в камеру обеспечивается системой магнитного дутья. Для этого на сердечнике расположена катушка, соединенная последовательно с главными контактами, а по бокам сердечника расположены пластины-полюса. Магнитное поле, создаваемое катушкой при помощи полюсов, подводится к зоне горения дуги в камере. При взаимодействии магнитного поля катушки и тока дуги появляются силы, которые загоняют дугу в камеру.

Устройства, управляющие работой короткозамкнутых асинхронных двигателей называются магнитными пускателями. Магнитные пускатели состоят из трехполюсных контакторов, токовых реле, служащих для защиты двигателя при превышении тока.

В настоящее время широко применяются магнитные пускатели типа ПМЕ, ПМА, АП, ПВИ.

13.6. Схемы управления электродвигателями

1. Управление асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.

Схема реверсивного управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором приведена на рис. 13.17. В

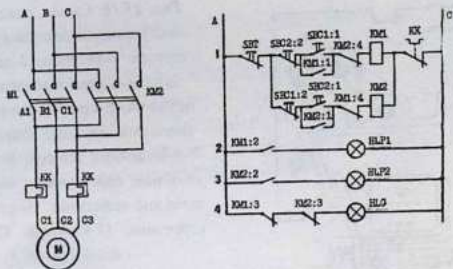


Рис. 13.17. Реверсивная схема управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.

схему входят двигатель (М), контакторы (KM1, KM2), кнопки (SBC1, SBC2, SBT), лампы (HLR1, HLR2), тепловое реле (KK).

Для вращения двигателя в одном направлении нажимается кнопка SBC1. При этом кнопка замыкает свои контакты SBC1:1, подключенные в цепь обмотки контактора KM1, размыкает контакты SBC1:2, подключенные в цепь обмотки контактора KM2. Контактор KM1 срабатывает и выполняет следующие функции:

1. Замыкает силовые контакты KM1, через которые на двигатель подается трехфазный ток. При этом двигатель начинает работать.

2. Замыкает вспомогательные контакты KM1:1, через которые поступает ток на обмотку контактора KM1. Это позволяет отпустить кнопку SBC1.

3. Размыкает контакты KM1:4, отключающие цепь обмотки контактора KM2 при работе контактора KM1.

4. Замыкает контакты KM1:2, включающие лампу HLR1, которая сигнализирует о том, что двигатель включен в сеть.

5. Размыкает контакты KM1:3, отключающие лампу HLG, которая загорается, когда двигатель не включен в сеть. Для останова двигателя надо нажать кнопку SBT, которая размыкает цепь обмотки контакторов KM1 и KM2. При этом размыкаются силовые контакты KM1, и двига-

тель отключается от сети. В результате двигатель останавливается. При перегрузках токовое реле КК разрывает свои контакты и также разрывает цепь обмоток контакторов КМ1 и КМ2.

Для вращения двигателя в другую сторону нажимается кнопка SBC2. Его контакты SBC2:1 подключают обмотку контактора КМ2 к сети, а контакты SBC2:2 отключают обмотку контактора КМ1 от сети. При этом силовые контакты КМ1 размыкаются, а силовые контакты КМ2 замыкаются, подключая двигатель к трехфазной сети. Однако теперь двигатель будет вращаться в другую сторону. Причиной этого является то, что фазы В и С меняются местами, что приводит к изменению направления вращения магнитного поля двигателя.

Вспомогательные контакты КМ2:1, КМ2:2, КМ2:3, КМ2:4 контактора КМ2 выполняют такие же функции, что и вспомогательные контакты контактора КМ1 (см. п. 1–5).

2. Управление асинхронным двигателем с фазным ротором (рис. 13.18).

Схема состоит из двигателя М, кнопок SB1, SB2, реле времени КТ1, КТ2, КТ3, контакторов КМ2, КМ3, КМ4, магнитного пускателя КМ1, теплового реле КК.

Все реле времени с подачей тока срабатывают без выдержки времени, в при обесточивании их контакты возвращаются с выдержкой. При включении выключателя S

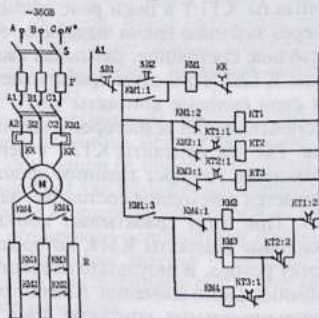


Рис. 13.18. Схема управления асинхронным двигателем с фазным ротором.

ток от фазы А, контакты КМ1:2 и реле времени КТ1 поступает на нейтральный провод N. При этом срабатывает тепловое реле КТ1, замыкает свои контакты КТ1:1 и размыкает КТ1:2. После этого срабатывает реле КТ2, замыкает свои контакты КТ2:1 и размыкает КТ2:2. Теперь срабатывает реле КТ3 и замыкает свои контакты КТ3:1. Таким образом, цепь управления готова к запуску двигателя.

Для запуска двигателя нажимается кнопка SB2. Ток от фазы А через контакты SB2, обмотку магнитного пускателя КМ1, контакты теплового реле КК проходит на нейтральный провод N. При этом срабатывает магнитный пускатель и: 1) замыкает свои силовые контакты КМ1, через которые трехфазный ток подается на двигатель и он начинает вращаться; 2) замыкает дополнительные контакты КМ1:3 для подготовки к работе контакторов КМ2, КМ3 и КМ4; 3) замыкает дополнительные контакты КМ1:1, блокируя кнопку, что позволяет отпустить её; 4) размыкает свои контакты КМ1:2, размыкая цепь реле времени КТ1. Через заданное время выдержки КТ1 возвращается в исходное состояние, размыкая свои контакты КТ1:1 и замыкая КТ1:2. В результате этого срабатывает контактор КМ2, замыкая свои силовые контакты КМ2. Это ведет к уменьшению сопротивления резисторов, подключенных к обмотке ротора. В результате скорость двигателя возрастает.

Так как контакты КТ1:1 в цепи реле времени КТ2 разомкнуты, то через заданное время выдержки это реле возвращается в исходное состояние, размыкая свои контакты КТ2:1 и замыкая КТ2:2. При этом срабатывает контактор КМ3, замыкая свои силовые контакты КМ3. Это ведет к уменьшению сопротивления резисторов с увеличению скорости двигателя. Так как контакты КТ2:1 в цепи реле времени КТ3 разомкнуты, то через заданное время выдержки это реле возвращается в исходное состояние, замыкая свои контакты КТ3:1. При этом срабатывает контактор КМ4, замыкая свои силовые контакты КМ4, которые накоротко замыкают обмотку ротора. В результате скорость двигателя возрастает до номинального значения. Контактор КМ4 размыкает свои дополнительные контакты КМ4:1, которые разрывают цепь контакторов КМ2 и КМ3.

ГЛАВА 14

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ

14.1. Электронная эмиссия. Катоды

В электронных лампах электрический ток создается за счет свободных электронов. С появлением полупроводниковых приборов применение электронных ламп стало ограниченным.

Во всех электронных лампах источником свободных электронов является катод. Явление выхода электронов из катода называется электронной эмиссией. Существуют следующие виды электронных эмиссий:

1. *Термоэлектронная эмиссия* — это явление выхода электронов из нагретого металла (катода). В нагретом катоде скорость движения электронов увеличивается. При этом растет количество электронов, выходящих из катода. При отсутствии внешнего электрического поля эти электроны собираются около катода, так как их притягивают образовавшиеся положительные ионы катода. Часть электронов возвращается на катод. Когда количество электронов, выходящих из катода, станет равным количеству возвращающихся на катод электронов, наступает динамическое равновесие (рис. 14.1 в).

2. *Вторичная электронная эмиссия* — это явление выхода электронов из катода при ударе об него быстрых первичных электронов (и ионов). Под воздействием удара из катода вылетают так называемые вторичные электроны. Явление выхода вторичных электронов из катода при бомбардировке его ионами используется в ионных приборах.

3. *Фотоэлектронная эмиссия* — явление выхода электронов из катода под действием света. Это явление используется в фотоэлементах.

4. *Электростатическая эмиссия* — это явление выхода электронов из катода под действием сильного электричес-

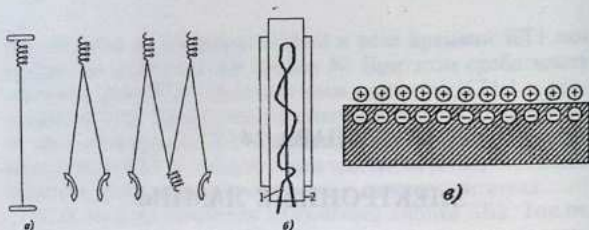


Рис. 14.1. Катоды электронных ламп: а) катоды непосредственного нагрева; б) катоды косвенного нагрева; в) электронный процесс на поверхности катода при его нагреве: 1-нить накала; 2-катод.

кого поля. Катоды бывают непосредственного и косвенного нагрева. Катод непосредственного нагрева (рис. 14.1а) выполняется из проволоки тугоплавкого металла. Нить катода нагревается током (обычно постоянным). Они нагреваются быстро и уже через 2-3 с. начинают излучать электроны. Их нельзя нагревать, пропуская переменный ток, так как в этом случае анодный ток начнет изменяться в соответствии с частотой этого тока. Катоды косвенного подогрева (рис. 14.б) изготавливаются в виде металлического цилиндра, на наружную поверхность которого наносится активированный (обычно оксидный) слой. Этот слой уменьшает работу (температуру) выхода электронов. Например, оксидный слой уже при температуре 600°C начинает излучать электроны. Ток (обычно переменный) пропускается через нить накала, теплом которого нагревается катод. Так как катоды косвенного подогрева обладают большой инерцией, то их можно подогревать переменным током.

14.2. Двухэлектродная лампа (рис. 14.2)

Двухэлектродная лампа-диод состоит из анода и катода, размещенных в металлическом или стеклянном баллоне, из которого выкачан воздух. Для изучения принципа работы диода воспользуемся схемой на рис. 14.2 в. Подав анодное напряжение между анодом и катодом полюсом к аноду и минусом к катоду, создадим электрическое поле между

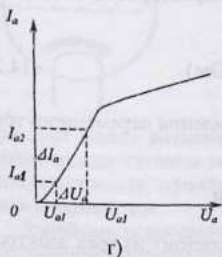
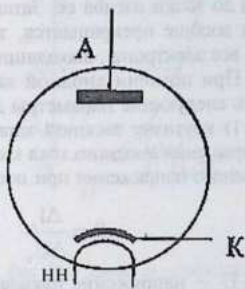
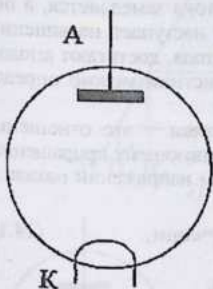
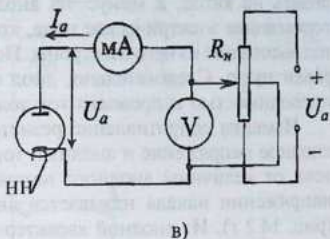
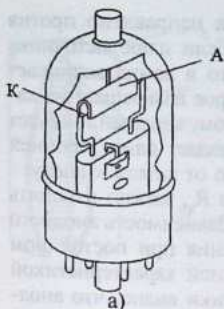


Рис. 14.2. Двухэлектродная лампа (диод): а) устройство; б) условное обозначение; в) схема получения вольт-амперной характеристики; г) вольт-амперная характеристика: А-анод; К-катод.

электродами. По действию этого поля электроны ускоряют свое движение к аноду и создают анодный ток I_a . Движение

этого тока подобно току проводника направлено против направления движения электронов. Если плюс источника подать на катод, а минус — на анод, то в лампе возникает тормозящее электрическое поле, которое возвращает на катод вышедшие из него электроны. Поэтому анодный ток будет равен нулю. Следовательно, диод обладает односторонней проводимостью и проводит ток только от катода к аноду.

Изменяя сопротивление резистора R_s , можно изменять анодное напряжение и анодный ток. Зависимость анодного тока от величины анодного напряжения при постоянном напряжении накала называется анодной характеристикой (рис. 14.2 г). Из анодной характеристики видно, что анодный ток растёт пропорционально росту анодного напряжения до точки изгиба её. Затем рост тока замедляется, а потом вообще прекращается, так как наступает насыщение, т.е. все электроны, выходящие из катода, достигают анода.

При помощи анодной характеристики можно определить следующие параметры диода:

1) крутизну анодной характеристики — это отношение приращения анодного тока к соответствующему приращению анодного напряжения при постоянном напряжении накала

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} \quad \text{при } U_k = \text{const}, \quad (14.1)$$

где U_k — напряжение накала катода.

Величина, обратная анодной характеристики называется внутренним сопротивлением

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{1}{S} \text{ (Ом)}. \quad (14.2)$$

Диоды применяются для выпрямления переменного тока в постоянный.

14.3. Триод

Трёхэлектродная лампа-триод состоит из трёх электродов — анод, катод и управляющая сетка (рис. 14.3 а). Управляющая сетка выполняется из никелевой проволоки в виде спирали вокруг катода. Значит, электроны из катода на анод

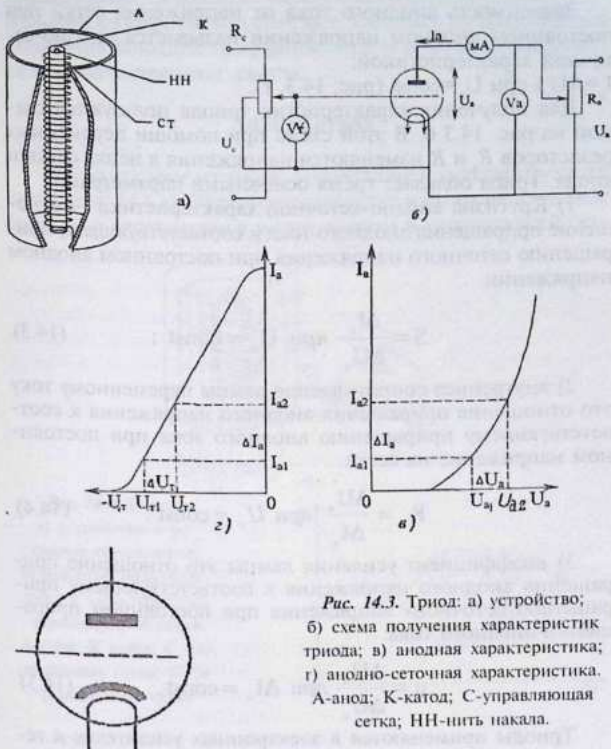


Рис. 14.3. Триод: а) устройство; б) схема получения характеристик триода; в) анодная характеристика; г) анодно-сеточная характеристика. А-анод; К-катод; С-управляющая сетка; НН-нить накала.

проходят между витками сетки. Поэтому, изменяя напряжение между катодом и сеткой, можно изменять количество электронов, пролетающих на анод, т.е. можно изменять анодный ток.

Зависимость анодного тока от анодного напряжения при постоянном напряжении сетки называется анодной характеристикой.

$$I_a = f(U_a) \text{ при } U_c = \text{const (рис. 14.3 в).}$$

Зависимость анодного тока от напряжения сетки при постоянном анодном напряжении называется анодно-сеточной характеристикой:

$I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$ (рис. 14.3. г).

Для получения характеристик триода пользуются схемой на рис. 14.3 б. В этой схеме при помощи переменных резисторов R_a и R_c изменяются напряжения в цепях сетки и анода. Триод обладает тремя основными параметрами:

1) Крутизна анодно-сеточной характеристики — отношение приращения анодного тока к соответствующему приращению сеточного напряжения при постоянном анодном напряжении

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \text{ при } U_a = \text{const}; \quad (14.3)$$

2) внутреннее сопротивление лампы переменному току это отношение приращения анодного напряжения к соответствующему приращению анодного тока при постоянном напряжении на сетке

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \text{ при } U_c = \text{const}; \quad (14.4)$$

3) коэффициент усиления лампы это отношение приращения анодного напряжения к соответствующему приращению сеточного напряжения при постоянном приращении анодного тока:

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} \text{ при } \Delta I_a = \text{const}. \quad (14.5)$$

Триоды применяются в электронных усилителях и генераторах. Способность триода усиливать сигналы можно объяснить следующим образом. Анодный ток лампы зависит от анодного и сеточного напряжений. Сетка ослабляет действие анода. Насколько толстой будет сетка, настолько будет сильнее ее воздействие. Одни и те же изменения анодного тока можно достичь как большими изменениями анодного напряжения, так и небольшими изменениями напряжения сетки. Поэтому в электронных усилителях, подавая небольшой входной сигнал в цепь сетки, управляют большим выходным сигналом (анодным током). Недостатками

триода являются большие междуэлектродные емкости и небольшой коэффициент усиления. Поэтому на практике для получения больших коэффициентов усиления применяются многоэлектродные лампы.

14.4. Тетрод

Тетрод состоит из анода, управляющей и экранирующей сеток (рис. 14.4 а). Экранирующая сетка изготавливается в виде спирали и располагается между анодом и управляющей сеткой.

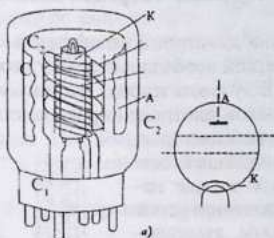
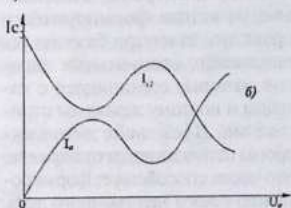


Рис. 14.4. Тетрод:

- а) устройство и условное обозначение;
 б) анодная характеристика и характеристика экранирующей сетки.
 А-анод; К-катод; C_1 -управляющая сетка; C_2 -экранирующая сетка.



кой. Экранирующая сетка уменьшает междуэлектродные емкости и увеличивает коэффициент усиления. На экранирующую сетку подается положительное напряжение, примерно $0,5 U_a$. Под воздействием положительных потенциалов анода и экранирующей сетки электроны с большой силой ударяются об анод и выбивают из него вторичные электроны. Так как скорость вторичных электронов небольшая, они притягиваются электродом (анодом или экранирующей сеткой) с большим положительным потенциалом. При работе лампы

анодное напряжение может изменяться в соответствии с изменением входного сигнала и в отдельные моменты может стать меньше напряжения экранирующей сетки. В эти моменты вторичные электроны притягиваются экранирующей сеткой. Это ведет к резкому увеличению тока экранирующей сетки и уменьшению анодного тока. Данное явление носит название *динатронного эффекта* (рис. 14.4 б). Динатронный эффект искажает форму усиливаемых сигналов. Поэтому тетроды в качестве усилительных ламп не применяются.

14.5. Лучевые тетроды. Пентоды

Для устранения динатронного эффекта между анодом и экранирующей сеткой необходимо создать тормозящее электрическое поле. В лучевом тетроде это явление устраняется при помощи большой плотности пространственного заряда.

Лучевой тетрод состоит (рис. 14.5) из 1) экранирующей сетки, имеющей такой же шаг намотки, что и управляющая сетка. Поэтому электроны, вылетающие из катода формируются в узкий луч; 2) внутри баллона установленных специальных экранов, которые соединяются с катодом и поэтому заряжены отрицательно. В результате этого электроны отталкиваются от экранов, что также способствует формированию узкого электронного луча. Этот луч из-за большой плотности зарядов в нем создает в пространстве эффект неподвижного

отрицательного объемного заряда, который отталкивает назад на анод вторичные электроны. Тем самым устраняется динатронный эффект. Однако, при малых токах в лучевом тетроде также возникает динатронный эффект. Поэтому лучевые тетроды применяются в качестве усилительных ламп большой мощности (например, 6П36С, 6П45С).

Для устранения динатронного эффекта в пентодах между анодом и экранирующей сеткой устанавливается защитная сет-

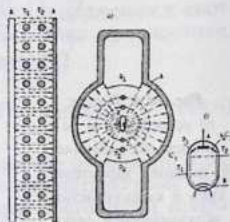


Рис. 14.5. Лучевой тетрод:

а) устройство; б) условное обозначение. А-анод; Э-экран; C_1 -управляющая сетка; C_2 -экранирующая сетка; К-катод.

ка, которая соединяется с катодом и имеет относительно большой шаг намотки. Так как сетка заряжена отрицательно, то она будет отталкивать назад на анод вторичные электроны. Защитная сетка улучшает характеристики лампы. Пентоды имеют большой коэффициент усиления, достигающий нескольких тысяч. Поэтому они широко применяются в высокочастотных усилителях.

В радиоаппаратуре широко применяются комбинированные и многосеточные лампы. В баллонах таких ламп располагаются по несколько комплектов рассмотренных выше ламп. Поэтому они имеют двойные названия. Например, двойной диод-триод, двойной диод-пентод и т.д. Часто они имеют один катод.

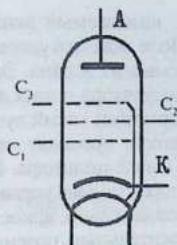


Рис. 14.6. Пентод: А-анод; К-катод; C_1 -управляющая сетка; C_2 -экранирующая сетка; C_3 -защитная сетка.

14.6. Электронно-лучевые трубки

Электронно-лучевыми трубками называют электровакуумные приборы, в которых используется поток электронов в виде луча или пучка лучей. По принципу фокусирования и отклонения различают электростатические и электромагнитные трубки. В электростатических трубках для фокусирования и отклонения луча используется электрическое поле, а в электромагнитных — магнитное поле. Электронно-лучевая трубка с электрическим отклонением состоит из колбы, электронной пушки системы отклонения и экрана (рис. 14.7). На части стенки колбы изнутри нанесен графитовый

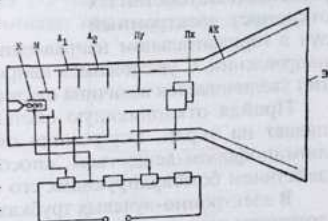


Рис. 14.7. Электростатическая электронно-лучевая трубка: К-катод; М-модулятор; A_1 -первый анод; A_2 -второй анод; АК-аквадаг; Э-экран; P_1 , P_2 -отклоняющие пластины.

слой, называемый аквадагом, который заряжен положительно. Поле аквадага увлекает за собой вторичные электроны, выбиваемые из экрана. Электронная пушка, состоящая из катода, модулятора и двух анодов (A_1 и A_2), из электронного потока формирует узкий луч. Электроны, вышедшие из подогретого катода, проходят через отверстие модулятора, выполненного в виде цилиндра. Изменяя отрицательный потенциал модулятора, можно управлять плотностью электронного потока, а, следовательно, яркостью экрана. Первый анод, находясь под положительным потенциалом в несколько сотен вольт, ускоряет движущийся от катода поток электронов. Вто-

рой анод, находящийся под положительным потенциалом несколько тысяч вольт, еще больше ускоряет поток электронов и формирует узкий электронный луч. Выйдя из поля второго анода, электронный луч попадает в отклоняющую систему, состоящую из двух пар пластин P_x и P_y . Электрическое поле пластин P_x отклоняет электронный

луч в горизонтальном направлении, а P_y — в вертикальном направлении. С увеличением напряжения отклоняющих пластин увеличивается величина отклонения электронного луча.

Пройдя отклоняющую систему, электронный луч попадает на экран, внутренняя сторона которого покрыта люминофором-веществом, способным светиться под воздействием бомбардирующих его электронов.

В электронно-лучевых трубках с электромагнитным отклонением роль второго анода выполняет аквадаг. Оба анода служат для ускорения электронного потока. В отклоняющей системе вместо пластин применяются катушки (рис. 14.8.), которые установлены у горловины колбы. Иногда устанавливается также фокусирующая катушка, которая служит для дополнительной фокусировки электронного потока.

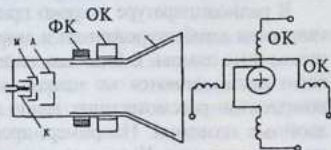


Рис. 14.8. Электронно-лучевая трубка с электромагнитным отклонением:

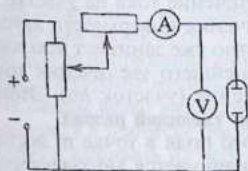
К-катод; М-модулятор; А-анод (первый); ФК-фокусирующая катушка; ОК-отклоняющая катушка; АК-аквадаг (второй анод).

ГЛАВА 15

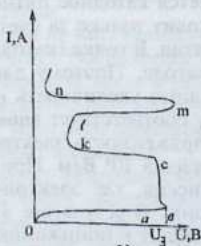
ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ

15.1. Виды газового разряда

Процесс прохождения тока через газовую среду называется газовым разрядом. Несамостоятельным газовым разрядом называется возникновение заряженных частиц под воздействием света или нагревания катода. Если разряд возникает только под воздействием напряжения, приложенного между электродами, то он называется самостоятельным газовым разрядом. Вольт-амперная характеристика газового разряда показана на рис. 15.1. При увеличении напряжения между анодом и катодом до значения U_3 ток в цепи прибора будет небольшим, так как он в это время создается только за счет электронов, вышедших из катода (рис. 15.1. часть Oa кривой). Когда напряжение станет равным напряжению зажигания U_3 ток резко возрастает, так как (точка a) атомы газа начинают ионизироваться, от них



а)



б)

Рис. 15.1. Вольт-амперная характеристика газового разряда и схема её получения: а) схема получения газового разряда; б) вольт-амперная характеристика газового разряда.

отделяются один или несколько электронов, а сам атом превращается в положительный ион. Отделившиеся электроны увеличивают ток в газе. Некоторые электроны соединяются с нейтральными атомами, что приводит к образованию отрицательных ионов. Одновременно с ионизацией идет процесс образования нейтральных атомов, называемый рекомбинацией. При увеличении тока напряжение немного падает (рис. 15.1 б, часть а в с кривой). Это объясняется тем, что при увеличении тока возрастает падение напряжения на внутреннем сопротивлении прибора. Электроны из катода и отрицательные ионы двигаются к аноду, положительные ионы — к катоду. Положительные ионы, ударяясь об катод, нагревают его и выбивают из него вторичные электроны, которые, двигаясь к аноду, ионизируют газ. Поэтому ток в анодной цепи резко возрастает.

Часть Оав кривой разряда соответствует **темновому разряду**, который можно определить лишь по показаниям приборов.

Части СК кривой разряда соответствует **тлеющему разряду**. При этом напряженность над поверхностью катода сильно увеличивается. Электроны, обладая большой энергией, интенсивно ионизируют газ. Одновременно усиливается процесс рекомбинации, и лампа начинает светиться.

Структура поверхности катода всегда будет различной. Поэтому ионизация над поверхностью катода на различных участках будет различной. На участках, где усиливается ионизация, будет увеличиваться температура, и над ними появляется катодное пятно. Увеличение тока на участке kI происходит только за счет увеличения поверхности катодного пятна. В точке / катодное пятно уже занимает всю площадь катода. Поэтому для дальнейшего увеличения тока необходимо увеличивать напряжение (участок Im). Этому участку соответствует **аномальный тлеющий разряд**.

Напряженность электрического поля в точке m достигает порядка 10^8 В/м. При этом начинается автоэлектронная эмиссия, т.е. электрическое поле вырывает из анода электроны. В результате этого появляется **дуговой разряд**, что приводит к понижению напряжения (участок mn). Из-за большого тока появляется светлое катодное пятно.

Кроме вышеуказанных разрядов бывают *коронный* и *искровой* разряды. Коронный разряд возникает на поверхности проводов тонкого диаметра и на заостренных частях

проводов, так как в этих условиях легко достичь больших напряженностей электрического поля. Для получения искрового разряда необходимо увеличивать напряжение между двумя электродами до величины пробивного напряжения. Искровой разряд усиливает движение воздуха между электродами и резко увеличивает давление. Поэтому при разряде появляется свойственный ему характерный шум.

15.2. Газотрон

Газотрон — это двухэлектродный газоразрядный прибор, выполненный в виде стеклянного баллона, заполненного инертным газом или парами ртути. Катоды могут быть подогревными (в газотронах большой мощности) и прямого накала. Анод выполняется в виде диска из металла или графита. В мощных газотронах анод выполняется в виде чаши, накрывающей катод. Для уменьшения работы выхода электронов поверхность катода покрывается барием или цезием (рис. 15.2). При нормальном напряжении накала и постепенном увеличении напряжения анода ток в анодной цепи будет очень мал, так как в этот момент он обеспечивается только за счет электронов, вышедших из катода.

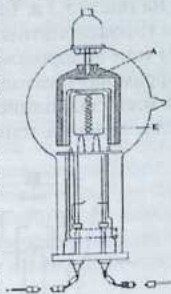


Рис. 15.2. Газотрон.

Из-за малой скорости эти электроны не могут ионизировать газ. Когда напряжение анода достигнет напряжения зажигания, электроны начинают ионизировать газ и в результате ток лампы резко возрастает. Положительные ионы, образовавшиеся в процессе ионизации, начинают бомбардировать катод и выбивать из него вторичные электроны.

Однако, резкий рост тока может разрушить активный слой катода. Для недопущения этого последовательно с лампой соединяется ограничительное сопротивление.

Газотрон обладает односторонней проводимостью и поэтому он применяется для выпрямления переменного тока в постоянный. Достоинством газотрона перед диодами и кенотронами является меньшее падение напряжения

в нем (не более 10 вольт) и очень маленький обратный ток. Поэтому газотроны широко применяются в высоковольтных выпрямителях. Недостатком газотронов является необходимость разогрева катода перед работой.

15.3. Тиратрон (рис. 15.3)

Тиратрон — это трехэлектродный газоразрядный прибор, широко применяющийся в устройствах автоматики. Существуют тиратроны с накаливаемым катодом (несамостоятельный дуговой разряд) и холодным катодом (тлеющий разряд). Устройство тиратрона с накаливаемым катодом показано на рис. 15.3 а. Баллон тиратрона заполняется инертным газом (низковольтные приборы), парами ртути (высоковольтные) или водородом (импульсные приборы). Поверхность вольфрамового катода покрывается барием или цезием. Анод чаще всего выполняется из никеля, сетка — в виде диска из никеля, графита или молибдена с отверстиями.

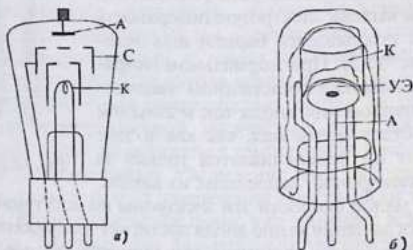


Рис. 15.3. Тиратрон: а) тиратрон с накаливаемым катодом: А-анод, К-катод, С-сетка; б) общий вид тиратрона с холодным катодом: А-анод, К-катод, УЭ-управляющий электрод.

При подаче на анод положительного по отношению к катоду потенциала, на сетку — большого отрицательного потенциала электрическое поле сетки будет препятствовать движению электронов к аноду. При уменьшении отрицательного потенциала сетки количество электронов, достигающих анода, увеличивается, что ведет к увеличению

анодного тока. Эти электроны на своём пути начинают ионизировать атомы газа, в результате чего образуются новые электроны и положительные ионы. В результате происходит лавинообразное нарастание анодного тока и тиратрон зажигается. Возникает дуговой разряд, ток которого можно уменьшить при помощи ограничительного сопротивления. В дальнейшем сетка теряет свое управляющее воздействие. Причиной этого является то, что положительные ионы соединяются с отрицательными зарядами сетки (электронами) и образует нейтральные атомы. Погасить тиратрон можно снижением напряжения анода или уменьшением анодного тока. Пользуясь этим свойством тиратрона, их применяют в управляемых выпрямителях и устройствах автоматики.

На рис. 15.3 б показано устройство тиратрона с холодным катодом. Катод выполнен в виде полого цилиндра, внутренняя поверхность которой покрыта цезием. Выполненный в виде шайбы управляющий электрод укреплен на торце анода, который выполнен в виде цилиндрической стойки. На анод подается положительное напряжение, величина которой меньше напряжении зажигания, но больше напряжения горения. Если на управляющий электрод подать положительный импульс, то в лампе возникает тлеющий разряд. Чтобы погасить тиратрон необходимо отключить анодное напряжение.

15.4. Стабилитрон (рис. 15.4)

Стабилитрон — это двухэлектродный с холодным катодом прибор тлеющего разряда, служащий для стабилизации напряжения постоянного тока. Внутренняя поверхность катода, выполненного в виде полого цилиндра, покрыта активным слоем. Анод в виде цилиндрической стойки установлен в центре катода. Рабочий режим соответствует прямолинейной части вольтамперной характеристики лампы (рис. 15.4 б). Схема подключения стабилитрона показана на рис. 15.4. в. Последовательно со стабилитроном подключается ограничительное сопротивление. Параллельно стабилитрону подключается нагрузка R_n . Часть входного напряжения падает на ограничительном сопротивлении, а остальная часть на самом стабилитроне ($U_{вх} = U_{огр} + U_{ст.}$). Вход-

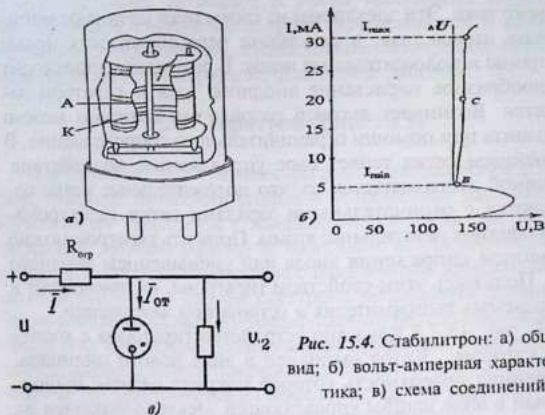


Рис. 15.4. Стабилитрон: а) общий вид; б) вольт-амперная характеристика; в) схема соединений.

ное напряжение не должно быть меньше напряжения зажигания стабилитрона и должно быть больше напряжения стабилизации. При увеличении входного напряжения ток на стабилитроне и ограничительном сопротивлении также увеличивается. На стабилитроне напряжение почти не изменяется. При уменьшении входного напряжения ток в цепи уменьшается, падение напряжения на ограничительном сопротивлении уменьшается, а напряжение стабилитрона не изменяется. Таким образом, напряжение на нагрузке, подключенной параллельно стабилитрону, не изменяется. Стабилитроны выпускаются на напряжение от 70 вольт до 1 кВ и на токи от 5 до 30 мА.

15.5. Неоновая лампа

Неоновая лампа — это тлеющего разряда газоразрядная лампа (рис. 15.5). Лампа представляет собой стеклянный баллончик, заполненный инертным газом. Внутри баллона установлены два металлических электрода. Неоновые лампы применяются как индикаторы наличия напряжения переменного и постоянного тока. В цепи переменного тока

наблюдается попеременное свечение электродов с частотой переменного тока. В цепи постоянного тока свечение происходит только у одного из электродов. Неоновая лампа может светиться также при ее размещении в сильном электрическом поле. Неоновая лампа иногда применяется в генераторах пилообразного напряжения.

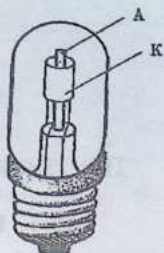


Рис. 15.5. Неоновая лампа.

15.6. Лампа дневного освещения

Лампа представляет собой стеклянную трубку, из которой выкачан воздух. С внутренней стороны трубка покрыта тонким слоем люминофора. Трубка заполняется аргоном или парами ртути. На концах трубки установлены проволоочные электроды (рис.15.6.). В схему лампы входят дроссель ДР, стартер Ст и конденсатор С. Стартер представляет собой маленькую неоновую лампу, один из электродов которой представляет собой биметаллическую пластину.

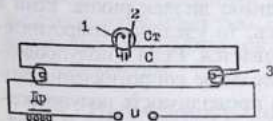


Рис. 15.6. Газосветная лампа (лампа дневного света):

Др-дроссель; Ст-стартер;

1-биметаллическая пластина;

2-электроды стартера;

3-электроды лампы.

При подключении в сеть между электродами возникает разряд. При этом биметаллический электрод быстро нагревается и замыкается с другим электродом. После их замыкания в неоновой лампе разряд прекращается и электроды размыкаются. Во время разряда стартера электроды лампы успевают нагреться, возникает электрический разряд и лампа загорается. Газ внутри лампы начинает светиться частично фиолетовым, но

большой частью ультрафиолетовым светом. Лучи этого света, падая на люминофор, преобразуются в дневной видимый свет. Поэтому они называются лампами дневного света. Они дают равномерный, глазу приятный свет. К тому же они экономичны и по этим причинам широко применяются на предприятиях, в организациях, в жилых помещениях.

ГЛАВА 16

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

16.1. Проводимость полупроводников

По степени электропроводности полупроводниковые материалы занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Разница между процессами возникновения электропроводности в проводниках и полупроводниках очень большая. Например, при нагревании проводников их сопротивление увеличивается, а в полупроводниках уменьшается. При температуре близкой к абсолютному нулю удельное сопротивление проводников уменьшается и они могут перейти в сверхпроводимость, а удельное сопротивление полупроводников увеличивается и приближается к удельному сопротивлению диэлектриков. Если в чистый металл добавить примесь, то удельное сопротивление полученного сплава увеличивается. Если в полупроводник добавить примесь, то его удельное сопротивление резко уменьшается. Кроме того, на проводимость полупроводников влияют внешнее электрическое поле и лучи. В электронике применяются такие полупроводниковые материалы, как германий, кремний, теллур, арсенид галлия.

Проводимость любого вещества обеспечивается движением валентных электронов. Металлы (проводники) обладают высокой электропроводностью, так как у них всегда есть свободные электроны. В полупроводниках все валентные электроны связаны кристаллической решеткой и поэтому не могут принимать участия в создании тока. Например, в четырехвалентном германии каждый атом стремится связаться с четырьмя другими атомами (рис. 16.1). При этом четыре свободных электрона каждого атома создают связи со свободными электронами четырех соседних атомов. Такая связь называется парноэлектронной (ковалентной).

Однако, под действием света, тепла энергия свободных электронов может стать достаточной, чтобы они оторвались от атома. В результате в полупроводнике проявляются беспорядочно движущиеся электроны. Под действием внешнего электрического поля свободные электроны приобретают направленное движение и создают электронную проводимость.

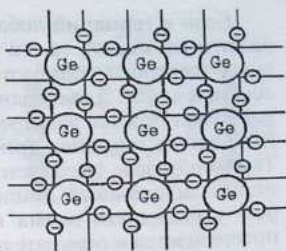


Рис. 16.1. Связи в кристаллической структуре германия.

В атомах, из которых отделились свободные электроны, образуются свободные (вакантные) места, называемые дырками. Дырку может занять другой свободный электрон, отделившийся от соседнего атома. В результате образуется другая дырка, которую может занять другой свободный электрон и т.д. Таким образом, под воздействием внешнего электрического поля дырки двигаются в направлении, противоположном движению электронов. Значит, дырки перемещаются вместе с положительным зарядом. В полупроводниках электропроводность, связанная с движением дырок, называется дырочной проводимостью. Электропроводность чистых, беспримесных полупроводников называется собственной электропроводностью.

16.2. Проводимость примесных полупроводников

Для создания полупроводниковых приборов применяются примесные полупроводники, так как их электропроводность намного больше чем у собственных полупроводников. Например, если в германий добавить пятивалентный мышьяк, то четыре его валентных электрона с четырьмя атомами германия образует ковалентные связи (рис. 16.2 а). Пятый валентный электрон мышьяка, являясь лишним в структуре связей, слабо связан с узлом и под действием тепловых колебаний отрывается от ядра и становится свободным электроном. Примесь мышьяка увеличивает электронную проводимость и называется донорной примесью. Электронная проводимость называется *n*-проводимостью (от первой буквы слова *negatiiv*—отрицательный).

ГЛАВА 16

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

16.1. Проводимость полупроводников

По степени электропроводности полупроводниковые материалы занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Разница между процессами возникновения электропроводности в проводниках и полупроводниках очень большая. Например, при нагревании проводников их сопротивление увеличивается, а в полупроводниках уменьшается. При температуре близкой к абсолютно нулю удельное сопротивление проводников уменьшается и они могут перейти в сверхпроводимость, а удельное сопротивление полупроводников увеличивается и приближается к удельному сопротивлению диэлектриков. Если в чистый металл добавить примесь, то удельное сопротивление полученного сплава увеличивается. Если в полупроводник добавить примесь, то его удельное сопротивление резко уменьшается. Кроме того, на проводимость полупроводников влияют внешнее электрическое поле и лучи. В электронике применяются такие полупроводниковые материалы, как германий, кремний, теллур, арсенид галлия.

Проводимость любого вещества обеспечивается движением валентных электронов. Металлы (проводники) обладают высокой электропроводностью, так как у них всегда есть свободные электроны. В полупроводниках все валентные электроны связаны кристаллической решеткой и поэтому не могут принимать участия в создании тока. Например, в четырехвалентном германии каждый атом стремится связаться с четырьмя другими атомами (рис. 16.1). При этом четыре свободных электрона каждого атома создают связи со свободными электронами четырех соседних атомов. Такая связь называется парноэлектронной (ковалентной).

Однако, под действием света, тепла энергия свободных электронов может стать достаточной, чтобы они оторвались от атома. В результате в полупроводнике проявляются беспорядочно движущиеся электроны. Под действием внешнего электрического поля свободные электроны приобретают направленное движение и создают электронную проводимость. В атомах, из которых отделились свободные электроны, образуются свободные (вакантные) места, называемые дырками. Дырку может занять другой свободный электрон, отделившийся от соседнего атома. В результате образуется другая дырка, которую может занять другой свободный электрон и т.д. Таким образом, под воздействием внешнего электрического поля дырки двигаются в направлении, противоположном движению электронов. Значит, дырки перемещаются вместе с положительным зарядом. В полупроводниках электропроводность, связанная с движением дырок, называется дырочной проводимостью. Электропроводность чистых, беспримесных полупроводников называется собственной электропроводностью.

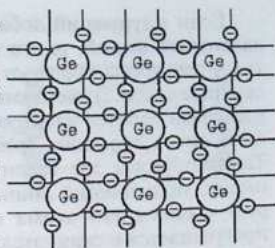


Рис. 16.1. Связи в кристаллической структуре германия.

16.2. Проводимость примесных полупроводников

Для создания полупроводниковых приборов применяются примесные полупроводники, так как их электропроводность намного больше чем у собственных полупроводников. Например, если в германий добавить пятивалентный мышьяк, то четыре его валентных электрона с четырьмя атомами германия образует ковалентные связи (рис. 16.2 а). Пятый валентный электрон мышьяка, являясь лишним в структуре связей, слабо связан с узлом и под действием тепловых колебаний отрывается от ядра и становится свободным электроном. Примесь мышьяка увеличивает электронную проводимость и называется донорной примесью. Электронная проводимость называется *n*-проводимостью (от первой буквы слова *negatiiv*—отрицательный).

Если в германий добавить трехвалентный индий, то его три валентных электрона образуют три ковалентные связи. Для создания четвертой связи берется электрон у соседнего атома германия (рис. 16.2 б). Таким образом, трехвалентный атом индия, получивший лишний электрон у соседнего атома германия, превращается в отрицательный ион. Атом германия, потерявший электрон, превращается в дырку. Таким образом, германий, обогащенный трехвалентным индием, создает дырочную проводимость, называемую р-проводимостью (о первой буквы слова *positive*—положительный). Примесь, создающая дырочную проводимость, называют акцепторной.

Носители зарядов, определяющие электропроводность примесного полупроводника, называются основными носителями зарядов (электроны в *n*-полупроводнике, дырки в *p*-полупроводнике). Носители зарядов противоположных знаков в этих полупроводниках называются неосновными носителями зарядов.

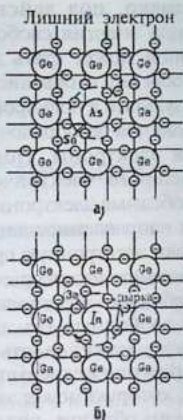


Рис. 16.2. Кристаллическая структура примесного полупроводника: а) с донорной примесью; б) с акцепторной примесью.

16.3. Электронно-дырочный переход

Электронно-дырочный переход (сокращенно *p-n* переход) является основным элементом полупроводниковых приборов. Он образуется при контактном соединении *p* и *n* полупроводников (рис. 16.3).

Электроны из *n*-области переходят в *p*-область и начинают рекомбинировать с дырками этой области. Точно также дырки из *p*-области переходят в *n*-область и начинают рекомбинировать с электронами. Таким образом, в *p-n* переходе кратковременно возникает диффузионный ток (диффузионным током называется движение основных носителей зарядов из мест с большей их концентрацией в места с меньшей концентрацией).

Когда электроны уходят из п-области, там остаются нескомпенсированные положительные заряды донорных примесей. Когда дырки уходят из р-области, там остаются нескомпенсированные отрицательные заряды акцепторных примесей. Таким образом, между р и п областями возникает разность потенциалов, называемая потенциальным барьером. Возникает электрическое поле, направленное от п-области к р-области. Это поле препятствует диффузии основных носителей зарядов. В результате этого диффузионный ток резко уменьшается.

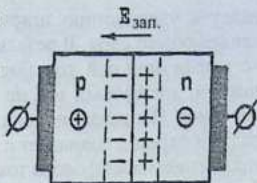


Рис. 16.3. Электронно-дырочный переход.

В п-области наряду с электронами имеются неосновные носители — дырки. Аналогично, в р-области имеются электроны. Под действием электрического поля потенциального барьера неосновные носители двигаются к границе р-п перехода, образуя дрейфовый ток (дрейфовым током называется ток, создаваемый движением неосновных носителей зарядов под действием электрического поля).

При отсутствии внешнего электрического поля диффузионный и дрейфовые токи практически равны и поэтому сумма зарядов, проходящих через р-п переход равна нулю. Таким образом, на границе р-п перехода из-за малого количества носителей зарядов образуется слой, обедненный подвижными носителями, и называется он запирающим слоем.

Подключим источник тока плюсом к п-области, минусом к р-области (рис. 16.4.). В этом случае поля внешнего источника и потенциального барьера складываются. Поэтому количество основных носителей зарядов, способных преодолеть отталкивающее действие результирующего поля уменьшается. Основные носители зарядов будут смещаться в разные стороны от границы р-п перехода. Это

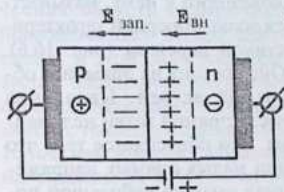


Рис. 16.4. Электронно-дырочный переход при обратном включении.

ведет к увеличению ширины запирающего слоя. В результате диффузионный ток уменьшается, дрейфовый ток не изменяется. Направление тока через р-п переход совпадает с направлением дрейфового тока и будет очень маленьким. Называется этой ток обратным током р-п перехода.

Теперь подключим источник тока плюсом к р-области, а минусом к п-области (рис. 16.5.). В этом случае поле внешнего источника тока будет направлено против поля потенциального барьера и уменьшит его. Диффузия основных зарядов через р-п переход усиливается, что ведет к увеличению диффузионного тока и уменьшению дрейфового тока. Направление результирующего тока будет совпадать с направлением диффузионного тока. Такое подключение называется прямым подключением р-п-перехода, и ток будет называется прямым током. В полупроводниках концентрация основных носителей зарядов на несколько порядков выше, чем концентрация неосновных носителей. Поэтому прямой ток будет больше обратного тока в сотни тысяч раз.

Таким образом, р-п-переход при прямом подключении проводит ток, а при обратном подключении не пропускает ток, т.е. он обладает односторонней проводимостью.

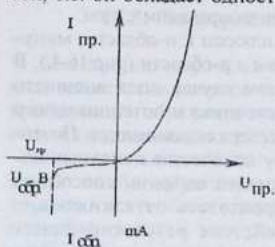


Рис. 16.6. Вольт-амперная характеристика электронно-дырочного перехода.

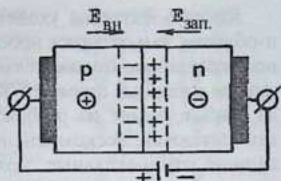


Рис. 16.5. Электронно-дырочный переход при прямом включении.

Зависимость тока р-п-перехода от напряжения, приложенного к нему, называется вольт-амперной характеристикой перехода (рис. 16.6). Она состоит из прямой и обратной ветвей. Начальная часть прямой ветви нелинейна. Это объясняется тем, что при малых прямых напряжениях имеется небольшой потенциальный барьер, ток через переход определяется разностью диффузионного и

дрейфового тока. Но уже при десятых долях вольта сопротивление р-п-перехода исчезает, и прямой ток определяется только активным сопротивлением р и п-областей. Поэтому эта часть прямой ветви имеет линейный характер.

При увеличении обратного напряжения $U_{обр}$ ток через р-п-переход будет небольшим (микроамперы), так как сопротивление перехода очень большое. Когда обратное напряжение превышает некоторое значение $U_{обр.пр}$, называемое пробивным, то обратный ток резко возрастает, так как происходит пробой перехода. Различают электрический и тепловой пробой. Электрический пробой для перехода не опасен и при уменьшении обратного напряжения переход восстанавливает свои свойства. При тепловом пробое переход разрушается от перегрева.

16.4. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковым диодам называют прибор с двумя полупроводниковыми областями разного типа электропроводности и одним р-п-переходом. Они бывают точечные и плоскостные.

На торце стеклянного корпуса точечного диода (рис. 16.7) крепится кристалл германия или кремния площадью 1 мм^2 и толщиной $0,5 \text{ мм}$. К кристаллу приткнута стальная или бронзовая игла, легированная акцепторной примесью.

Для формовки прибора через иглу и кристалл пропускают импульсы большого тока. При этом конец иглы расплавляется и часть акцепторной примеси переходит в кристалл. Вокруг иглы образуется точечная область с дырочной проводимостью. Между кристаллом и этой областью образуется электронно-дырочный переход. Максимальный прямой ток точечного диода равен 16 мА , максимальное обратное напряжение 50 В . Из-за малой площади перехода междуэлектродная емкость будет мала (приблизительно 1 пФ).

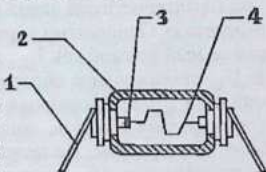


Рис. 16.7. Точечный диод:
1-зажим; 2-стеклянный корпус; 3-полупроводниковый кристалл; 4-пружина.

Плоскостные диоды изготавливаются методом сплавления или диффузии. При методе сплавления в донорный полупроводник при температуре 500°C вплавляется таблетка с акцепторной примесью. При этом между кристаллом и таблеткой создается р-п-переход. При диффузионном методе, например, кристалл с донорной примесью помещается в газовую среду с акцепторной примесью. Молекулы акцепторной примеси внедряются внутрь кристалла и создают область с электропроводимостью, противоположной электропроводности кристалла. Кристалл германия (рис. 16.8) установлен на держателе, к которому приварен нижний электрод. Верхний электрод соединен с индием через внутренний электрод.

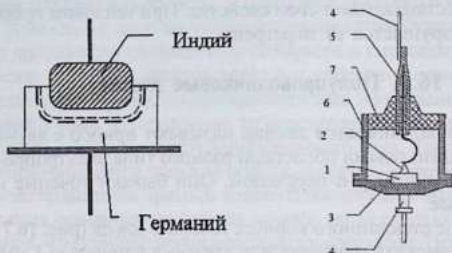


Рис. 16.8. Плоскостный германиевый диод: 1-кристалл германия; 2-кристалл индия; 3-кристаллодержатель; 4-верхний и нижний зажимы; 5-внутренний зажим; 6-металлический корпус; 7-стеклянный изолятор.

Вольт-амперная характеристика диода является основной характеристикой диода и похожа на характеристику р-п-перехода. Основными параметрами диода являются: максимальный прямой ток $I_{пр.м.}$ и падение напряжения на диоде $U_{пр.}$, максимальное обратное напряжение $U_{обр.м.}$ и обратный ток $I_{обр.м.}$, максимальная мощность рассеяния $P_{рас.}$, междueleктродная емкость, допустимая частота, интервал рабочей температуры. По целевому назначению диоды бывают выпрямительные, высокочастотные, импульсные, опорные (стабилитроны) и др.

Выпрямительные диоды служат для выпрямления переменного тока в устройствах электропитания. Они бывают маломощные, не требующие отвода тепла, и мощные, рас-

считанные на работу с теплоотводящими радиаторами или принудительным охлаждением. Маломощные диоды изготавливаются как из кремния, так и из германия. Мощные диоды изготавливаются только из кремния. Кроме одиночных выпрямительных диодов выпускаются также выпрямительные столбы, состоящие из ряда последовательно соединенных диодов для повышения обратного напряжения.

Высокочастотные диоды работают в разнообразных радиоэлектронных устройствах в широком диапазоне частот вплоть до десятков и сотен мегагерц. Это большей частью германиевые точечные диоды. Но выпускаются также германиевые плоскостные с миниатюрными р-п-переходами (микросплавные, меза-диоды и др.) и кремниевые с особо малыми обратными токами. Высокочастотные диоды имеют герметичные стеклянные или металлические корпуса с гибкими выводами.

Импульсные диоды применяются в быстродействующих импульсных и логических устройствах. Основной особенностью этих диодов является то, что при изменении полярности напряжения, резком воздействии перепада напряжения (импульса) время рассасывания зарядов очень маленькое (несколько десятых долей наносекунды). Для ускорения переходных процессов кроме снижения междуэлектродных емкостей применяется легирование полупроводника золотом.

Полупроводниковые стабилитроны — это диоды с резким нарастанием обратного тока в точке пробоя и нормированным значением пробивного напряжения. Поэтому они применяются в схемах для стабилизации постоянного напряжения. В германиевых диодах электрический пробой быстро переходит в тепловой. Поэтому в качестве стабилитронов применяются только кремниевые диоды, которые устойчивы к тепловому пробую. На рис. 16.9 приведена вольт-амперная характеристика кремниевого стабилитрона и схема его подключения. Как видно из характеристики при обратном напряжении, равном пробивному $U_{обр пр}$, происходит электрический пробой перехода. При этом наблюдается резкое возрастание обратного тока при почти неизменном уровне обратного напряжения. В связи с этим в схемах стабилизации стабилитрон подключается в обратном направлении. Параллельно стабилитрону подключается нагрузка R_n , последовательно — ограничительное (бал-

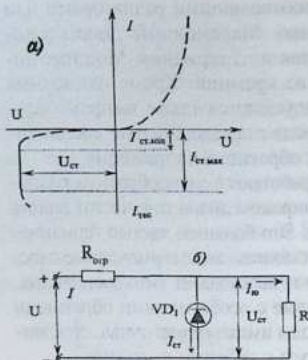


Рис. 16.9. Полупроводниковый стабилизатор: а) вольт-амперная характеристика; б) схема соединений.

ластное) сопротивление $R_{огр}$. Если входное напряжение $U_{вх}$ увеличится, то это приведет к увеличению тока через стабилизатор и $R_{огр}$. Избыток входного напряжения падает на $R_{огр}$, а напряжение на выходе (на нагрузке $R_{н}$), равное $U_{ст}$, не изменяется. Для увеличения напряжения стабилизации можно стабилизаторы соединять последовательно.

Варикап — полупроводниковый диод, применяемый в качестве конденсатора, емкость которого зависит от приложенного к нему обратного напряжения (барьерная емкость). Варикапы широко применяются в схемах автоматической настройки частоты, амплитудной и частотной модуляции, в схемах параметрических усилителей.

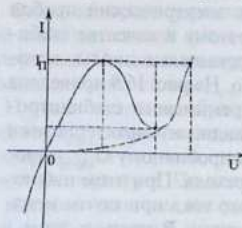


Рис. 16.10. Вольт-амперная характеристика туннельного диода.

Туннельный диод — это полупроводниковый диод с высокой концентрацией примеси с узким р-п-переходом (0,01 мкм), в котором на прямой ветви вольт-амперной характеристики имеется участок с отрицательной дифференциальной проводимостью (рис. 16.10). Туннельные диоды применяются для усиления и генерирования колебаний в широком диапазоне частот и как переключающий элемент.

На рис. 16.11 приведены условные обозначения диодов. Для обозначения диодов применяются буквы и цифры. Первая буква или цифра определяет материал полупроводника: 1 или Г — германий, 2 или К — кремний, 3 или А — арсенид галлия. На втором месте стоит буква, определяющая назначение диода: Д — выпрямительный, А — высокочастотный, В — варикап, С — стабилитрон, И — туннельный, Ф — фотодиод, Ц — выпрямительный столб, Л — светодиод. Третий элемент состоит из трех цифр, показывающих область применения: если 101–199, 201–299 и 301–399, то эти диоды имеют средний выпрямленный ток до 0,3 А, от 0,3 до 10 А, свыше 10 А; если 401–499 — это высокочастотные диоды; 501–599 — импульсные диоды; 601–699 — варикапы. Четвертый элемент — буква, указывающая разновидность диода данного типа.

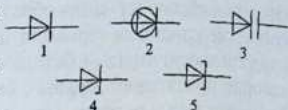


Рис. 16.11. Условные обозначения диодов: 1 — выпрямительный диод; 2 — высокочастотный диод; 3 — варикап; 4 — стабилитрон; 5 — туннельный диод.

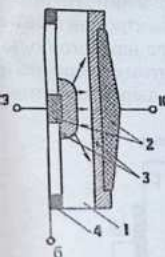


Рис. 16.12. Биполярный р-п-р транзистор: 1 — германиевая пластинка; 2 — таблетки индия; 3 — р-п переходы; э — эмиттер; к — коллектор; б — база.

16.5. Биполярные транзисторы

Биполярным транзистором называется полупроводниковый прибор с тремя полупроводниковыми слоями и двумя р-п-переходами, в котором ток между переходами обусловлен движением неосновных носителей зарядов. Действие биполярного транзистора связано с использованием носителей обоих знаков (электронов и дырок) — откуда и название биполярный. Они бывают германиевые и кремниевые. На рис. 16.12 изображен плоскостной германиевый транзистор. На пластину п-германия с двух сторон вплавлены таблетки индия. При этом образуются две р-области. Между этими областями и ос-

тавшейся частью германия образуются два р-п-перехода. Тонкий слой кристалла германия называется базой. Область, с которой входят заряды в базу называется эмиттером. Область, которая притягивает заряды с базы называется коллектором. Толщина базы делается меньше диффузионной длины не основных носителей (расстояние, которое проходит заряд перед рекомбинацией, называется диффузионной длиной). Если в качестве базы применить п-германий или кремний, эмиттерной и коллекторной области выполнить из донорного материала, то образуется транзистор типа р-п-р.

Если в качестве базы применить р-германий или кремний, эмиттерной и коллекторной области выполнить из донорного материала, то образуется транзистор типа п-р-п. Принцип работы этих транзисторов одинаков, только источник тока подключается к одноименным электродам с разными полюсами.

1. Принцип работы

Принцип работы биполярного транзистора рассмотрим на примере транзистора р-п-р, соединенного по схеме с общей базой (рис. 16.13). При такой схеме включения переход эмиттер-база будет включен в прямом направлении, а переход база-коллектор-в обратном направлении. Начинается переход дырок с эмиттера на базу, а электронов с базы на эмиттер. Концентрация дырок в эмиттере намного больше концентрации электронов в базе. Поэтому встречный поток электронов будет небольшим. Часть дырок соединя-

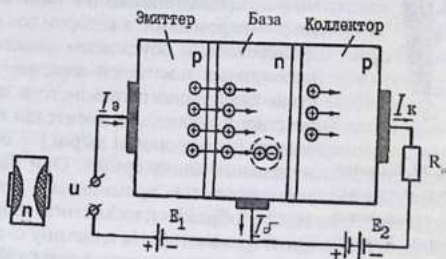


Рис. 16.13. Схема, поясняющая принцип работы биполярного транзистора.

ются с электронами. Уменьшение электронов компенсируется новыми электронами, поступающими на базу из внешней цепи, т.е. возникает ток базы. Большая часть дырок под влиянием электрического поля E_k переходит с базы на коллектор, образуя ток коллектора. Таким образом, для токов транзистора можно написать следующее соотношение.

$$I_3 = I_k + I_6 \text{ или } I_6 = I_3 - I_k. \quad (16.1)$$

При неизменном напряжении коллектора ($U_k = \text{const}$) отношение приращений токов коллектора и эмиттера называется коэффициентом усиления транзистора по току

$$\alpha = K_i = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_3} \text{ при } U_k = \text{const}. \quad (16.2)$$

При соединении транзистора с общей базой коэффициент усиления по току меньше единицы и составляет $\alpha = 0,9 - 0,95$. Изменения тока базы (входного тока) приводит к соответствующим изменениям тока коллектора (выходного тока). Так как эмиттерный переход включен в прямом направлении, а коллекторный — в обратном направлении, то на ток коллектора входное напряжение воздействует сильнее чем выходное.

Зависимость между переменными составляющими токов и напряжений выражается формулой

$$U_{вх} = I_3 \cdot R_{вх} \text{ и } U_{вых} = I_k \cdot R_{н} = \alpha \cdot I_3 \cdot R_{н}. \quad (16.3)$$

Хотя коэффициент усиления по току меньше 1., коэффициенты усиления по напряжению и мощности могут достигать больших значений. Сопротивление эмиттерного перехода переменному току при его прямом включении достигает несколько десятков Ом, а сопротивление коллекторного перехода при обратном включении несколько сот килоОм. Поэтому в выходную цепь транзистора можно подключить нагрузку большого сопротивления ($R_k \gg R_{вх}$). Коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \Delta U_{вых} / \Delta U_{вх} = \Delta I_k \cdot R_{н} / \Delta I_3 \cdot R_{вх} = \alpha \cdot \Delta I_3 \cdot R_{н} / \Delta I_3 \cdot R_{вх} = \alpha \cdot R_{н} / R_{вх} \gg 1. \quad (16.4)$$

Коэффициент усиления по мощности

$$K_p = K_i \cdot K_U = \alpha \cdot \alpha \cdot R_{н} / R_{вх} = \alpha^2 R_{н} / R_{вх} \gg 1. \quad (16.5)$$

2. Статические режимы биполярных транзисторов (рис.16.14).

Обычно один из электродов является входной цепью, другой—выходной цепью транзистора. Третий электрод является общим для входной и выходной цепей. На входную цепь подключается источник входного сигнала, к выходной цепи—нагрузка. В зависимости от того, какой электрод является общим для входной и выходной цепей, различают три схемы включения транзистора: с общей базой ОБ, с общим эмиттером ОЭ и с общим коллектором ОК. Схема с ОБ была изучена выше при изучении принципа работы транзистора. На рис. 16.14, б приведено семейство входных и выходных характеристик транзистора по схеме с ОБ. За-

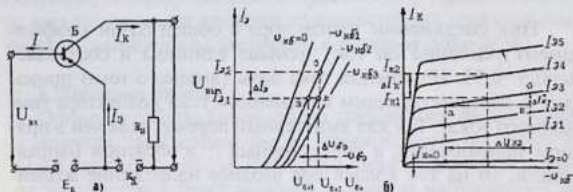


Рис. 16.14. Схема соединения транзистора с общей базой: а) схема соединения; б) входные и выходные характеристики.

висимость тока эмиттера от напряжения эмиттер-база при постоянном напряжении коллектор-база называется входной характеристикой

$$I_{\varepsilon} = f(U_{\varepsilon\delta}) \text{ при } U_{кб} = \text{const.}$$

Зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-база при постоянном токе эмиттера называется выходной характеристикой

$$I_{к} = f(U_{кб}) \text{ при } I_{\varepsilon} = \text{const.}$$

Входные характеристики алогичны прямой ветви вольт-амперной характеристики диода (так как эмиттерный переход включен в прямом направлении). Из выходных характеристик можно сделать вывод, что напряжения коллектор-база слабо влияют на ток коллектора.

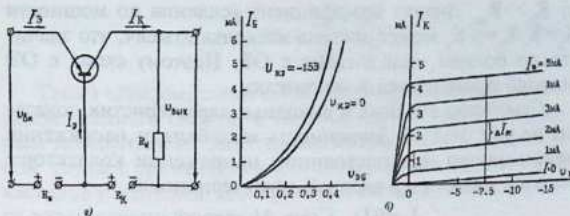


Рис. 16.15. Схема соединения транзистора с общим эмиттером:
а) схема соединения; б) входные и выходные характеристики.

На рис. 16.15 а показана схема с ОЭ. Источник входного сигнала подключается к цепи база-эмиттер, нагрузка R_n и источник тока — к цепи эмиттер-коллектор. Входное сопротивление схемы с ОЭ по сравнению со схемой с ОБ значительно больше и составляет несколько сотен Ом. Причиной этого является то, что входным током схемы будет ток базы, который намного меньше токов коллектора и эмиттера. Выходное сопротивление схемы велико и доходит до ста килоом.

Отношение приращений токов коллектора и базы при постоянном напряжении коллектора определяет коэффициент усиления по току:

$$\beta = \Delta I_k / \Delta I_b \text{ при } U_k = \text{const.}$$

Так как $I_e = I_k + I_b$, то

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_e - \Delta I_k} = \frac{\Delta I_k / \Delta I_b}{\Delta I_e / \Delta I_b - \Delta I_k / \Delta I_b} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (16.6)$$

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}} = \frac{\Delta I_k \cdot R_n}{\Delta I_b \cdot R_{вх}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot \frac{R_n}{R_{вх}}, \quad (16.7)$$

где α — коэффициент усиления по току схемы с ОБ; $R_{вх}$ — входное сопротивление схемы с ОЭ; R_n — сопротивление нагрузки.

Таким образом, коэффициент усиления по напряжению K_u может быть равным нескольким сотням, поскольку

ку $R_{\text{н}} \gg R_{\text{вх}}$. Значит коэффициент усиления по мощности $K_p = K_i \cdot K_u = \beta \cdot K_u$ может достичь несколько тысяч, что значительно больше, чем в схеме с ОБ. Поэтому схема с ОЭ широко применяется в усилителях.

Семейство входных и выходных характеристик показаны на рис. 16.15 б. Зависимость тока базы от напряжения база-эмиттер при постоянном напряжении коллектор-эмиттер называется входной характеристикой

$$I_b = f(U_{\text{бэ}}) \text{ при } U_{\text{кэ}} = \text{const.}$$

Зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер при постоянном токе базы называется выходной характеристикой

$$I_c = f(U_{\text{кэ}}) \text{ при } I_b = \text{const.}$$

На рис. 16.16 приведена схема включения биполярного транзистора с ОК. Источник входного сигнала подается в цепь база-коллектор, нагрузка $R_{\text{н}}$ — в цепь коллектор-эмиттер. Входное сопротивление равно нескольким килоОм. Коэффициент усиления по току

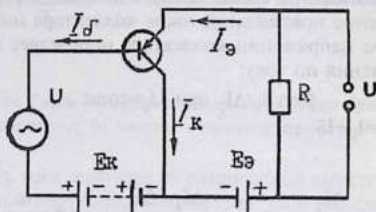


Рис. 16.16. Схема соединения транзистора с общим коллектором.

$$K_i = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_c - \Delta I_b} = \frac{\Delta I_c / \Delta I_c}{\Delta I_c / \Delta I_c - \Delta I_b / \Delta I_c} = \frac{1}{1 - \alpha}. \quad (16.8)$$

Так как эмиттерный переход включен в прямом направлении, то его сопротивление будет маленьким и его можно не принимать в расчет. Поэтому коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \approx \frac{\Delta I_1 \cdot R_n}{\Delta I_1 \cdot R_n} = 1 \quad (16.9)$$

Таким образом, схема с ОК почти не изменяет напряжение входного сигнала и поэтому ее называют эмиттерным повторителем. Эмиттерные повторители в большинстве случаев применяются для согласования между собой каскадов усилителей. Для проверки схемы с ОК пользуются характеристиками схемы с ОЭ.

Биполярные транзисторы выполняют такую же работу, что и вакуумные триоды. Однако, между ними есть большая разница: ламповый обычно работает при отсутствии тока на управляющей сетке, а в транзисторе через управляющий электрод—базу всегда проходит ток.

16.6. Полевые транзисторы

Полевой транзистор — это полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей, протекающих через проводящий канал, управляемый электрическим полем. Действие полевого транзистора обусловлено носителями одной полярности в продольном электрическом поле. Управление значением тока через канал осуществляется поперечным электрическим полем (а не током, как в биполярных транзисторах). Поэтому и называются они «полевыми» транзисторами.

Характерной особенностью полевого транзистора является высокий коэффициент усиления по напряжению и высокое входное сопротивление.

Применяются две разновидности полевых транзисторов: с затвором в виде р-п-перехода и с изолированным затвором. Устройство и схема соединений полевого транзистора с затвором в виде р-п перехода показано на рис. 16.17. Прибор состоит из пластины п-кремния. К ее торцам присоединены два металлических контакта, называемых стоком и истоком. Последовательно с ними подключаются источник питания E_0 и нагрузка R_n . Полярность источника питания должна быть такая, чтобы поток основных носителей зарядов (в канале п-типа электронов) перемещался от истока к стоку. На противоположные грани введены ак-

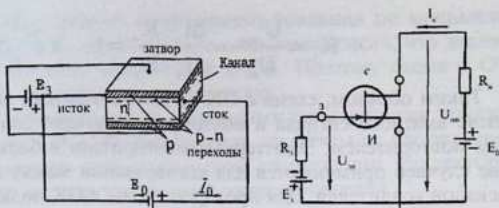


Рис. 16.17. Устройство и схема включения полевого транзистора с затвором в виде р-п-перехода.

цепторные примеси. Поэтому эти стороны пластины превращаются в р-области. Соединенные электрически они образуют электрод, называемый затвором. Между каналом и затвором образуются два р-п-перехода. К затвору прикладывается обратное напряжение, которое создает поперечное электрическое поле. При изменении этого напряжения происходит расширение или сужение переходов. Это приводит к изменению сопротивления канала и проходящего через него тока. При напряжении затвора $U_{зп} = 0$ ток стока I_c имеет максимальное значение (этот ток называется током насыщения $I_{c,нас}$). С увеличением величины обратного напряжения затвора ($U_{зп}$) р-п переходы расширяются, уменьшая сечение канала. В результате уменьшается ток стока. При напряжении запирания $U_{зп,зп}$ сечение канала и ток через него уменьшается практически до 0. При этом сток и исток оказываются изолированными друг от друга. На рис. 16.18 а показана стокзатворная (входная) характеристика, отражающая рассмотренный выше процесс

$$I_c = f(U_{зп}) \text{ при } U_{сн} = \text{const},$$

где I_c — ток стока; $U_{зп}$ — напряжение затвора; $U_{сн}$ — напряжение между стоком и истоком.

Зависимость тока стока от напряжения между стоком и истоком при постоянном напряжении $U_{зп}$ называется выходной (стоковой) характеристикой (рис. 16.18 б).

$$I_c = f(U_{сн}) \text{ при } U_{зп} = \text{const}.$$

Если подавать на сток положительное относительно истока напряжение и увеличивать его ток стока нелинейно растет. При этом проводимость канала уменьшается и рост

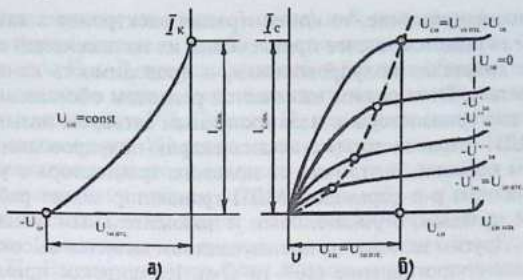


Рис. 16.18. Входные (а) и выходные (б) характеристики полевого транзистора с затвором в виде р-п перехода.

тока замедляется. Когда напряжение стока достигнет напряжения насыщения $U_{ст} = U_{ст,нас}$, канал на стоке полностью перекрывается ток стока достигает величины $I_{с,нас}$ насыщения. У истока сечение канала остается прежним, так как $U_{зв}(0) = 0$.

На рис. 16.19 показано устройство полевого транзистора с изолированным затвором. На кремниевой пластине р-типа создают сильнолегированные области с электропроводностью n-типа (каналом n-типа), служащие стоком и истоком. После этого поверхность пластины подвергается термообработке. В результате на поверхности пластины появляется тонкий изоляционный слой толщиной 0,1 мкм из SiO_2 . На

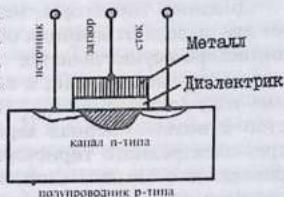


Рис. 16.19. Полевой транзистор с изолированным затвором.

поверхность изоляционного слоя наносится металлический слой, служащий затвором. Пока на затвор не подано напряжение сток и исток отдалены друг от друга изоляционным слоем. При подаче на затвор отрицательного напряжения относительно истока часть электронов вытесняется из канала и его проводимость уменьшается. Этот режим называется режимом обеднения. Если на затвор подать положи-

тельное напряжение, то концентрация электронов в канале увеличивается за счет привлечения их из пассивной области кристалла полупроводника, и проводимость канала возрастает. Этот режим называется режимом обогащения. Полевые транзисторы с изолированным затвором называют МДП – транзистор (метал-диэлектрик-полупроводник). Таким образом, в отличие от полевого транзистора с управляющим р-п-переходом МДП транзистор может работать с нулевым, отрицательным и положительным смещением. Другим важным их преимуществом является высокое входное сопротивление (10^{10} - 10^{15} Ом). Их широкое применение обусловлено также малыми собственными шумами.

16.7. Тиристоры

Тиристор – полупроводниковый прибор с тремя и более р-п-переходами, двумя устойчивыми состояниями, вольт-амперная характеристика которого имеет участок отрицательного сопротивления.

Диодные тиристоры, называемые динисторами, имеют два вывода от крайних областей структуры. Включение динистора осуществляется путем увеличения напряжения между его электродами, а выключение – путем уменьшения тока до значения $I_{\text{выкл}}$. На рис. 16.20 показано устройство и вольт-амперная характеристика четырехслойного трех-электродного тиристора. Для усиления действия управляющего сигнала слой, к которому подключен управляющий электрод, выполняется более тонким, чем другие.

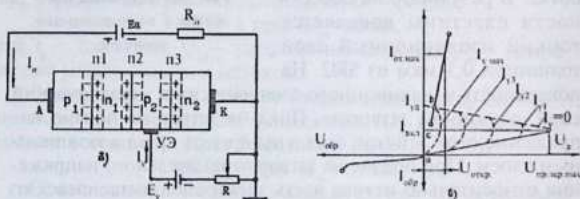


Рис. 16.20. Четырехслойный трёхэлектродный тиристор:
а) схема включения; б) вольт-амперная характеристика.

Металлические контакты А (анод) и К (катод) соединены с эмиттерными слоями. P_1 и P_2 — это эмиттерные переходы. Средние слои P_1 и P_2 представляют собой базовые области. К базе p_2 подключен металлический контакт, называемый управляющим электродом УЭ. Переход P_2 называется коллекторным. Если ток в цепи УЭ равен нулю, а между анодом и катодом приложено постоянное напряжение, то переходы P_1 и P_2 будут включены в прямом направлении, а P_2 — в обратном. Так как переход P_2 будет закрыт, то его сопротивление будет большим. Практически все приложенное напряжение будет падать на P_2 . Поэтому тиристор будет закрыт и через него будет проходить очень маленький ток. На сопротивление перехода P_2 влияют два противоположных процесса. Первое, с увеличением обратного напряжения сопротивление P_2 возрастает, так как основные носители зарядов уходят в разные стороны от перехода, т.е. в переходе P_2 уменьшается количество основных носителей зарядов. Второе, увеличение прямого напряжения в переходах P_1 и P_2 увеличивает количество основных носителей, приходящих к переходу P_2 , что уменьшает сопротивление этого перехода. Когда напряжение тиристора достигнет величины напряжения включения и станет чуть больше его, начинает преобладать второй процесс. Тиристор открывается и ток его резко возрастает. Уменьшается сопротивление P_2 , уменьшается также падение напряжения на нем. Открытию тиристора соответствует участок Оа вольт-амперной характеристики. Открытому состоянию тиристора соответствует участок бд, который похож на прямой участок вольт-амперной характеристики кремниевого диода. Уменьшение напряжения с ростом тока показывает наличие отрицательного сопротивления на участке аб характеристики.

Для закрытия тиристора необходимо уменьшить ток до величины тока удержания $I_{уд}$.

Подав на управляющий электрод положительное напряжение, на базу P_2 можно ввести дополнительные заряды-электроны. За счет рекомбинации пробивное напряжение и сопротивление перехода P_2 уменьшаются. Это приводит к уменьшению напряжения открытия тиристора. Чем больше будет ток управляющего электрода, тем меньше будет величина напряжения открытия тиристора. Тиристор открывается в течение 10 мксек. После открытия управля-

ющий электрод не может оказать никакого воздействия на работу тиристора. Поэтому для открытия тиристора достаточно подать на УЭ кратковременный импульс.

При подаче обратного напряжения переходы P_1 и P_2 будут включены в обратном направлении, а P_2 — в прямом направлении, и тиристор будет закрыт. При этом обратные ветви вольт-амперных характеристик тиристора и диода похожи между собой.

Тиристоры применяются в автоматических системах, электронике, выпрямителях, статических преобразователях.

Условные обозначения транзисторов и тиристоров приведены на рис. 16.21. Для обозначения транзисторов и тиристоров пользуются буквами и цифрами. Первая буква или цифра определяет материал прибора: цифра 1 или буква Г — германий, цифра 2 или буква К — кремний, цифра 3 или буква А — арсенид галлия. На втором месте стоит буква, определяющая тип прибора: Т — биполярный транзистор, П — полевой транзистор, И — диностор, У — тиристор.

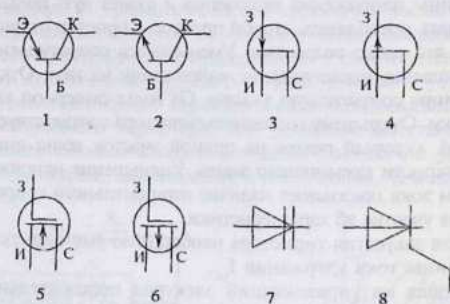


Рис. 16.21. Условные обозначения транзисторов и тиристоров: 1- биполярный транзистор p-n-p; 2-биполярный транзистор n-p-n; 3- полевой транзистор с затвором в виде p-n перехода и каналом n-типа; 4-полевой транзистор с затвором в виде p-n перехода и каналом p-типа; 5-полевой МДП транзистор с каналом n-типа; 6-полевой МДП транзистор с каналом p-типа; 7-динистор; 8-тиристор.

Задачи

Задача 16.1. При изменении прямого напряжения от 0,3 вольта до 1,0 прямой ток изменяется от 3 мА до 18 мА. Определить дифференциальное сопротивление диода.

Решение: дифференциальное сопротивление диода равно:

$$R_i = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{1,0 - 0,3}{(18 - 3) \cdot 10^{-3}} = \frac{0,7 \cdot 10}{(18 - 3) \cdot 10^{-3}} = \frac{0,7 \cdot 10^3}{15} = 46,7 \text{ Ом.}$$

Задача 16.2. Обратный ток коллектора транзистора КТ312 А равен 12 мкА, напряжение коллектора $U_k = 14$ В.

Определить обратное сопротивление коллекторного перехода.

Решение: обратное сопротивление коллекторного перехода равно:

$$R_{\text{кобр.}} = \frac{U_k}{I_{\text{к.обр}}} = \frac{14}{12 \cdot 10^{-6}} = 1,166 \text{ МОм.}$$

Задача 16.3. В транзисторе КТЗ 12 А ток базы $I_b = 0,6$ мА, напряжение коллектора $U_k = 10$ В. Пользуясь выходными характеристиками, определить выходное сопротивление транзистора (рис. 16.22).

Решение: 1) из характеристики находим ток коллектора соответствующий току базы $I_b = 0,6$ мА. $I_k = 24$ мА

2) выходное сопротивление транзистора

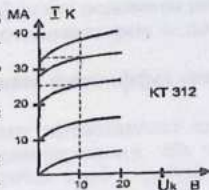


Рис. 16.22. Рисунок к задаче 16.3.

$$R_{\text{вых}} = \frac{U_k}{I_k} = \frac{10}{24 \cdot 10^{-3}} = 417 \text{ Ом.}$$

Задача 16.4. Транзистор КТ312 А соединен по схеме с общим эмиттером. Ток коллектора $I_k = 33$ мА, ток базы $I_b = 0,8$ мА. Пользуясь семейством выходных характеристики, определить напряжение коллектора и мощность рассеяния коллектора.

Решение: 1) из выходной характеристики находим напряжение коллектора, соответствующее току базы $I_b=0,8 \text{ мА}$,
 $U_k=10 \text{ В}$;

2) мощность рассеяния коллектора

$$P_k = U_k \cdot I_k = 10 \cdot 33 \cdot 10^{-3} = 330 \text{ мВт}.$$

Задача 16.5. В полупроводниковом стабилитроне Д814 А при токе стабилизации $I_{ст}=6 \text{ мА}$ напряжение изменилось с 7 до 8,2 вольта. Определить изменение прямого сопротивления стабилитрона.

Решение: изменение прямого сопротивления стабилитрона равно:

$$\Delta R_{пр} = \frac{\Delta U_{пр}}{I_c} = \frac{8,2 - 7}{6 \cdot 10^{-3}} = \frac{1,2 \cdot 10^3}{6} = 200 \text{ Ом}.$$



ГЛАВА 17

ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Электронные приборы, электрические свойства которых изменяются под действием падающего на них светового излучения, называются фотоэлектронными. Различают внешний и внутренний фотоэффект. При внешнем фотоэффекте под действием светового потока фотокатод излучает электроны. На внешнем фотоэффекте основаны работа электровакуумных и ионных фотоэлементов, фотоэлектронных умножителей, передающих телевизионных трубок.

Сущность внутреннего фотоэффекта состоит в том, что в некоторых полупроводниках под действием светового потока происходит ионизация атомов. В результате возникают новые заряды, увеличивающие электропроводность полупроводника. На внутреннем фотоэффекте основаны работа фоторезисторов, фотодиодов, фототранзисторов и др.

17.1. Фотоэлементы с внешним фотоэффектом

Электровакуумный фотоэлемент представляет собой стеклянную колбу, из которой выкачан воздух. На часть поверхности колбы изнутри наносится слой серебра (никеля), на который наносится светочувствительный слой. Чаще всего применяются кислород-цезиевые и сурьмяно-цезиевые катоды. Иногда катоды выполняются не на стекле баллона, а в виде отдельной пластины. Анодом служит кольцо из никеля, располагаемое в центре баллона, или сетка, располагаемая вблизи пластинчатого катода. Такое устройство анода не препятствует прохождению света на катод. В газонаполненных (ионных) фотоэлементах колба заполняется разреженным газом (например, аргоном) при давлении около 30 Па (рис. 17.1). При попадании на поверхность катода светового потока атомы светочувствитель-

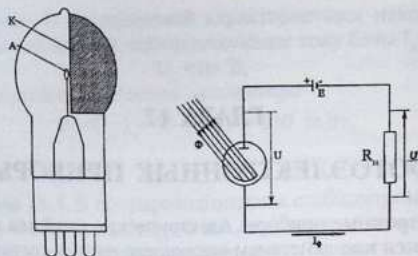


Рис. 17.1. Электронный фотозэлемент:
а) общий вид; б) схема включения.

ного слоя ионизируются. При подключении источника напряжения между анодом и катодом возникает электрическое поле, под воздействием которого свободные электроны из катода движутся к аноду, создавая анодный ток. Величина этого тока пропорциональна силе светового потока и величине напряжения между анодом и катодом.

Зависимость фототока от напряжения при постоянной силе светового потока называется вольт-амперной характеристикой фотозлемента (рис. 17.2).

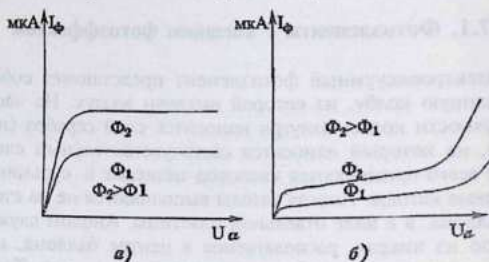


Рис. 17.2. Вольт-амперные характеристики фотозлемента с внешним фотоэффектом: а) электронный фотозэлемент; б) ионный фотозэлемент.

$$I_{\phi} = f(U_a) \text{ при } \Phi = \text{const.}$$

Зависимость фототока от величины светового потока при постоянном напряжении называется световой характеристикой

$I_{\phi} = f(\Phi)$ при $U_a = \text{const.}$ (рис. 17.3).

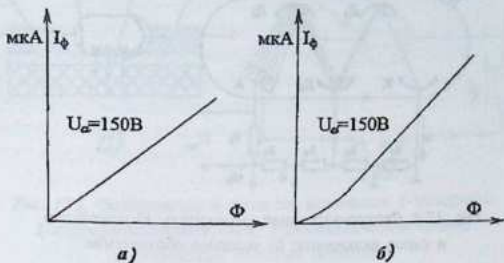


Рис. 17.3. Световые характеристики фотоэлемента с внешним фотоэффектом: а) электронный фотоэлемент; б) ионный фотоэлемент.

Вольт-амперная характеристика ионного фотоэлемента после горизонтальной линии резко поднимается вверх, что связано с резким увеличением тока при наступлении ионизации газа внутри колбы (рис. 17.2 б). Световая характеристика электронного фотоэлемента имеет линейный характер, а у ионного он имеет нелинейный характер, что связано с возрастанием тока при ионизации газов. Отношение приращения фототока к соответствующему приращению светового потока называется чувствительностью фотоэлемента.

$$S = \frac{\Delta I_{\phi}}{\Delta \Phi} \text{ мкА/лм.}$$

Чувствительность электронного фотоэлемента составляет $S = 20 \div 120$ мкА/лм, ионного — $150 \div 250$ мкА/лм.

Для увеличения чувствительности (фотоэлектрон эмиссии) применяются фотоэлектронные умножители (рис. 17.4). Их фототок усиливается за счет вторичной электронной эмиссии. В них кроме анода и катода расположены вторичные эмиттеры, называемые динодами, количество которых может быть от 10 до 14. Для нормальной работы фотоумножителя напряжение между соседними динодами должно быть 50—150 В. Электроны, вышедшие из фотокатода под действием света, ускоряются электрическим полем первого динода, ударяются об него и выбивают из него вторичные электроны. Эти электроны ускоряются полем

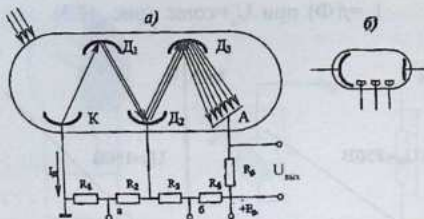


Рис. 17.4. Фотоэлектронный умножитель: а) устройство и схема включения; б) условное обозначение.

второго динода, ударяются об него и также выбивают из него вторичные электроны. Этот процесс продолжается до тех пор, пока вторичные электроны последнего динода не достигнут анода. Количество вторичных электронов каждого динода больше вторичных электронов, вылетевших с предыдущего динода. Отношение количества вторичных электронов к количеству первичных называется коэффициентом вторичной эмиссии δ . При n динодах расчетный коэффициент усиления фотоумножителя равен $K = \delta^n = (3 \div 8)^n = 10^6 \div 10^7$. Однако, действительный коэффициент усиления намного меньше, так как ток вторичной эмиссии ограничен отрицательным объемным зарядом, окружающим диод. При помощи фотоумножителей можно усилить очень маленькие световые потоки (до 10^{-9} лм). Усиление ещё меньших световых потоков ограничивается темновым током. Ток, создаваемый термоэлектронной эмиссией фотокатода и электростатической эмиссией динодов при отсутствии светового потока, называется темновым током. Фотоумножители применяются в телевидении, ядерной физике, астрономии и др.

17.2. Фоторезистор

Фоторезистором называется резистор, электрическое сопротивление которого зависит от освещенности (рис 17.5). На подложку из слюды, керамики или стекла наносится светочувствительный полупроводниковый слой (селен, сернистый свинец, сульфид кадмия, селенид кадмия). К это-

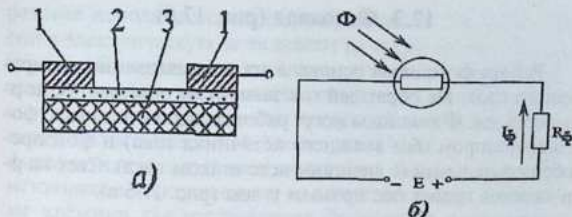


Рис. 17.5. Фоторезистор и схема его включения: 1-электроды; 2-полупроводниковый слой; 3-диэлектрическая основа:
а) устройство; б) схема включения.

му слою прикрепляются контакты. Для предохранения светочувствительного слоя от влаги, механических разрушений он покрывается прозрачным лаком.

При отсутствии света через фоторезистор проходит «темновой» ток, возникающий под действием радиолучей, космических лучей и собственной проводимости полупроводника. При освещении фоторезистора в результате ионизации атомов появляются дополнительные электроны и дырки. Поэтому сопротивление фоторезистора уменьшается и ток в цепи увеличивается. Разница между световым темновым токами называется фототоком

$$I_{\phi} = I_{\epsilon} - I_t$$

где I_{ϕ} — фототок; I_{ϵ} — световой ток; I_t — темновый ток.

Зависимость фототока от напряжения при постоянном световом потоке называется вольт-амперной характеристикой фоторезистора $I_{\phi} = f(U)$ при $\Phi = \text{const}$.

Фоторезисторы бывают: ФСА — в нем в качестве полупроводника применяется сернистый свинец, ФСК — сернистый кадмий, ФСД — селенид кадмия.

Недостатками фоторезисторов является большая инерционность, нелинейность световой характеристики, зависимость сопротивления от температуры. Фоторезисторы широко применяются в электронике, автоматических устройствах, вычислительной технике и др.

17.3. Фотодиод (рис. 17.6)

Работа фотодиода основана на использовании запирающего слоя. Их обратный ток зависит от освещенности р-п-перехода. Фотодиоды могут работать в двух режимах: фотогенератором (без внешнего источника тока) и фотопреобразовательный (с внешним источником тока). Свет на р-п-переход падает под прямым углом (рис. 17.6 а).

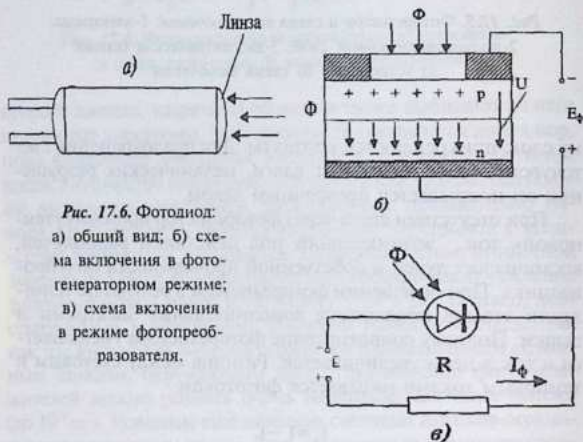


Рис. 17.6. Фотодиод:
 а) общий вид; б) схема включения в фотогенераторном режиме;
 в) схема включения в режиме фотопреобразователя.

Фотогенераторный режим. При отсутствии светового потока напряжение р-п-перехода создает потенциальный барьер. При этом через диод ток не проходит. При освещении р-п-перехода в результате ионизации атомов появляются дырки и электроны. Под действием напряжения потенциального барьера дырки переходят в р-область, где они являются основными носителями. Электроны остаются в п-области. Таким образом, в результате освещения р-п-перехода возрастает концентрация дырок в р-области и электронов в п-области, что приводит к появлению фото-э.д.с. При подключении к фотодиоду нагрузки в цепи появится фототок (рис. 17.6 б, в). Фотодиоды в фотогенераторном

режиме используются для преобразования световой энергии в электрическую, и называют их также солнечным элементом. Они изготавливаются из пластины с n -проводимостью с примесью кремния. На поверхность пластины наносится примесь бора методом вакуумной диффузии и создается p -область толщиной 2 мкм (рис. 17.6 б). Из солнечных фотоэлементов создаются солнечные батареи, служащие источником электроэнергии на космических кораблях. Кроме кремния для изготовления фотодиодов применяются германий, селен и др.

Фотопреобразовательный режим (рис. 17.6 в). В этом режиме последовательно с нагрузкой и фотодиодом в запирающем направлении подключен источник тока. При неосвещенном фотодиоде в нем проходит темновой ток. При освещении фотодиода в результате ионизации атомов p - n -перехода появляются дополнительные дырки и электроны. Под действием электрического поля внешнего источника тока неосновные носители p и n областей создают электрический ток.

17.4. Фототранзистор

Фототранзистор — это трехслойный полупроводниковый прибор с двумя p - n -переходами. Его особенностью является способность усиления фототока под действием света. Фототранзистор изготавливается в виде плоскостного германиевого или кремниевого биполярного транзистора. Наибольшая эффективность достигается при перпендикулярном направлении светового потока переходу коллектор—база и при освещении базовой области. Для достижения светового потока базы эмиттерная область выполняется тонкой. На рис. 17.7 показаны общий вид фототранзистора и схемы подключения. Рассмотрим работу транзистора при отключенной базе (рис. 17.7, б). Под действием света в базе возникают дырки и электроны. Дырки являются неосновными носителями зарядов и под действием коллекторного напряжения переходят на коллектор, образуя фототок I_{ϕ} . Электроны двигаются к эмиттерному переходу. Но из-за потенциального барьера не все электроны могут его преодолеть и поэтому в базе происходит накопление электронов, что приводит к снижению потенциального ба-

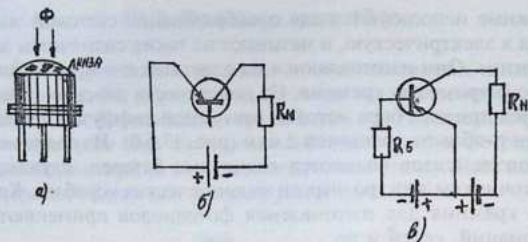


Рис. 17.7. Фототранзистор: а) общий вид; б) схема включения с изолированной базой; в) схема включения с общим эмиттером.

рьера. В результате увеличивается поток дырок из эмиттера в базу. Это, в свою очередь, ведет к увеличению фототока I_{ϕ} , т.е. происходит усиление первичного фототока, возникающего в базе. Поэтому чувствительность фототранзисторов значительно больше, чем у фотодиодов и составляет 0,5-1 А/лм. На рис 17.7, в показана схема подключения фототранзистора с общим эмиттером.

В последнее время большее применение находят полевые фототранзисторы. Они обладают более высоким входным сопротивлением, высокой чувствительностью (до десятком А/лм).

Фототранзисторы применяют в фототелеграфии, фотометрии, фототелефонии, вычислительной технике и т.д.

17.5. Фототиристор

Фототиристором называется фотогальванический приемник излучения с тремя и более р-п-переходами. В его вольт-амперной характеристике имеется участок отрицательного дифференциального сопротивления (рис. 17.8). При отсутствии света и управляющего тока фототиристор заперт и через него проходит только темновой ток. Под действием света в слоях тиристора образуются электронно-дырочные пары, число которых с глубиной проникновения света убывает по экспоненциальному закону. Зависимость фототока от светового потока называется световой характеристикой (рис 17.8, б). По достижении фототока величины $I_{вкл}$ (тока включения) фототиристор из закры-

того состояния переходит в открытое. С этого момента происходит резкое увеличение фототока. Чтобы закрыть фототиристор надо уменьшить его ток до величины тока выключения ($I_{\text{откл}}$). Зависимость выходного тока от анодного напряжения при различных световых потоках называется вольт-амперной характеристикой (рис. 17.8, в). При этом

$$\Phi_3 > \Phi_2 > \Phi_1 > \Phi_0 \text{ и } U_{\text{вкл}3} < U_{\text{вкл}2} < U_{\text{вкл}1} < U_{\text{вкл}0}$$

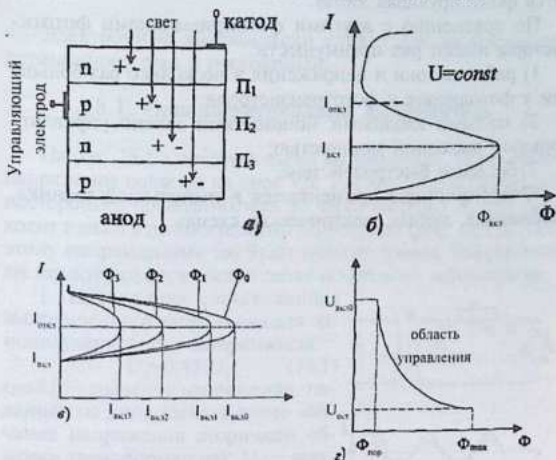


Рис. 17.8. Фототиристор: а) устройство; б) световая характеристика; в) вольтамперная характеристика; г) характеристика управления.

Значит, с увеличением светового потока напряжение открывания фототиристора уменьшается. На рис. 18.8 г показана характеристика управления фототиристора — зависимость напряжения включения $U_{\text{вкл}}$ от светового потока. Из нее видно, что рабочая область фототиристора ограничивается пороговым световым потоком $\Phi_{\text{пор}}$ и световым потоком спрямления. Пороговый световой поток определяет минимальный световой поток, к которому нечувствителен фототиристор. Максимальный световой поток $\Phi_{\text{спр}}$ определяет спрямление характеристики фототиристора в характеристику диода.

С увеличением температуры вольт-амперные характеристики фототиристора изменяются, обратные и темновой токи растут, напряжение включения $U_{вкл}$ уменьшается.

Корпус фототиристора такой же, как и у обычного тиристора. С одной стороны в корпусе делается окно, которое закрывается специальным защитным стеклом. В некоторых фототиристорах для усиления светового потока ставится фокусирующая линза.

По сравнению с другими фотоприемниками фототиристоры имеют ряд преимуществ:

- 1) рабочие токи и напряжения в несколько раз больше чем у фотодиодов и фототранзисторов;
- 2) малыми входными мощностями можно управлять большой выходной мощностью;
- 3) большое быстродействие.

Фототиристоры применяются в импульсной технике, автоматике, любых электрических схемах.

ГЛАВА 18

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Электронные выпрямители служат для выпрямления переменного тока в постоянный

18.1. Однополупериодный выпрямитель

На рис. 18.1 а показана схема выпрямителя. Переменное напряжение подается на диод VD. Так как диод обладает односторонней проводимостью, то через нагрузку R_n ток проходит только в положительный полупериод (рис. 18.1 б). Поэтому выпрямленный ток будет пульсирующим. Выпрямители характеризуются следующими основными параметрами:

1. Постоянная составляющая выпрямленного напряжения для однополупериодного выпрямителя

$$U_o = 0,45 \cdot U_2, \quad (18.1)$$

где U_2 — значение напряжения, поданное на диод (действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора); U_o — выпрямленное напряжение.

2. Обратное напряжение — это напряжение, приложенное к диоду в отрицательный полупериод

$$U_{обр.м} = 3,14 \cdot U_o, \quad (18.2)$$

где $U_{обр.м}$ — максимальное значение обратного напряжения. Значит, при выборе диодов их обратное напряжение должно быть более $3,14 \cdot U_o$ ($U_{обр.д.} > 3,14 U_o$). Если такого диода нет, то можно соединять последовательно необходимое количество диодов.

3. Значение выпрямленного тока. Для однополупериодного выпрямителя

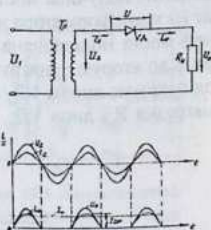


Рис. 18.1. Однополупериодный выпрямитель: а) схема; б) графики токов и напряжений.

$$I_o = 0,318 \cdot I_2, \quad (18.3)$$

где I_2 — действующее значение тока вторичной обмотки. При выборе диода необходимо выполнить условие $I_o < I_d$ (I_d — значение тока, который можно пропустить через диод). При отсутствии такого диода можно параллельно соединить необходимое количество диодов.

4. Коэффициент пульсации:

$$K_n = \frac{U_{IM}}{U_o}, \quad (18.4)$$

где U_{IM} — амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения. Для однополупериодного выпрямителя $K_n = 1,57$, что является крупным недостатком этого выпрямителя.

18.2. Двухполупериодные однофазные выпрямители

1. Мостовой однофазный выпрямитель.

Среди двухполупериодных выпрямителей широкое применение получила мостовая схема (рис. 18.2). Схема состоит из трансформатора и четырех диодов. В одну из диагоналей моста подключена вторичная обмотка трансформатора, а во вторую — нагрузка R_n . В положительный полупериод открыты диоды VD_1 и VD_3 и ток идет по цепи: диод VD_1 , нагрузка R_n , диод VD_3 , вторичная обмотка трансформато-

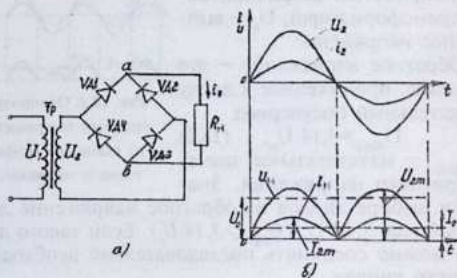


Рис. 18.2. Двухполупериодный мостовой выпрямитель:
а) схема; б) графики токов и напряжений.

ра. В отрицательный полупериод открыты диоды VD_3 и VD_4 , и ток идет по цепи: диод VD_3 , нагрузка R_n , диод VD_4 , вторичная обмотка трансформатора. Таким образом, на нагрузке направление тока не изменяется.

Параметры выпрямителя:

1) выпрямленное напряжение

$$U_o = 0,9 \cdot U_2, \quad (18.5)$$

где U_2 — напряжение, поданное на мост (действующее значение напряжения вторичной обмотки);

2) значение выпрямленного тока

$$I_o = 0,636 \cdot I_2; \quad (18.6)$$

3) обратное напряжение

$$U_{обр.м} = 1,57 \cdot U_o; \quad (18.7)$$

4) коэффициент пульсации

$$K_n = 0,67. \quad (18.8)$$

2. Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой (рис. 18.3).

Во вторичной обмотке трансформатора выведена средняя точка. Диоды VD_1 и VD_2 подключены к концам вторичной обмотки трансформатора. Нагрузка R_n подключена между средней точкой вторичной обмотки трансформатора и общей точкой диодов. В положительный полупериод открывается диод VD_1 и ток идет по цепи: диод VD_1 , нагрузка R_n , точка О и точка а вторичной обмотки трансформатора. В отрицательный полупериод ток идет по цепи: диод VD_2 , нагрузка R_n , точки О и б вторичной обмотки трансформатора. Таким образом, направление тока через нагрузку R_n не изменяется. График тока и напряжения такие же, как у мостового выпрямителя. Величина обратного напряжения в этой схеме в два раза больше, чем у мостового выпрямителя.

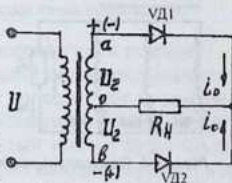


Рис. 18.3. Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой.

$$U_{обр.м} = 3,14 \cdot U_o.$$

Другие параметры такие же, как у мостового выпрямителя. Преимуществом этой схемы является то, что вместо 4-х диодов применяются 2 диода.

18.3. Трехфазные выпрямители

Трехфазные выпрямители используются для устройств средней и большой мощности. Схема и графики напряжений трехфазного однополупериодного выпрямителя приведены на рис. 18.4. Вторичная обмотка трансформатора соединена звездой. К её свободным концам подсоединены диоды VD_1, VD_2, VD_3 . В течение $1/3$ периода напряжение одной из фаз будет наибольшим. Поэтому в это время будет открыт тот диод, который подключен к этой фазе.

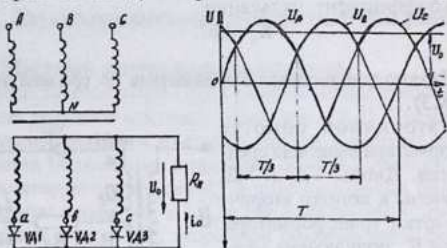


Рис. 18.4. Однополупериодный трехфазный выпрямитель.

Параметры выпрямителя:

1. Значение выпрямленного тока

$$I_0 = 0,827 \cdot I_2 \quad (18.9)$$

Так как через каждый диод ток проходит в $1/3$ периода, то средний выпрямленный им ток равен $I_{cp} = I_0/3$.

2. Выпрямленное напряжение

$$U_0 = 1,17 \cdot U_2 \quad (18.10)$$

где U_2 — действующее значение фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора.

3. Обратное напряжение

$$U_{обр.м.} = 2,09 \cdot U_0 \quad (18.11)$$

4. Коэффициент пульсации

$$K_{\pi}=0,25. \quad (18.12)$$

Схема трехфазного мостового выпрямителя показана на рис. 18.5. Она состоит из двух однополупериодных трехфазных выпрямителей, питающихся от одних и тех же вторичных обмоток трансформатора. Диоды VD_1, VD_2, VD_3 , соединенные катодами, образуют катодную группу и относятся к первому выпрямителю. Диоды VD_4, VD_5, VD_6 , соединенные анодами, образуют анодную группу и относятся к второму выпрямителю.

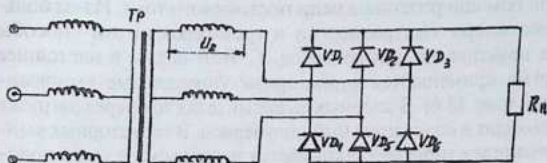


Рис. 18.5. Трехфазная мостовая схема выпрямителя.

Диоды катодной группы проводят ток в течение $1/3$ периода, когда на аноде наибольший положительный потенциал. Диоды анодной группы проводят ток в течение $1/3$ периода, когда на катоде наибольший отрицательный потенциал. Следовательно, в каждый момент будут открыты одновременно два диода: один из катодной группы, а другой — из анодной группы.

Основные параметры схемы:

1. Значение выпрямленного тока

$$I_0 = 1,2 \cdot I_2, \quad (18.13)$$

где I_2 — действующее значение тока вторичной обмотки

2. Выпрямленное напряжение

$$U_0 = 2,34 \cdot U_2, \quad (18.14)$$

где U_2 — действующее значение напряжения вторичной обмотки.

3. Обратное напряжение

$$U_{\text{обр.м.}} = 1,05 \cdot U_0. \quad (18.15)$$

4. Коэффициент пульсаций

$$K_n = 0,057. \quad (18.16)$$

Указанные параметры соответствуют соединению обмоток трансформатора по схеме звезда-звезда и треугольник — звезда.

18.4. Тиристорные выпрямители

В диодных выпрямителях для изменения выпрямленного напряжения необходимо при помощи автотрансформатора изменять напряжение в цепи переменного тока или при помощи реостата в цепи постоянного тока. Из-за больших потерь электроэнергии и громоздкости эти способы на практике не применяются. С этой целью в настоящее время применяются тиристорные управляемые выпрямители (рис. 18.6). В диодных выпрямителях ток через нагрузку проходит в положительный полупериод. В тиристорных выпрямителях тиристор открывается и пропускает ток в положительный полупериод, начиная с момента подачи сигнала

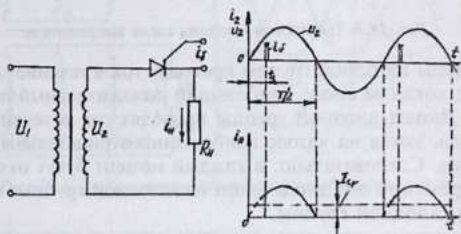


Рис. 18.6. Тиристорный выпрямитель: а) схема; б) графики токов и напряжений.

ла на управляющий электрод. В соответствии с рис. 18.6 б управляющий импульс подается в каждый положительный полупериод и запаздывает на время t . Поэтому ток через нагрузку проходит не в течение всего полупериода а за меньшее время, равное $T/2 - t_1$. Значит, среднее значение выпрямленного тока (напряжения) уменьшается. Таким образом, подавая импульсы на управляющий электрод в различные моменты времени, можно изменять средние значения тока и напряжения на нагрузке.

18.5. Электрические фильтры

Электрические фильтры служат для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения. Электрические фильтры бывают простые однозвенные и сложные, представляющие собой сочетание индуктивности, конденсаторов, резисторов. Конденсатор C_ϕ , включенный параллельно нагрузке, представляет собой простейший емкостный фильтр (рис. 18.7). При повышении выпрямленного напряжения

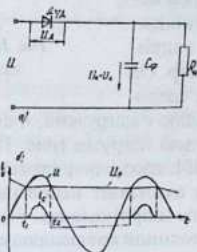


Рис. 18.7. Конденсаторный фильтр: а) схема; б) графики тока и напряжения.

конденсатор заряжается и разряжается на нагрузку, когда напряжение на ней становится меньше напряжения конденсатора. Поэтому напряжение на нагрузке изменяется в меньших пределах, чем при отсутствии конденсатора. Сглаживание пульсаций выполняется при условии $X_C \ll R_n$. При выполнении этого условия большая часть переменной составляющей выпрямленного напряжения, минуя нагрузку, замыкается через конденсатор. Емкостный фильтр применяется при небольших нагрузках.

Индуктивный фильтр представляет собой катушку с сердечником, включаемую последовательно с нагрузкой. Переменная составляющая выпрямленного тока создает в магнитопроводе дросселя магнитный поток, индуцирующий э.д.с. самоиндукции, препятствующую изменению тока в цепи. Это ведет к уменьшению пульсаций выпрямленного напряжения. Сглаживающее действие пульсаций выпрямленного напряжения выполняется при условии $X_L \gg R_n$,

т.е. индуктивное сопротивление дросселя должно быть значительно больше сопротивления нагрузки. Индуктивные фильтры применяются при больших нагрузках.

Рассмотренные выше простейшие однозвенные фильтры не могут обеспечить получение необходимых коэффициентов пульсаций. Поэтому на практике в качестве сглаживающих фильтров используются сочетания индуктивности и емкости, например, Г-образный фильтр. Он состоит из дросселя, соеди-

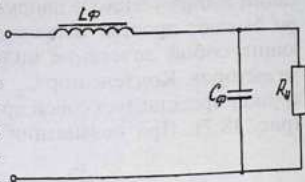


Рис. 18.8. Г-образный фильтр.

ненного последовательно с нагрузкой, и конденсатора, подключенного параллельно нагрузке (рис. 18.8). Индуктивное сопротивление $X_L = 2\pi f \cdot L$ дросселя постоянной составляющей выпрямленного тока оказывает небольшое, а переменной составляющей большое сопротивление. Емкостное сопротивление $X_C = 1/\omega C$ с постоянной составляющей выпрямленного тока оказывает большое, а переменное составляющей небольшое сопротивление. Все это ведет к значительно большему уменьшению переменной составляющей напряжения на нагрузке, чем при однозвенных фильтрах.

Задачи

Задача 18.1. В однополупериодном выпрямителе через диод проходит ток $I_0 = 100$ мА. Амплитудное значение напряжения, приложенное к диоду $U_{2m} = 282$ В. Определить сопротивление нагрузки.

Решение:

1) величина выпрямленного напряжения равна

$$U_0 = \frac{U_{\text{обр. м.}}}{\pi} = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{282}{3,14} = 90 \text{ В};$$

2) сопротивление нагрузки

$$R_n = \frac{U_0}{I_0} = \frac{90}{100 \cdot 10^{-3}} = 900 \text{ Ом}.$$

Задача 18.2. В мостовом выпрямителе (рис. 18.2) через каждый диод проходит ток $I_o = 10$ мА. Сопротивление нагрузки $R_n = 400$ Ом. Определить амплитуду переменного напряжения на нагрузке.

Решение:

- 1) величина выпрямленного напряжения

$$U_o = I_o \cdot R_n = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 400 = 40 \text{ В.}$$

Амплитуда переменного напряжения

$$U_{\text{обр.м}} = \frac{U_o \cdot \pi}{2} = \frac{40 \cdot 3,14}{2} = 62,8 \text{ В.}$$

Задача 18.3. Действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора трехфазного однополупериодного выпрямителя $U_2 = 150$ В.

Определить величину выпрямленного напряжения и обратного напряжения.

Решение:

- 1) выпрямленное напряжение

$$U_o = 1,17 \cdot U_2 = 1,17 \cdot 150 = 175,5 \text{ В;}$$

- 2) обратное напряжение

$$U_{\text{обр.м}} = 2,09 \cdot U_o = 2,09 \cdot 175,5 = 367 \text{ В.}$$

18.6. Расчет выпрямителей

Рекомендации.

При малых мощностях (до 1000 В·А) и малых выходных напряжениях (до 600 В) желательно применять однофазные двухполупериодные выпрямители, выполненные по схеме моста и с выводом средней точки. При нагрузке в несколько киловатт и напряжении не выше 1000 В желательно применять трехфазные однополупериодные выпрямители. При малых и высоких напряжениях, средних и больших мощностях широко применяются выпрямители, выполненные по трехфазной мостовой схеме. При этом вторичные обмотки трансформаторов в этой схеме желательно соединять звездой для исключения уравнительных токов, уменьшающих КПД.

18.6.1. Расчет выпрямителей с емкостной нагрузкой

Выпрямители с емкостной нагрузкой применяются при токах нагрузки не более 1,0 ампера. Электрический фильтр в них начинается с конденсатора. Порядок расчета:

1. Задаются следующие исходные данные: напряжение U и частота f тока сети, напряжение $U_{он}$ и ток $I_{он}$ нагрузки, коэффициент пульсации выпрямленного напряжения K_n , рабочий диапазон температур ΔT окружающей среды.

2. Выбираем схему выпрямителя и фильтра. Для выбора схемы выпрямителя руководствуемся вышеприведенными рекомендациями. Если коэффициент фильтрации $K_\phi = K_{п.ав} / K_{п.вык.}$ не превышает 25, то выбираем однозвенный фильтр с входным конденсатором. Если коэффициент K_ϕ фильтрации значительно превышает 25, то желательно выбрать многозвенный фильтр. Коэффициент пульсации на входном конденсаторе может быть 5–15% (для частот 400 и 50 Гц).

3. Выходное напряжение выпрямителя с учетом падения напряжения на дросселе фильтра можно определить по формуле

$$U_o = U_{он} [1 + 0,01(\Delta U_\phi / U_{он})\%],$$

где $(\Delta U_\phi / U_{он})\%$ — относительное падение напряжения на дросселе, берется из табл. 18.1.

Таблица 18.1

Значения относительных падений напряжения на дросселе

Частота, Гц	Рон, Вт														
	10	20	30	40	50	60	70	100	200	350	500	600	700	800	
50	10,3	10	9,7	9,5	9,4	9,1	8,8	8,2	7	6	5,3	4,6	3,7	3,0	$\Delta U_\phi / U_{он}\%$
400	7	6,4	6,0	5,6	5,4	5,3	5,0	4,4	3,5	3	2,5	1,8	1,8	1,5	$\Delta U_\phi / U_{он}\%$

4. По табл. 18.2 определяем основные параметры диодов: $I_{пр.ср}$ — среднее значение прямого тока диода; $U_{обр.и.п.}$ — повторяющее импульсное обратное напряжение; $I_{пр.им}$ — повторяющийся импульсный прямой ток (приблизительно),

который после расчета выпрямителя уточняется в соответствии с табл. 18.2. По табл. 18.3. выбираем тип диода. Его основные параметры должны быть больше величин, найденных выше. При отсутствии необходимых диодов можно использовать имеющиеся, применив параллельное или последовательное соединение их. При этом число соединяемых последовательно диодов

$$n_{\text{посл}} = \frac{U_{\text{обн п}}}{U_{\text{обр макс}}}; \quad n_{\text{пар}} = \frac{I_{\text{пр ср}}}{I_{\text{пр ср макс}}}$$

количество диодов

$$n_{\text{общ}} = n_{\text{посл}} \cdot n_{\text{пар}} \cdot K_d,$$

где K_d — число диодов в выбранной схеме.

Для обеспечения равенства обратных напряжений диодов при их последовательном соединении они шунтируются резисторами $R_{\text{ш}}$. Для маломощных диодов ($I_{\text{пр ср макс}} \leq 0,3 \text{ A}$) $R_{\text{ш}} = 80 + 100 \text{ кОм}$ на каждые 100 вольт обратного напряжения, для диодов средней мощности ($0,3 \text{ кА} \leq I_{\text{пр ср макс}} \leq 5 \text{ A}$) $R_{\text{ш}} = 15 + 100 \text{ кОм}$ для мощных диодов ($I_{\text{пр ср макс}} \geq 5 \text{ A}$) $R_{\text{ш}} = 10 + 15 \text{ кОм}$.

После выбора типа диода из таблицы 18.3 выписываем следующие основные параметры диода: $I_{\text{пр ср макс}}$ — максимальный средний прямой ток; $U_{\text{обрн макс}}$ — максимальное импульсное обратное напряжение; $U_{\text{пр ср}}$ — среднее прямое напряжение (падение напряжения на диоде в прямом направлении).

5. Определяется дифференциальное (внутреннее) сопротивление диодов (одного плеча схемы):

$$r_{\text{диф}} = \frac{U_{\text{пр ср}}}{3I_{\text{пр ср}}},$$

где $U_{\text{пр ср}}$ — среднее прямое напряжение диода (табл. 18.3); $I_{\text{пр ср}}$ — выпрямленный прямой ток (табл. 18.2).

6. Определяется активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к вторичной обмотке:

$$r_{\text{тр}} = \frac{K_{\text{с}} \cdot U_{\text{o}}}{I_{\text{o}} \cdot f \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{S \cdot f \cdot B}{U_{\text{o}} \cdot I_{\text{o}}}},$$

где $K_{\text{с}}$ — коэффициент, зависящий от схемы выпрямления, определяется по табл. 18.2.

S — число стержней трансформатора: для броневых магнитопроводов $S=1$, для стержневых (П-образных) $S=2$, для трехфазных трансформаторов $S=3$; U_0 — напряжение на выходе выпрямителя; I_0 — ток нагрузки; B — магнитная индукция в магнитопроводе трансформатора (берется из табл. 7.1); f — частота напряжения сети.

Если в трансформаторе имеются дополнительные обмотки активное сопротивление обмоток уточняется по формуле:

$$r_{\text{тр}} = \frac{r_{\text{тр}}}{2} \left(1 + \frac{P_2}{P_r} \right),$$

где $r_{\text{тр}}$ — активное сопротивление, рассчитанное по предыдущей формуле; P_2 — полная мощность вторичной обмотки трансформатора (определяется по табл. 18.2); P_r — габаритная мощность трансформатора (определяется по табл. 18.2).

Если для выпрямителя использован стандартный трансформатор, то активное сопротивление его обмоток определяется по формуле

$$r_{\text{тр}} = r_2 + r_1 \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2,$$

где r_2 — сопротивление фазы вторичной обмотки; r_1 — сопротивление первичной обмотки; U_2 — напряжение вторичной обмотки; U_1 — напряжение первичной обмотки.

7. По табл. 18.2. определяем активное сопротивление фазы выпрямителя r_0 .

8. Определяется индуктивность рассеяния обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной обмотке

$$L_p = 0,5 K_L \frac{S \cdot U_0}{I_0 \cdot f \cdot B} \sqrt{\frac{U_0 \cdot I_0}{S \cdot f \cdot B}},$$

где коэффициент 0,5 соответствует значению $S=2$ (вторичная обмотка располагается на 2-х стержнях). Если $S=1$, то этот коэффициент будет равен 1.

K_L — коэффициент, зависящий от схемы выпрямителя (определяется согласно табл. 18.2).

9. Определяется соотношение активных и реактивных сопротивлений фазы выпрямителя

$$\varphi = \arctg \frac{\omega \cdot L_c}{r_0},$$

где $\omega = 2\pi f$.

10. Определяется вспомогательный параметр A

$$A = \frac{I_o \cdot \pi \cdot r_o}{m \cdot U_o},$$

где m — число импульсов выпрямленного напряжения (табл. 18.2).

11. По табл. 18.4 находим значения коэффициентов B , D , F в зависимости от коэффициента A и угла φ .

12. По табл. 18.5 находим значение коэффициента H в зависимости от значений A , m и угла φ .

13. По табл. 18.2 уточняем значение повторяющегося импульсного прямого тока $I_{пр и п}$.

14. Согласно табл. 18.2. находим электрические параметры (U_2 , I_2 , I_1 и P_1).

15. Проверяем выбранный диод по обратному напряжению

$$U_{обр и.} = \sqrt{2} \cdot U_2.$$

Если найденное значение обратного напряжения больше обратного напряжения диода, то необходимо выбрать другой диод.

16. Определяется входная емкость фильтра

$$C_1 = \frac{100H}{K_{п.вх} \% \cdot r_o \cdot f},$$

где $K_{п.вх}$ — коэффициент пульсации фильтра, начинающегося с конденсатора, обычно $K_{п.вх}$ берется 5–15%.

H — коэффициент (находится по табл. 18.5).

По табл. 18.6 выбираем ближайший стандартный конденсатор и для него находим коэффициент пульсации.

$$K_{п.вх\%} = \frac{H \cdot 100}{r_o \cdot C_1 \cdot f}.$$

Номинальное напряжение конденсатора C_1 должно быть больше рабочего напряжения

$$U_{c_1} > U_{раб} = \sqrt{2} \cdot U_2.$$

17. Определяется коэффициент фильтрации фильтра

$$K_{\phi} = \frac{K_{п.вх} \%}{K_{п.н} \%},$$

где $K_{п.н}$ — коэффициент пульсации нагрузки, дается в задании.

18. В выпрямителях с емкостной нагрузкой в большинстве случаев применяется LC-фильтр. Произведение LC определяется по формуле.

$$L \cdot C = 10(K_{\phi} + 1)/m^2 \text{ для } f = 50 \text{ Гц};$$

$$L \cdot C = 0,16(K_{\phi} + 1)/m^2 \text{ для } f = 400 \text{ Гц};$$

Исходя из величины LC и C_1 определяем индуктивность дросселя

$$L = \frac{LC}{C_1}.$$

По табл. 18.7. выбираем необходимый дроссель.

19. Проверяем фильтр на отсутствие резонанса

$$2\omega_{рез} < 2m \cdot \omega,$$

где $\omega_{рез} = 1/\sqrt{LC}$ рад/с — резонансная угловая частота, $\omega = 2\pi f$ — угловая частота.

20. Проверяем выходное напряжение выпрямителя

$$U_{он} = U_0 - \Delta U_{\phi} = U_0 - r_L \cdot I_o,$$

где r_L — активное сопротивление выбранного дросселя;
 $\Delta U_{\phi} = r_L \cdot I_o$ — падение напряжения на дросселе.

21. Находим абсолютную погрешность как разность между заданным и найденным значениями напряжения на нагрузке. После этого определяем относительную погрешность

$$\gamma = \frac{\Delta U_{\text{он}}}{U_0} \cdot 100\%.$$

Пример

1. Необходимо произвести расчет выпрямителя со следующими исходными данными: напряжение сети $U_1 = 220$ В, частота $f = 50$ Гц, ток нагрузки $I_{\text{он}} = 0,7$ А, напряжение $U_{\text{он}} = 60$ В, коэффициент пульсации нагрузки $K_{\text{п.н}} = 1,2\%$, рабочий диапазон температуры $\Delta T_{\text{окр}} = -60 \div +80^\circ\text{C}$.

2. Так как напряжение нагрузки $U_{\text{он}} = 60$ В, ток $I_{\text{он}} = 0,7$ А и мощность $P_{\text{он}} = I_{\text{он}} \cdot U_{\text{он}} = 0,7 \cdot 60 = 42$ В·А небольшие, то можно применить однофазную мостовую схему. Для достижения заданного коэффициента пульсации на входе фильтра параллельно нагрузке подключается конденсатор C_1 . Так как частота тока $f = 50$ Гц, то коэффициент пульсации на C_1 возьмем $K_{\text{п.вх}} = 15\%$.

3. Напряжение на входе выпрямителя

$$U_0 = U_{\text{он}} [1 + 0,01(\Delta U_{\phi} / U_{\text{он}})\%] = 60 [1 + 0,01 \cdot 9,45] = 65,6 \text{ В},$$

где $\Delta U_{\phi} / U_{\text{он}} = 9,45\%$ взято из табл. 18.1.

4. В соответствии с табл. 18.2 определяем основные параметры диода:

$$I_{\text{пр.н.п.}} = 3,5 \cdot I_0 = 3,5 \cdot 0,7 = 2,45 \text{ А};$$

$$I_{\text{пр.ср.}} = I_0 / 2 = 0,7 / 2 = 0,35 \text{ А};$$

$$U_{\text{обр.н.п.}} = 1,5 \cdot U_0 = 1,5 \cdot 65,6 = 98,4 \text{ В}.$$

В соответствии с этими значениями параметров по табл. 18.3 выбираем диод Д 231. Его основные параметры: $I_{\text{пр.ср.н.}} = 5 \text{ А} > I_{\text{пр.ср.}} = 0,35 \text{ А}$, $U_{\text{обр.н.макс.}} = 300 \text{ В} > U_{\text{обр.н.п.}} = 98,4 \text{ В}$, $U_{\text{пр.ср.}} = 1 \text{ В}$.

Так как параметры выбранного диода намного больше параметров выпрямителя, то в каждое плечо мостовой схемы подключаем по одному диоду. Схема выпрямителя будет иметь вид как на рис. 18.9.

5. Дифференциальное (внутреннее) сопротивление диодов (одного плеча).

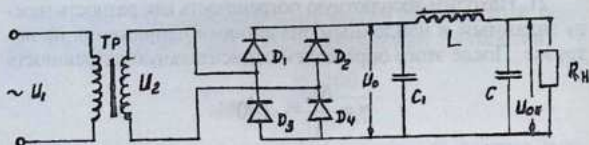


Рис. 18.9. К расчету выпрямителя с ёмкостной нагрузкой.

$$r_{\text{диф}} = \frac{U_{\text{пр ср}}}{3 \cdot I_{\text{пр ср}}} = \frac{1}{3 \cdot 0,35} = 0,96 \text{ Ом}.$$

6. Активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к вторичной обмотке:

$$r_{\text{тр}} = \frac{K_{\text{тс}} \cdot U_0}{I_0 \cdot f \cdot B} \sqrt{\frac{s \cdot f \cdot B}{U_0 \cdot I_0}} = \frac{3,5 \cdot 65,6}{0,7 \cdot 50 \cdot 1,38} \sqrt{\frac{1 \cdot 50 \cdot 1,38}{65,6 \cdot 0,7}} = 5,04 \text{ Ом}.$$

7. Активное сопротивление фазы выпрямителя

$$r_0 = 2 \cdot r_{\text{диф}} + r_{\text{тр}} = 2 \cdot 0,96 + 5,04 = 6,96 \text{ Ом}.$$

8. Индуктивность рассеяния обмоток трансформатора, приведенное к вторичной обмотке

$$= 1 \cdot K_L \frac{S \cdot U_0}{I_0 \cdot f \cdot B} \sqrt{\frac{U_0 \cdot I_0}{S \cdot f \cdot B}} = 1 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \frac{65,6 \cdot 1}{0,7 \cdot 50 \cdot 1,38} \sqrt{\frac{65,6 \cdot 0,7}{1 \cdot 50 \cdot 1,38}} = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

9. Соотношение между активным и реактивным сопротивлениями фазы выпрямителя

$$\varphi = \arctg \frac{\omega \cdot L_p}{r_0} = \arctg \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 6,1 \cdot 10^{-3}}{6,96} = \arctg 0,316; \varphi = 17^\circ.$$

10. Вспомогательный параметр A

$$A = \frac{I_0 \cdot \pi \cdot r_0}{m \cdot U_0} = \frac{0,7 \cdot 3,14 \cdot 6,96}{2 \cdot 65,6} = 0,109.$$

11. По табл. 18.4 находим коэффициенты В, Д и F.

$$B=1,12; D=2,0; F=5,0.$$

12. По табл. 18.5 находим коэффициент Н: $H=25000$.

П р и м е ч а н и е. При нахождении коэффициентов В, Д, F, Н необходимо применить метод интерполяции.

13. В соответствии с табл. 18.2 определяем значение повторяющегося импульсного прямого тока.

$$I_{\text{пр.п.}} = \frac{I_o \cdot F}{2} = \frac{0,7 \cdot 5}{2} = 1,75 \text{ A} < 5 \text{ A}.$$

14. В соответствии с табл. 18.2 определяем электрические параметры трансформатора:

$$U_2 = B \cdot U_0 = 1,12 \cdot 65,6 = 73,5 \text{ В}; \quad I_2 = D \frac{I_o}{\sqrt{2}} = 2 \frac{0,7}{1,41} = 1 \text{ А};$$

$$I_1 = n_{21} \cdot I_2 = \frac{U_2}{U_1} \cdot I_2 = \frac{73,5}{220} \cdot 1 = 0,33 \text{ А};$$

$$P_r = 1,5 \cdot P_o = 1,5 \cdot 65,6 \cdot 0,7 = 68,9 \text{ ВА}.$$

Согласно этим параметрам производится расчет трансформатора.

15. Проверяем диод по обратному напряжению

$$U_{\text{обр}} = \sqrt{2} \cdot U_2 = 1,41 \cdot 73,5 = 103,6 \text{ В} < 300 \text{ В}$$

Следовательно, диод выбран правильно.

16. Находим входную емкость фильтра

$$C_1 = \frac{100H}{K_{\text{н.вх}} \% \cdot r_o \cdot f} = \frac{100 \cdot 25000}{15 \cdot 6,50} = 477 \text{ мкф}.$$

По табл. 18.6 подбираем конденсатор К50-22 емкостью 470 мкф и напряжением 160 В. Определим коэффициент пульсации для этого конденсатора

$$K_{\text{н.вх}} = \frac{H \cdot 100}{r_o \cdot C \cdot f} = \frac{25000 \cdot 100}{6,96 \cdot 470 \cdot 50} = 15,2\%.$$

Номинальное напряжение выбранного конденсатора

$$U_{\text{сн}} = 160 \text{ В} > U_{\text{раз}} = \sqrt{2} \cdot U_2 = 1,41 \cdot 73,5 = 103,6 \text{ В}.$$

Коэффициент фильтрации фильтра

$$K_{\phi} = \frac{K_{\text{п.вх}} \%}{K_{\text{п.н.}} \%} = \frac{15,2}{1,2} = 12,5.$$

18. Произведение LC фильтра равно

$$L \cdot C = 10 (K_{\phi} + 1) / m^2 = 10 (12,5 + 1) / 4 = 33,3 \text{ Гн} \cdot \text{мкф}.$$

Индуктивность дросселя

$$L = \frac{L \cdot C}{C_1} = \frac{33,3}{470} = 0,071 \text{ Гн}$$

При этом с целью унификации берем $C = C_1 = 470 \text{ мкф}$. По табл. 18.7 подбираем дроссель с $L = 0,08 \text{ Гн}$, $r_L = 8,6 \text{ Ом}$.

19. Проверяем фильтр на отсутствие резонанса

$$2\omega \text{ рез} < 2 \cdot m \cdot \omega;$$

$$2 \cdot 1 / \sqrt{LC} < 2 \cdot \omega \cdot m;$$

$$2 \frac{1}{\sqrt{0,08 \cdot 470 \cdot 10^{-6}}} < 2 \cdot 2\pi f = 628.$$

$$332 < 628$$

Следовательно, в фильтре резонанса не будет.

20. Определяем действительное напряжение на нагрузке

$$U_{\text{он}} = U_0 - r_L \cdot I_0 = 65,6 - 8,6 \cdot 0,7 = 59,6 \text{ В}.$$

21. Относительная погрешность расчета

$$\gamma = \frac{\Delta U_{\text{он}}}{U_0} \cdot 100\% = \frac{U_0 - U_{\text{он}}}{U_0} = \frac{60 - 59,6}{60} \cdot 100\% = 0,66\%.$$

Таблица 18.2

Формулы расчета выпрямителя с емкостной нагрузкой

Параметры \ Схемы выпрямителей	Одно- фазная одно- полупе- риодная	Однофаз- ная двух- полупе- риодная со средней точкой	Одно- фазная двухпо- лупе- риодная мостовая	Трех- фазная одно- полу- пери- одная	Трех- фазная двухпо- лупериод- ная мос- товая
Параметр, связанный со схемой выпрямителя, m	1	2	2	3	6
Среднее значение прямого тока диода $I_{пр.ср}$	I_0	$I_0/2$	$I_0/2$	$I_0/3$	$I_0/3$
Повторяющееся импульсное обратное напряжение $U_{обратн}$	$3 U_0$	$3 U_0$	$1,5 U_0$	$3 U_0$	$1,5 U_0$
Повторяющийся импульсный прямой ток (приблизит) $I_{пр.и.п.}$	$1 \cdot I_0$	$3,5 I_0$	$3,5 I_0$	$2,3 \cdot I_0$	$1,15 \cdot I_0$
Повторяющийся импульсный прямой ток (уточненный) $I_{пр.и.у.}$	$I_0 \cdot F$	$\frac{I_0 \cdot F}{2}$	$\frac{I_0 \cdot F}{2}$	$\frac{I_0 \cdot F}{3}$	$\frac{I_0 \cdot F}{3}$
Параметр, связанный со схемой выпрямителя K_f	2,3	4,7	3,5	6,9	4,5
Активное сопротивление фазы выпрямителя r_{ϕ}	$r_{диф} + r_{тр}$	$r_{диф} + r_{тр}$	$2r_{диф} + r_{тр}$	$r_{диф} + r_{тр}$	$2r_{диф} + 2r_{тр}$
Параметр, связанный со схемой выпрямителя K_f	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
Действующее значение напряжения вторичной обмотки тр-ра U_2	$B U_0$	$B U_0$	$B U_0$	$B U_0$	$B \sqrt{\frac{U_0}{3}}$
Действующее значение тока во вторичной обмотке тр-ра I_2	$D I_0$	$\frac{D \cdot I_0}{2}$	$\frac{D \cdot I_0}{\sqrt{2}}$	$\frac{D \cdot I_0}{3}$	$\frac{D \cdot I_0}{3}$
Действующее значение тока в первичной обмотке тр-ра I_1	$n_{21} \sqrt{I_2^2 - I_0^2}$	$n_{21} \cdot I_2 \cdot \sqrt{2}$	$n_{21} \cdot I_2$	$n_{21} \cdot I_2 \cdot \frac{\sqrt{6}}{3}$	$n_{21} \cdot I_2$
Габаритная мощность тр-ра P_g	$2 \cdot P_0$	$1,8 \cdot P_0$	$1,5 \cdot P_0$	$2 P_0$	$1,2 \cdot P_0$
Полная мощность вторичной обмотки тр-ра P_2	$2,15 P_0$	$2,15 P_0$	$1,5 P_0$	$2,15 P_0$	$1,25 P_0$

Примечание. 1. $n_{21} = U_2 / U_1$.

2. В трехфазной мостовой схеме вторичная обмотка трансформатора соединяется в звезду.

Таблица 18.3.

Основные параметры выпрямительных диодов

Тип диода	Макс. средний прямой ток $I_{пр.ср. макс.}$	Макс. импульсное обратное напряж. $U_{пр.имп. макс.}$	Среднее прямое напряжение $U_{пр.ср.}$	Интервал рабочих температур, °C	Тип диода	Макс. средний прямой ток, $I_{пр.ср. макс.}$	Макс. импульсное обратное напр. $U_{обр.имп. макс.}$	Среднее прямое напр. $U_{пр.ср.}$	Интервал рабочих температур, °C
Д 7А	0,3	50	0,5	-60+ +60	Д 243 А	10,0	200	1,0	-60+ +125
Д 7В	0,3	150	0,5	-60+ +60	Д 245 А	10,0	300	1,0	-60+ +125
Д 7Д	0,3	300	0,5	-60+ +60	Д 246 А	10,0	400	1,0	-60+ +125
Д 7Ж	0,3	400	0,5	-60+ +60	Д 202 А	5,0	50	1,0	-60+ +130
Д 302	1,0	200	0,3	-60+ +60	Д 202 В	5,0	100	1,0	-60+ +130
Д 304	5,0	150	0,3	-60+ +60	Д 262 Д	6,0	200	1,0	-60+ +130
Д 305	10,0	50	0,35	-60+ +60	Д 202 Ж	5,0	300	1,0	-60+ +130
Д 207	0,1	200	1,0	-55+ +125	Д 262	5,0	400	1,0	-60+ +130
Д 209	0,1	400	1,0	-55+ +125	Д 202 М	5,0	500	1,0	-60+ +130
Д 211	0,1	600	1,0	-55+ +125	Д 202 Р	5,0	600	1,0	-60+ +130
Д 214 А	10,0	100	1,0	-60+ +130	Д 203 А	10,0	600	1,0	-60+ +100
Д 215	10,0	200	1,0	-60+ +130	Д 203 В	10,0	800	1,0	-60+ +100
Д 217	0,1	800	1,0	-60+ +125	Д 203 Д	10,0	1000	1,0	-60+ +100
МД 218	0,1	1000	1,0	-60+ +125	Д 266 А	10,0	400	1,35	-60+ +70
МД 218 А	0,1	1200	1,1	-60+ +125	Д 206 Б	10,0	500	1,35	-60+ +70
Д 226	0,25	300	1,0	-60+ +10	Д 206 В	10,0	600	1,35	-60+ +70
Д 229 л	0,5	400	1,0	-60+ +85	2 Д 206 А	5,0	400	1,35	-60+ +85

Окончание табл. 18.3

Д 231	5,0	300	1,0	-60++130	2 Д 206 Б	5,0	500	1,35	-60++85
Д 231 А	10,0	300	1,0	-60++130	2 Д 206 В	5,0	660	1,35	-60++85
Д 232	5,0	400	1,0	-60++130	2 Д 206 А	5,0	800	1,0	-60++100
Д 232 А	10,0	400	1,0	-60++130	2 Д 206 Б	10,0	800	1,0	-60++160
Д 232 Б	2,0	400	1,0	-60++130	2 Д 206 В	5,0	1000	1,0	-60++100
Д 233	5,0	500	1,0	-60++130	2 Д 206 Г	10,0	1000	1,0	-60++100
Д 234 Б	2,0	600	1,0	-60++130	2 Д 206 Б	10,0	20	0,6	-60++100
Д 242А	10,0	100	1,0	-60++125					

Таблица 18.4

Значения коэффициентов В, Д, F в зависимости
от коэффициента А и угла φ

А	В						D						F					
	φ°						φ°						φ°					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	0°	15°	30°	45°	60°	75°
0	0,7	0,7	0,72	0,73	0,75	0,76	4,2	4,0	3,5	2,8	2,6	2,3	15,0	14,0	12,0	11,0	10,0	8,0
0,02	0,82	0,84	0,87	0,89	0,92	1,01	2,62	2,48	2,35	2,25	2,18	1,95	8,6	7,4	7,0	6,3	5,7	5,0
0,04	0,91	0,92	0,94	0,97	1,04	1,16	2,35	2,25	2,2	2,07	1,94	1,82	7,0	6,4	5,9	5,2	4,7	4,15
0,06	0,97	1,00	1,02	1,06	1,15	1,27	2,25	2,2	2,06	1,97	1,85	1,78	6,2	5,9	5,3	4,7	4,3	3,9
0,08	1,04	1,06	1,08	1,14	1,22	1,38	2,15	2,05	1,97	1,85	1,80	1,75	5,85	5,5	5,0	4,5	4,0	3,75
0,10	1,10	1,12	1,15	1,21	1,31	1,44	2,10	2,0	1,9	1,83	1,75	1,7	5,45	5,1	4,85	4,2	3,9	3,7
0,12	1,16	1,18	1,21	1,29	1,4	-	2,05	1,95	1,88	1,80	1,70	1,63	5,15	4,95	4,6	4,05	3,8	3,6
0,14	1,20	1,23	1,27	1,36	1,48	-	2,0	1,9	1,85	1,77	1,68	1,62	4,95	4,85	4,4	4,0	3,7	3,45
0,16	1,26	1,29	1,34	1,43	-	-	1,95	1,85	1,8	1,74	1,67	1,6	4,75	4,7	4,2	3,9	3,6	3,3
0,18	1,32	1,35	1,40	-	-	-	1,92	1,87	1,78	1,72	1,65	1,58	4,6	4,5	4,1	3,85	3,5	3,2
0,20	1,37	1,41	1,47	-	-	-	1,88	1,85	1,75	1,7	1,62	1,55	4,5	4,4	4,0	3,8	3,4	3,15

Таблица 18.6

Параметры конденсаторов

Номи- нальные напря- жения, В	Электролитические конденсаторы			Оксидно-полупроводни- ковые конденсаторы	
	ТИП конденсатора и его номинальная емкость, мкф				
	К 50-3Б	К 50-22	К 50-24	К 53-1	К-53-1
15	-	1000, 2000,5000, 10000	47, 100, 470 1000, 2200, 4700 10000	0,068; 0,1; 0,15; 0,22; 0,33; 0,47; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8; 10; 15; 22; 33; 47;68	0,068; 0,1; 0,15; 0,22; 0,33;0,47; 0,68; 1,0; 1,5;2,2;3,3; 4,7; 6,8;10; 15; 22;
25	10,20,50,100, 200,500,1000	680,1000, 2000,4700, 6800	22,47,100, 220,470, 1000,2200, 4700		
30	-	-	-	0,33; 0,047; 0068; 0,1;0,15; 1; 1,1; 1,5; 2,12; 3,3;4,7; 6,8; 10; 15; 22; 33.	0,033; 0,047; 0,68; 0,10,15; 0,22; 0,33; 0,47; 0,1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,10;15; 22.
50	10,20,60, 100, 200	220, 470, 1000, 2200	-	-	
63	-	10, 22, 47, 100, 220,470, 1000, 2200	-	-	-
100	10,20,50,100, 200	100,220, 470,680	4,7,10,22, 47, 100; 220	-	
	2,5; 10, 20	47, 100, 220, 470	2,2; 4,7; 10; 22		
160	50, 200		47; 100, 200	-	-
250	20,50	-	-	-	-
450	2,5,10,20	-	2,5,10,20	-	-

Таблица 18.7

Унифицированные дроссели фильтров

№ дросселя	Индуктивность дросселя L Гн	Ток подмагничивания, А	Сопротивление обмотки, r_1 Ом	Тип магнитопровода	№ дросселя	Индуктивность дросселя	Ток подмагничивания А	Сопротивление обмотки, r_1 Ом	Тип магнитопровода
Д1	0,08	0,32	19	Шл6х12,5	Д52	0,01	12,5	0,86	Шл25х40
Д2	0,16	0,22	35,5		Д53	0,02	4,4	0,35	Шл 20х20
Д3	0,3	0,16	63,5		Д54	0,02	1,1	2,08	Шл 18х16
Д8	0,08	0,8	8,6	Шл8х16	Д55	0,02	0,56	4,2	Шл 6х6,5
Д9	0,16	0,4	19,0		Д56	0,0005	16,5	0,017	Шл12х25
Д10	0,3	0,28	33,0		Д57	1,2	0,8	26	Шл 20х40
Д16	0,08	0,8	4,65	Шл10х20	Д58	40	0,085	3000	Шл10х20
Д17	0,16	0,56	10,6		Д59	0,0043	2,9	0,3	Шл 12х16
Д18	0,3	0,4	19,0		Д60	0,0005	10,0	0,015	Шл16х20
Д26	0,08	1,1	4,0	Шл12х25	Д61	0,02	3,0	0,16	Шл 16х16
Д27	0,16	0,08	7		Д62	0,05	2,5	0,55	Шл 32х40
Д28	0,3	0,56	14,0		Д63	0,00125	0,56	0,12	Шл6х6,5
Д34	0,08	1,4	2,6	Шл16х16	Д64	0,08	0,1	12	Шл6х6,5
Д35	0,16	1,0	5,3		Д65	0,0025	0,56	0,36	Шл6х6,5
Д36	0,3	0,8	10,5		Д66	0,05	0,02	1,1	Шл10х10
Д43	0,08	2,2	1,85	Шл20х20	Д67	0,02	2	0,4	Шл6х12,5
Д44	0,16	1,6	3,7		Д68	0,008	1	1,1	Шл6х12,5
Д45	0,3	1,1	7,0		Д69	0,005	5,6	0,17	Шл16х16

Пример обозначения дросселя: Д8-0,08-0,56, где Д8—номер дросселя, 0,08—индуктивность в Гн, 0,56 — ток подмагничивания в А.

18.6.2. Расчет выпрямителей с индуктивной нагрузкой

Обычно выпрямители с индуктивной нагрузкой применяются при токах нагрузки более 1,0 ампера. В них фильтр начинается с дросселя.

Порядок расчета:

1. Задаются следующие исходные данные: напряжение U , сети и частота f , напряжение $U_{\text{он}}$ и ток $I_{\text{он}}$ нагрузки, коэффициент пульсации $K_{\text{п.н}}$, рабочий диапазон температур $\Delta T^{\circ}\text{C}$.

2. При выборе схемы выпрямителя пользуемся рекомендациями, данными выше. Для выбора схемы фильтра находим его коэффициент фильтрации

$$K_{\phi} = \frac{K_{\text{п.вх}}}{K_{\text{п.н}}},$$

где $K_{\text{п.вх}}$ — коэффициент пульсации выпрямителя, берется из табл. 18.9; $K_{\text{п.н}}$ — коэффициент пульсации на нагрузке.

При $K_{\phi} < 25$ берется однозвенный фильтр, при $K_{\phi} > 25$ берется многозвенный фильтр.

1. По табл. 18.8 находим падение напряжения на дросселе фильтра и определяем выходное напряжение выпрямителя по формуле

$$U_{\phi} = U_{\text{он}} + \Delta U_L,$$

где $U_{\text{он}}$ — напряжение на нагрузке (дается в задании); ΔU_L — падение напряжения на дросселе (находится по табл. 18.8).

Таблица 18.8

Значения падений напряжения на дросселе

P_{ϕ} В·А	$\Delta U_L (f = 50 \text{ Гц})$	$\Delta U_L (f = 400 \text{ Гц})$
10+30	$(0,2+0,14) U_{\text{он}}$	$(0,07+0,05) U_{\text{он}}$
30+100	$(0,14+0,1) U_{\text{он}}$	$(0,05+0,035) U_{\text{он}}$
100+300	$(0,1+0,07) U_{\text{он}}$	$(0,035+0,025) U_{\text{он}}$
300+1000	$(0,07+0,05) U_{\text{он}}$	$(0,025+0,018) U_{\text{он}}$
1000+3000	$(0,05+0,035) U_{\text{он}}$	$(0,018+0,012) U_{\text{он}}$
3000+10000	$(0,035+0,025) U_{\text{он}}$	$(0,012+0,009) U_{\text{он}}$

4. Согласно табл. 18.9. определяем основные параметры диода: $I_{\text{пр.ср.}}$ — прямой средний ток, $I_{\text{пр.н.п.}}$ — повторяющееся импульсное значение прямого тока, $U_{\text{обр.н.п.}}$ — повторяющееся импульсное значение обратного напряжения (уточняется после расчета выпрямителя).

По табл. 18.3 подбираем тип диодов. Если нет необходимого диода, то можно использовать имеющиеся, соединив их параллельно или последовательно (см. п. параграфа 18.6.1).

5. Находим активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к вторичной обмотке:

$$r_{\text{пр}} = \frac{K_r \cdot U_o}{I_o \cdot f \cdot B} \sqrt{\frac{S \cdot f \cdot B}{U_o \cdot I_o}},$$

где K_r — коэффициент, зависящий от схемы выпрямителя (берется из табл. 18.9), определение остальных величин этой формулы производится согласно п.6 параграфа 18.6.1 или дается в задании.

6. Определяем индуктивность рассеяния обмоток, приведенное к вторичной обмотке

$$L_c = 0,5 K_L \frac{S \cdot U_o}{I_o \cdot f \cdot B} \sqrt{\frac{U_o \cdot I_o}{S \cdot f \cdot B}},$$

где K_L — коэффициент, зависящий от схемы выпрямителя (берется из табл. 18.9). Остальные параметры брать согласно п.6,8 параграфа 18.6.1.

7. По табл. 18.9 находим падение напряжения на активном сопротивлении обмотки трансформатора.

8. По табл. 18.9 находим падение напряжения на реактивном сопротивлении обмотки трансформатора.

9. По табл. 18.9 находим падение напряжения на диоде.

10. Определяем напряжение холостого хода выпрямленного напряжения

$$U_{oc} = U_o + \Delta U_{\text{тр}} + \Delta U_x + \Delta U_{\text{д}} + \Delta U_L,$$

где $\Delta U_{\text{тр}}$ и ΔU_x — падения напряжения на активном и реактивном сопротивлениях обмотки трансформатора; $\Delta U_{\text{д}}$ — падение напряжения на диоде; ΔU_L — падение напряжения на дросселе фильтра.

11. Выбранный диод проверяем на обратное напряжение согласно формуле из табл. 18.9.

12. По формулам табл. 18.9 определяем параметры трансформатора: U_{2x} , I_2 , I_1 , P_1 . По этим параметрам производится расчет трансформатора.

13. Минимальное значение индуктивности дросселя фильтра определяется по формуле:

$$L_{\min} = \frac{2 U_0}{(m^2 - 1)m \cdot \pi \cdot f \cdot I_0},$$

где m — берется из табл. 18.9.

По найденному значению $L_{\min}$ из табл. 18.7 выбираем необходимый стандартный дроссель $L_{\text{ст.}}$

14. Находим произведение LC

$$L \cdot C = 10(K_\phi + 1)/m^2,$$

где K_ϕ — коэффициенты фильтрации фильтра.

15. По найденному значению $L \cdot C$ находим емкость конденсатора C

$$C = \frac{L \cdot C}{L_{\text{ст}}} \text{ мкф},$$

Из табл. 18.6 выбираем необходимый конденсатор.

16. Проверяем правильность найденного значения коэффициента фильтрации

$$K_\phi = \frac{L \cdot C \cdot m^2}{10} - 1.$$

17. Проверяем фильтр на отсутствие резонанса

$$2 \omega_{\text{рез}} < m \cdot \omega,$$

где $\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \omega = 2\pi f.$

18. Проверяем падение напряжения на выбранном дросселе

$$\Delta U_L = r_{L\text{ст}} \cdot I_0.$$

Если это значение падения напряжения меньше найденного ΔU_L по таблице то дроссель выбран правильно. В противном случае необходимо изменить напряжение холостого хода.

Таблица 18.9

Формулы расчета выпрямителя с индуктивной нагрузкой

Схемы выпрямителей	Однофазная двухполупериодная со средней точкой	Однофазная двухполупериодная мостовая	Трехфазная однополупериодная	Трехфазная двухполупериодная мостовая
Количество импульсов выпрямленного напряжения m	2	2	3	6
Среднее значение прямого тока диода $I_{\text{дср}}$	$\frac{I_0}{2}$	$\frac{I_0}{2}$	$\frac{I_0}{3}$	$\frac{I_0}{3}$
Повторяющийся импульсный прямой ток диода $I_{\text{двпн}}$	10	10	10	10
Повторяющееся импульсное обратное напряжение на диоде $U_{\text{обратн}}$	$3,14 U_0$	$1,57 U_0$	$2,1 U_0$	$1,05 U_0$
Параметр, зависящий от схемы выпрямления K_1	1	5,2	6,6	2,5
Параметр, зависящий от схемы выпрямления $L \cdot 10^{-1}$	5,5	6,4	3,3	1,0
Падение напряжения на активном сопротивлении обмотки тр-ра $\Delta U_{\text{акт}}$	$I_0 \cdot r_{\text{о}}$	$I_0 \cdot r_{\text{о}}$	$I_0 \cdot r_{\text{о}}$	$2I_0 \cdot r_{\text{о}}$
Падение напряжения на реактивном сопротивлении обмотки тр-ра $\Delta U_{\text{р}}$	$2 I_0 f L_{\text{р}}$	$2 I_0 \cdot f L_{\text{р}}$	$3 I_0 \cdot f L_{\text{р}}$	$6 I_0 \cdot f L_{\text{р}}$
Падение напряжения на диоде $\Delta U_{\text{д}}$	$U_{\text{дф}}$	$2 U_{\text{дф}}$	$U_{\text{дф}}$	$2 U_{\text{дф}}$
Напряжение вторичной обмотки тр-ра $U_{\text{вх}}$	$1,11 \cdot U_{\text{вх}}$	$1,11 U_{\text{вх}}$	$0,855 U_{\text{вх}}$	$0,43 U_{\text{вх}}$
Ток вторичной обмотки тр-ра I_2	$0,71 I_0$	I_0	$0,58 I_0$	$0,82 I_0$
Ток первичной обмотки I_1	$n_{21} \cdot I_0$	$n_{21} \cdot I_0$	$1,47 \cdot n_{21} \cdot I_0$	$0,82 \cdot n_{21} \cdot I_0$
Габаритная мощность тр-ра $P_{\text{г}}$	$1,34 \cdot U_{\text{вх}} \cdot I_0$	$1,11 \cdot U_{\text{вх}} \cdot I_0$	$1,35 \cdot U_{\text{вх}} \cdot I_0$	$1,05 \cdot U_{\text{вх}} \cdot I_0$
Полная мощность вторичной обмотки тр-ра P_2	$1,57 \cdot U_{\text{вх}} \cdot I_0$	$1,11 \cdot U_{\text{вх}} \cdot I_0$	$1,5 \cdot U_{\text{вх}} \cdot I_0$	$1,05 \cdot U_{\text{вх}} \cdot I_0$
Коэффициент пульсации $K_{\text{п.п.}}, \%$	67	67	25	5,7

Примечание. U_{ox} — напряжение холостого хода выпрямителя; η_{21} — коэффициент трансформации трансформатора.

Пример

1. Требуется произвести расчет выпрямителя с индуктивной нагрузкой по следующим исходным данным:

Напряжение и частота тока сети $U_1=220$ В, $f=50$ Гц, напряжение и ток нагрузки $U_{on}=10$ В, $I_{on}=6$ А, коэффициент пульсации $K_{пн}=2,7\%$, рабочий диапазон температуры $\Delta T=-60+80^\circ\text{C}$.

2. Так как напряжение $U_{on}=10$ В и мощность $P_{on}=I_{on} \cdot U_{on}=6 \cdot 10=60$ ВА малы и ток $I_{on}=6$ А > 1 А, то выбираем однофазную двухполупериодную схему выпрямителя со средней точкой. Так как $I_{on}=6$ А > 1 А, то входным элементом фильтра выбираем дроссель. Коэффициент фильтрации фильтра

$$K_{\phi} = \frac{K_{п.вх}}{K_{пн}} = \frac{67}{2,7} \approx 24,8.$$

Так как $K_{\phi}=24,8 < 25$, то выбираем однозвенный фильтр LC.

3. По табл. 18.8 определяем падение напряжения на дросселе фильтра

$$\Delta U_L = U_{on} \cdot 0,12 = 10 \cdot 0,12 = 1,2 \text{ В.}$$

Выходное напряжение выпрямителя равно:

$$U_0 = U_{on} + \Delta U_L = 10 + 1,2 = 11,2 \text{ В.}$$

4. В соответствии с табл. 18.9 определяем основные параметры диода:

среднее значение прямого тока диода

$$I_{пр.ср.} = \frac{I_o}{2} = \frac{6}{2} = 3 \text{ А.}$$

Повторяющийся импульсный прямой ток

$$I_{пр.и.п.} = I_{on} = 6 \text{ А.}$$

Повторяющееся импульсное обратное напряжение

$$U_{обр.и.п.} = 3,14 \cdot U_0 = 3,14 \cdot 11,2 = 35,17 \text{ В.}$$

По табл. 18.3 выбираем диод Д 242. Его основные параметры:

- максимальный средний ток $I_{м.пр.} = 10 \text{ A} > 3 \text{ A}$;
- максимальное импульсное обратное напряжение $U_{обр.и.м.} = 100 \text{ В} > 35,17 \text{ В}$;
- среднее прямое напряжение $U_{пр.ср} = 1 \text{ В}$.

Так как основные параметры диода больше основных параметров выпрямителя, то в каждом плече схемы подключаются по одному диоду (рис. 18.10).

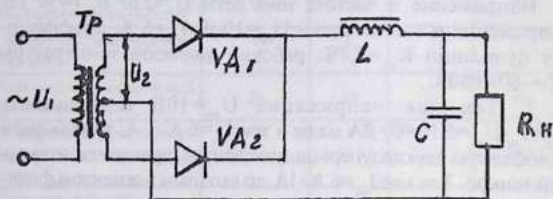


Рис. 18.10. К расчету выпрямителя с индуктивной нагрузкой.

Определяем активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к вторичной обмотке.

$$r_{пр} = \frac{k_r \cdot U_o}{I_o \cdot f \cdot B} \sqrt{\frac{S \cdot f \cdot B}{U_o \cdot I_o}} = \frac{7 \cdot 11,2}{6 \cdot 50 \cdot 1,4} \sqrt{\frac{1 \cdot 50 \cdot 1,4}{11,2 \cdot 6}} = 0,183 \text{ Ома.}$$

6. Определяем индуктивность рассеяния обмоток трансформатора, приведенное к вторичной обмотке

$$L_c = 1 \cdot K_L \frac{S \cdot U_o}{I_o \cdot f \cdot B} \sqrt{\frac{U_o \cdot I_o}{S \cdot f \cdot B}} = 5,5 \frac{10^{-3} \cdot 11,2}{6 \cdot 50 \cdot 1,4} \sqrt{\frac{11,2 \cdot 6}{1 \cdot 50 \cdot 1,4}} = 0,143 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

коэффициент $S=1$.

7. Падение напряжения на активном сопротивлении обмотки трансформатора

$$\Delta U_{пр} = I_o \cdot r_{пр} = 6 \cdot 0,183 = 1,10 \text{ В.}$$

8. Падение напряжения на реактивном сопротивлении

$$\Delta U_x = 2 \cdot I_o \cdot f \cdot L_s = 2 \cdot 6 \cdot 50 \cdot 0,143 \cdot 10^{-3} = 0,0858 \text{ В.}$$

9. Падение напряжения на диодах

$$\Delta U_{пр} = U_{пр} = 1 \text{ В.}$$

10. Величина выпрямленного напряжения при холостом ходе.

$$U_{ox} = U_o + \Delta U_{тр} + \Delta U_x + \Delta U_{пр} + \Delta U_L = 11,2 + 1,1 + 0,0858 + 1 + 1,2 = 14,586 \text{ В.}$$

11. Проверяем выбранный диод по обратному напряжению

$$U_{обр.и.п.} = 3,14 \cdot U_{ox} = 3,14 \cdot 14,586 = 45,8 < 100 \text{ В.}$$

Следовательно, диод подобран правильно.

12. По табл. 18.9 определяем параметры трансформатора: напряжение вторичной обмотки

$$U_2 = 1,11 \cdot U_{ox} = 1,11 \cdot 14,586 = 16,19 \text{ В.}$$

Ток вторичной обмотки

$$I_2 = 0,71 \cdot I_o = 0,71 \cdot 6 = 4,26 \text{ А.}$$

Коэффициенты трансформации

$$n_{21} = U_{2c} / U_1 = 16,19 / 220 = 0,0736;$$

ток первичной обмотки

$$I_1 = n_{21} \cdot I_o = 0,0736 \cdot 6 = 0,441 \text{ А.}$$

Габаритная мощность трансформатора

$$P_t = 1,34 \cdot U_{ox} \cdot I_o = 1,34 \cdot 14,586 \cdot 6 = 117,27 \text{ В А.}$$

Минимальная индуктивность дросселя

$$L_{min} = \frac{2U_o}{(m^2 - 1) \cdot m \cdot \pi \cdot f \cdot I_o} = \frac{2 \cdot 11,2}{(2^2 - 1) \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 6} = 0,004 \text{ Гн.}$$

По табл. 18.7 выбираем стандартный дроссель Д52. Его параметры: индуктивность $L_{ст} = 0,01 \text{ Гн}$, ток $I = 12,5 \text{ А}$ активное сопротивление $r_L = 0,086 \text{ Ом}$.

14. Произведение LC

$$LC = \frac{10(K_\phi + 1)}{m^2} = \frac{10(24,8 + 1)}{4} = \frac{258}{4} = 64,8 \text{ Гн} \cdot \text{мкф}.$$

15. Емкость конденсатора

$$C = \frac{L \cdot C}{L_{ст}} = \frac{64,8}{0,01} = 6480 \text{ мкф}.$$

По табл. 18.6 выбираем конденсатор К50-22. Его параметры: емкость $c = 6800 \text{ мкф}$, рабочее напряжение

$$U_{раб} = 25 \text{ В} > \sqrt{2} \cdot U_{ox} = \sqrt{2} \cdot 14,586 = 20,56 \text{ В.}$$

16. Проверяем правильность найденного значения коэффициента фильтрации

$$K_{\phi} = \frac{L \cdot C \cdot m^2}{10} - 1 = \frac{0,01 \cdot 6800 \cdot 4}{10} - 1 = 26,2 > 24,8.$$

Следовательно, значения L и C найдены правильно.

17. Проверяем фильтр на отсутствие резонанса

$$2\omega_{\text{рез}} < m \cdot \omega,$$

где

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0,01 \cdot 6800 \cdot 10^{-6}}} = 122 \text{ рад/с};$$

$$m\omega = 2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 628 \text{ рад/с}.$$

так как $2 \cdot \omega_{\text{рез}} = 2 \cdot 122 = 244 < 628$, резонанса в фильтре не будет.

18. Падение напряжения в выбранном дросселе

$$\Delta U_L = r_L \cdot I_0 = 0,086 \cdot 6 = 0,516 \text{ В} < 1,2 \text{ В}.$$

Следовательно, изменять напряжение холостого хода U_{2x} во вторичной обмотке не надо.

18.6.3. Расчет выпрямителя с активной нагрузкой без фильтра

В этих выпрямителях в большинстве случаев используются многофазные выпрямители. Порядок расчета аналогичен расчету выпрямителя с индуктивной нагрузкой. Формулы расчетов приведены в табл. 18.10. Поэтому данный выпрямитель рассмотрим на примере.

Пример

1. Исходные данные: напряжение сети $U_1 = 220 \text{ В}$, частота $f = 50 \text{ Гц}$, выпрямленное напряжение $U_o = 110 \text{ В}$, ток нагрузки $I_o = 9 \text{ А}$, коэффициент пульсации $K_{\text{п.н}} = 10\%$, рабочий режим температуры $\Delta T^{\circ}\text{C} = -60 \div +80^{\circ}\text{C}$.

2. Так как мощность нагрузки $P_o = U_o \cdot I_o = 110 \cdot 9 = 990 \text{ ВА}$ и коэффициент пульсации $K_{\text{п.н}} = 10\%$, то выбираем трехфазную двухполупериодную мостовую схему (схему Ларионова, см. схему на рис. 18.5).

3. По табл. 18.10 находим основные параметры диода:

Среднее значение прямого тока

$$I_{\text{пр.ср}} = I_{0/3} = 9/3 = 3 \text{ А.}$$

Повторяющийся импульсный прямой ток

$$I_{\text{пр.и}} = 1,05 \cdot I_0 = 1,05 \cdot 9 = 9,45 \text{ А.}$$

Повторяющееся импульсное обратное напряжение

$$U_{\text{обр.и}} = 1,05 \cdot U_{\text{ох}} = 1,05 \cdot 1,2 \cdot U_0 = 138,6 \text{ В.}$$

При этом для определения $U_{\text{обр.и}}$ предварительно вместо $U_{\text{ох}}$ взято значение $1,2 \cdot U_0$.

По табл. 18.3 выбираем диод Д215 А. Его основные параметры:

максимальный средний прямой ток

$$I_{\text{м.пр}} = 10 \text{ А;}$$

максимальное импульсное обратное напряжение

$$U_{\text{м.обр}} = 200 \text{ В;}$$

среднее прямое напряжение $U_{\text{пр.ср}} = 1 \text{ В;}$

рабочий диапазон температуры: $-60 \div +130^\circ \text{C}$;

схемы выпрямителя приведена на рис. 18.5.

4. Определяем активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное к вторичной обмотке:

$$r_{\text{пр}} = K_r \frac{U_0}{I_0 \cdot f \cdot B} \sqrt{\frac{S \cdot f \cdot B}{U_0 \cdot I_0}} = 2,5 \frac{110}{9 \cdot 50 \cdot 1,3} \sqrt{\frac{3 \cdot 50 \cdot 1,3}{110 \cdot 9}} = 0,315 \text{ Ом.}$$

Значение В взято из табл.7.1.

5. Определяем индуктивность рассеяния обмоток трансформатора, приведенное к вторичной обмотке:

$$L_{\text{р}} = 1 \cdot K_L \frac{S \cdot U_0}{I_0 \cdot f \cdot B} \sqrt{\frac{U_0 \cdot I_0}{S \cdot f \cdot B}} = 10^{-3} \frac{3 \cdot 110}{9 \cdot 50 \cdot 1,3} \sqrt{\frac{110 \cdot 9}{3 \cdot 50 \cdot 1,3}} = 0,84 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

6. Падение напряжения на активном сопротивлении обмотки трансформатора

$$\Delta U_{\text{тр}} = 2 \cdot I_0 \cdot r_{\text{тр}} = 2 \cdot 9 \cdot 0,315 = 5,64 \text{ В.}$$

7. Падение напряжения на реактивном сопротивлении обмотки трансформатора

$$\Delta U_{\text{х}} = 6 \cdot I_0 \cdot f \cdot L_{\text{р}} = 6 \cdot 9 \cdot 50 \cdot 0,84 \cdot 10^{-3} = 2,27 \text{ В.}$$

8. Падение напряжения на диодах

$$\Delta U_{\text{пр}} = 2 \cdot U_{\text{пр}} = 2 \cdot 1 = 2 \text{ В.}$$

9. Выпрямленное напряжение холостого хода

$$U_{\text{ох}} = U_0 + \Delta U_{\text{тр}} + \Delta U_{\text{ох}} + \Delta U_{\text{пр}} = 110 + 5,64 + 2,27 + 2 = 119,91 \text{ В.}$$

10. Обратное напряжение на диоде

$$U_{обр} = 1,05 \cdot U_{ох} = 1,05 \cdot 119,91 = 125,9 \text{ В} < 200 \text{ В.}$$

Следовательно диод выбран правильно.

По формулам табл. 18.10 находим параметры трансформатора:

напряжение вторичной обмотки

$$U_{2х} = 0,43 \cdot U_{ох} = 0,43 \cdot 119,91 = 51,56 \text{ В;}$$

ток вторичной обмотки

$$I_2 = 0,82 \cdot I_0 = 0,82 \cdot 9 = 7,38 \text{ А;}$$

коэффициент трансформации

$$n_{21} = U_{2х} / U_1 = 51,56 / 220 = 0,238;$$

габаритная мощность трансформатора

$$P_r = 1,05 \cdot U_{ох} \cdot I_0 = 1,05 \cdot 119,91 \cdot 9 = 1132,9 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

По этим параметрам рассчитывается трансформатор.

Таблица 18.10

Формулы расчета выпрямителя с активной нагрузкой без фильтра

Схемы выпрямителя	Однофазная однополупериодная	Однофазная двухполупериодная со средней точкой	Однофазная двухполупериодная мостовая	Трехфазная однополупериодная	Трехфазная двухполупериодная мостовая (схема Лариона)
Параметры					
Число импульсов выпрямленного напряжения, m	1	2	2	3	6
Среднее значение прямого тока диода, $I_{дпр}$	I_0	$I_0/2$	$I_0/2$	$I_0/3$	$I_0/3$
Повторяющийся импульсный прямой ток диода, $I_{дпрв}$	$3,14 \cdot I_0$	$1,57 \cdot I_0$	$1,57 \cdot I_0$	$1,21 \cdot I_0$	$1,05 \cdot I_0$
Повторяющееся импульсное обратное напряжение диода, $U_{добрв}$	$3,14 \cdot U_{ох}$	$3,14 \cdot U_{ох}$	$1,57 \cdot U_{ох}$	$2,1 \cdot U_{ох}$	$1,05 \cdot U_{ох}$

Коэффициент схемы выпрямителя, K_r	5.2	7	5.2	6.6	2.5
Коэффициент схемы выпрямителя, $K_{\text{нп-3}}$	12	5.5	6.4	3.3	1.0
Падение напряжения на активном сопротивлении обмотки тр-ра, $\Delta U_{\text{акт}}$	$I_0 r_{\text{оп}}$	$I_0 r_{\text{оп}}$	$I_0 r_{\text{оп}}$	$I_0 r_{\text{оп}}$	$2I_0 r_{\text{оп}}$
Падение напряжения на индуктивном сопротивлении обмотки тр-ра, $\Delta U_{\text{инд}}$	$(I_0 \pi f L_p)^2 / U_{\text{н}}$	$2I_0 f L_p$	$2I_0 f L_p$	$3I_0 f L_p$	$6I_0 f L_p$
Падение напряжения на диоде, $\Delta U_{\text{д}}$	$U_{\text{оп}}$	$U_{\text{оп}}$	$2U_{\text{оп}}$	$U_{\text{оп}}$	$2U_{\text{оп}}$
Напряжение вторичной обмотки, $U_{\text{в}}$	$2.22 U_{\text{н}}$	$1.11 U_{\text{н}}$	$1.11 U_{\text{н}}$	$0.855 U_{\text{н}}$	$0.43 U_{\text{н}}$
Ток вторичной обмотки, I_2	$1.57 I_0$	$0.785 I_0$	$1.11 I_0$	$0.58 I_0$	$0.82 I_0$
Ток первичной обмотки, I_1	$1.21 I_0 n_{21}$	$1.11 I_0 n_{21}$	$1.11 I_0 n_{21}$	$0.58 I_0 n_{21}$	$0.82 I_0 n_{21}$
Габаритная мощность тр-ра, P_r	$3.1 P_0$	$1.49 P_0$	$1.23 P_0$	$1.37 P_0$	$1.05 P_0$
Полная мощность обмотки тр-ра, P_s	$3.5 P_0$	$1.74 P_0$	$1.23 P_0$	$1.51 P_0$	$1.05 P_0$
Коэффициент пульсации выпрямителя $K_{\text{пульс}} \%$	157	67	67	25	5,7

Примечание: $U_{\text{н}}$ — выпрямленное напряжение холостого хода; n_{21} — коэффициент трансформации; $U_{\text{ф}}$ — фазное напряжение в многофазных системах; P_0 — минимальная габаритная мощность вторичной обмотки.

ГЛАВА 19

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Электронным усилителем называется устройство, в котором, изменяя небольшой входной сигнал, можно с помощью внешнего источника питания изменять большие выходные сигналы. В настоящее время в электронных усилителях в качестве усилительного элемента в основном применяются транзисторы. Поэтому в этой главе будут рассмотрены полупроводниковые усилители. Основными параметрами усилителей являются:

1. Коэффициент усиления—отношение приращения выходного параметра к соответствующему приращению входного параметра. Например, по напряжению:

$$K_u = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}}. \quad (19.1)$$

В многокаскадных усилителях общий коэффициент усиления

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \dots K_n.$$

$K_1, K_2, \dots, K_n$ —коэффициенты усиления каскадов.

Воспринимаемое человеческим ухом изменение звука пропорционально логарифму изменения энергии звука. Поэтому коэффициент усиления в большинстве случаев выражается в логарифмических единицах бел (Б). Один бел соответствует $K=10$. На практике чаще пользуются в 10 раз меньшей единицей, называемой децибел:

$$1Б = 10дБ = 10 \lg 10. \quad (19.2)$$

Таким образом, коэффициент усиления по напряжению в децибелах

$$K_{дБ} = 10 \lg \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}}. \quad (19.3)$$

Соответственно коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен

$$K_{\text{дБ}} = K_{1 \text{ дБ}} + K_{2 \text{ дБ}} + K_{3 \text{ дБ}} + \dots + K_{\text{дБ}}.$$

Коэффициент усиления по мощности равен

$$K_{\text{раБ}} = 20 \lg \left(\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} \right). \quad (19.4)$$

Действительно,

$$K_{\text{раБ}} = 10 \lg \left(\frac{\Delta P_{\text{вых}}}{\Delta P_{\text{вх}}} \right) = 10 \lg \left(\frac{\Delta U_{\text{вых}}^2}{\Delta U_{\text{вх}}^2} \right) = 20 \lg \left(\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} \right),$$

так как $P = U^2/R$.

2. Выходная мощность, выделяемая на нагрузку.

$$P_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}^2 / R_{\text{н}} = U_{\text{н}}^2 / 2R_{\text{н}}. \quad (19.6)$$

Обычно пользуются величиной, называемой номинальной выходной мощностью. Максимальная мощность нагрузки, при которой погрешности усилителя не выходят за допустимые пределы, называется номинальной выходной мощностью.

3. Коэффициент полезного действия — это отношение выходной мощности к мощности электрической энергии, потребляемой усилителем.

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{н}}} \quad (19.6)$$

где $P_{\text{н}}$ — мощность электрической энергии, потребляемой усилителем.

4. Частотные искажения формы электрического сигнала, связанные с тем, что усилитель на разных частотах усиливает сигнал неодинаково.

5. Фазовые искажения фазы выходного сигнала по отношению к фазе входного сигнала. Они связаны с наличием в усилителях индуктивностей и емкостей.

19.1. Предварительный каскад усилителя низкой частоты

Усилители, основанные на биполярных транзисторах, собираются обычно по схеме с общим эмиттером (рис.19.1). Для нормальной работы транзистора необходимо между эмиттером и базой подать постоянное напряжение примерно 0,5 В, называемое напряжением смещения. Для получения этого напряжения обычно пользуются делителем напряжения R_1 , R_2 . Величины сопротивлений R_1 и R_2 находятся из следующих формул

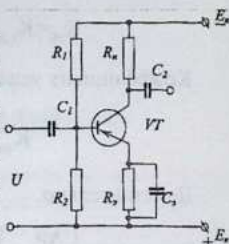


Рис. 19.1. Предварительный каскад усилителя низкой частоты.

$$R_1 = \frac{E - U_{бэ}}{I_б + I_а} \approx \frac{E}{I_б + I_а}; R_2 = U_{бэ} / I_а, \quad (19.8)$$

где E — э.д.с. источника; $U_{бэ}$ — напряжение между базой и эмиттером; $I_б$ — ток базы; $I_а$ — ток делителя.

Конденсатор C_1 пропускает на вход усилителя только переменную составляющую входного сигнала. Резистор R_n , являясь нагрузкой коллектора, служит для выделения выходного сигнала. При изменении входного сигнала изменяется ток коллектора и падение напряжения на нагрузке. В результате изменяется выходной сигнал.

При изменении температуры изменяется ток транзистора. Например, при повышении температуры увеличивается ток транзистора. В результате изменяется рабочий режим транзистора. Для уменьшения влияния изменения температуры применяется схема температурной стабилизации. В приведенной схеме эту задачу выполняет резистор R_e . Падение напряжения на этом резисторе $U_e = I_e R_e$ и U напряжение делителя $U_а = I_а R_2$ направлены противоположно друг другу. Поэтому напряжение эмиттер—база будет равно их разнице $U_{бэ} = U - U_e$.

Следовательно, резистор R_3 создает отрицательную обратную связь по постоянному току. Например, при повышении температуры увеличивается ток транзистора, что ведет к увеличению U_3 . Это ведет к уменьшению напряжения смещения базы и тока транзистора. Конденсатор C_3 , соединенный параллельно R_3 , создает обратную связь по переменному току. На рабочих частотах усиленного сигнала сопротивление конденсатора должно быть намного меньше R_3 , т.е. $X_c \ll R_3$. Поэтому переменная составляющая усиленного сигнала проходит через C_3 , не падая на R_3 .

Конденсатор C_2 пропускает на вход следующего каскада только переменную составляющую выходного сигнала первого каскада.

Расчет данного каскада можно также выполнить графическим путем (рис. 19.2). Для этого пользуемся входными и выходными характеристиками транзистора, соединенного по схеме с ОЭ. При известных сопротивлении на-

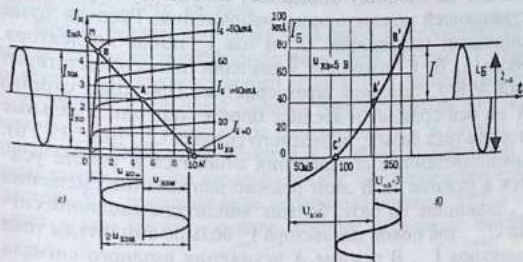


Рис. 19.2. Работа каскада транзисторного усилителя с общим эмиттером: а) выходные характеристики транзистора; б) входные характеристики транзистора.

грузки R_k и напряжении источника э.д.с. E_k начертим нагрузочную линию. Напряжение источника падает на коллекторном переходе и нагрузке в цепи коллектора R_k :

$$E_k = U_{k\kappa} + I_k \cdot R_k, \quad (19.9)$$

где $U_{k\kappa}$ — падение напряжения в коллекторном переходе; I_k — ток коллектора.

При токе коллектора, равном нулю ($I_k = 0$),

$$E_k = U_{кз} + I_k \cdot R_k = U_{кз}, \text{ т.е.}$$

все напряжение падает на коллекторном переходе.

Если $U_{кз} = 0$, то

$$E_k = U_{кз} + I_k \cdot R_k = I_k \cdot R_k,$$

отсюда

$$I_k = \frac{E_k}{R_k}. \quad (19.10)$$

Отложив в масштабе $U_{кз}$ на оси абсцисс ток I_k , на оси ординат находим точки N и M. Соединив их, получим нагрузочную линию MN (рис.19.2 а), которая пересекает выходные характеристики транзистора. На нагрузочной линии выбираем рабочую часть исходя из минимально допустимых искажений. Этому соответствует отрезок BC. При изменении входного сигнала по синусоиде рабочая точка будет находиться на середине BC (точка А). Проекция отрезка BA на абсциссу определяет амплитуду переменной составляющей коллекторного напряжения. Рабочая точка А определяет напряжение $U_{кз}$ и ток $I_{кз}$ покоя коллектора. Точкам А, В, С выходной характеристики соответствуют точки А', В', С' входной характеристики. Проекция отрезка В'А' на оси ординат и абсцисс определяют максимальные значения тока базы $I_{бм}$ и входного сигнала $U_{взм}$ (рис. 19.2 б).

Приведенные определения относятся к работе усилителя в режиме А. В этом режиме напряжение смещения поданное на базу, больше амплитуды входного сигнала $U_{взм}$, ток покоя коллектора $I_{кз}$ больше амплитуды тока коллектора $I_{км}$. В режиме А искажения входного сигнала наименьшими, но и коэффициент усиления будет также маленьким. В этом режиме работают усилители напряжения и маломощные выходные каскады.

19.2. Многокаскадные транзисторные усилители

Если для получения необходимого коэффициента усиления одного каскада недостаточно, то применяют многокаскадные усилители. При этом выходной сигнал предыдущего каскада подается на вход последующего каскада. На рис. 19.3 приведена схема двухкаскадного усилителя с резистивно-емкостной связью. Через конденсатор C_2 на вход

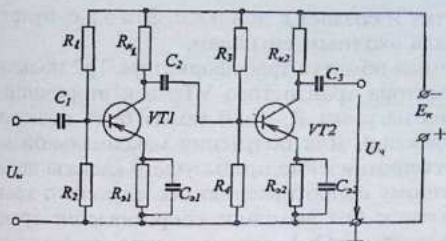


Рис. 19.3. Двухкаскадный транзисторный усилитель с резистивно-емкостной связью.

второго каскада подается только переменная составляющая выходного сигнала первого каскада. Конденсатор C_3 подает на нагрузку только переменную составляющую выходного сигнала второго каскада. Задачи остальных элементов схемы такие же, как у разобранных в параграфе 19.2. предварительного каскада.

Кроме резистивно-емкостной связи в усилителях применяется также трансформаторная связь. На рис. 19.4 приведена схема двухкаскадного усилителя с трансформаторной связью. Первичная обмотка трансформатора TP_1 подключена в цепь коллектора транзистора VT_1 и служит его нагрузкой. Вторичная обмотка TP_1 через конденсатор C_2 подключена на вход второго каскада. Ток коллектора транзистора VT_1 проходит через первичную обмотку TP_1 и создает в нем магнитное поле, которое пересекает вторич-

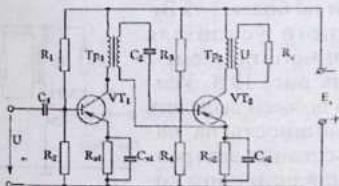


Рис. 19.4. Двухкаскадный транзисторный усилитель с трансформаторной связью.

ную обмотку и создает в ней э.д.с. Эта э.д.с. будет для второго каскада входным сигналом.

Первичная обмотка трансформатора Tr_2 подключается в цепь коллектора транзистора VT_2 , а к вторичной обмотке подключена нагрузка R_n (или может быть подключен вход третьего каскада). Для получения максимальной мощности выходное сопротивление предыдущего каскада должно быть равно входному сопротивлению последующего каскада. Однако, в схеме с ОЭ выходное сопротивление транзисторов большое (десятки кОм), входное сопротивление небольшое (сотни Ом). Поэтому выходной сигнал предыдущего каскада замыкается на малое сопротивление и передает ему малую мощность. При применении трансформаторной связи подбирая необходимый коэффициент трансформации, можно согласовать выходное сопротивление предыдущего каскада с входным сопротивлением последующего каскада. Кроме того, трансформаторная связь дает возможность применения источников тока с низкими напряжениями. Причиной этого является то, что падение напряжения в первичной обмотке меньше, чем на нагрузочном сопротивлении R_n .

19.3. Выходной каскад низкочастотного усилителя

В качестве выходного каскада применяются обычно усилители мощности. К ним в качестве нагрузки могут быть подключены электромагнитное реле, электродвигатели или другие исполнительные механизмы. Транзисторные усилители мощности могут быть однотактными и двухтактными. Одноактные усилители мощности применяются при выходной мощности не более 3–5 Вт.

Схема одноактного усилителя мощности, собранного по схеме с ОЭ, приведена на рис. 19.5. Усилитель мощности должен выделять максимальную мощность на нагрузке. Для согласования внутреннего сопротивления источника колебаний и сопротивления нагрузки применяется согласующий трансформатор. При каждой на-

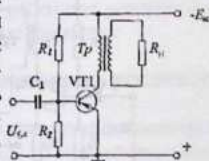


Рис. 19.5. Однотактный усилитель мощности.

грузке коэффициент трансформации трансформатора должен быть таким, чтобы на нагрузке выделялась максимальная мощность. Известно, что коэффициент трансформации трансформатора $K_T = U_1/U_2$ и $I_1/I_2 = 1/K_T$.

Следовательно, $U_1 = U_2 \cdot K_T$ и $I_1 = I_2/K_T$.

Таким образом,

$$R'_n = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2 \cdot K_T}{I_2/K_T} = \frac{U_2}{I_2} K_T^2 = R_n \cdot K_T^2, \quad (19.11)$$

где U_1 и U_2 — напряжения первичной и вторичной обмоток трансформатора; I_1 и I_2 — токи первичной и вторичной обмоток трансформатора; K_T — коэффициент трансформации трансформатора; R'_n — сопротивление нагрузки, приведенное к первичной обмотке.

Таким образом,

$$K_T = \sqrt{R'_n / R_n}. \quad (19.12)$$

Для получения больших выходных мощностей применяются двухтактные выходные каскады (рис. 19.6). Эти усилители могут работать в режиме усиления В. Как видно из гра-

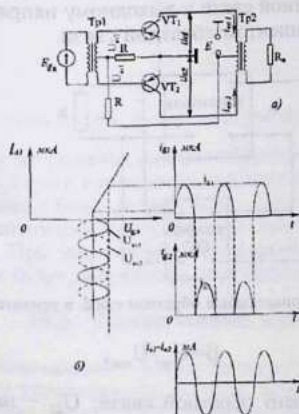


Рис. 19.6. Двухтактный усилитель мощности: а) схема; б) график работы.

фигов (рис. 19.6 б) входные сигналы $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$ сдвинуты между собой на 180° . Поэтому в данный момент времени один из транзисторов открыт, а другой закрыт, и транзисторы пропускают токи поочередно. Через вторичную обмотку трансформатора и нагрузку R_n проходит сумма токов от обоих транзисторов. Соответственно и выходная мощность в два раза больше, чем в однотактном усилителе. Постоянные составляющие коллекторных токов $I_{к01}$ и $I_{к02}$ направлены встречно. Поэтому в трансформаторе $Tr2$ подмагничивание отсутствует, что позволяет уменьшить габариты и вес трансформатора по сравнению с одноактной схемой.

19.4. Обратная связь в усилителях

Обратной связью называется подача части выходного сигнала на вход. Если направления сигнала обратной связи и входного сигнала совпадают, такую обратную связь называют положительной. В противном случае она называется отрицательной обратной связью. В усилителях используется отрицательная обратная связь. Функциональная схема усилителя с обратной связью показана на рис. 19.7. Отношение напряжения обратной связи к выходному напряжению называется коэффициентом обратной связи.



Рис. 19.7. Отрицательная обратная связь в усилителях.

$$\beta = U_{ос} / U_{вых}, \quad (19.13)$$

где β — коэффициент обратной связи; $U_{ос}$ — напряжение обратной связи; $U_{вых}$ — выходное напряжение усилителя.

При отрицательной обратной связи входной сигнал будет равен разности напряжений самого сигнала и обратной связи

$$U_{вх} = U_{сиг} - U_{ос}. \quad (19.14)$$

При отрицательной обратной связи коэффициент усиления усилителя меньше, чем в усилителе без обратной связи:

$$K_{ос} = \frac{K}{1 + K \cdot \beta}. \quad (19.15)$$

где K — коэффициент усиления без обратной связи; $K_{ос}$ — коэффициент усиления с обратной связью. Отрицательная обратная связь стабилизирует коэффициент усиления. Уменьшаются частотные, фазовые и нелинейные искажения. Схема усилителя с отрицательной обратной связью показана на рис. 19.8.

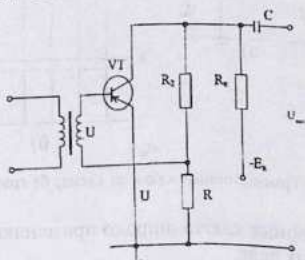


Рис. 19.8. Схема усилителя с отрицательной обратной связью.

При этом напряжение сигнала обратной связи берется с резистора $R_св$. Если с изменением входного сигнала увеличивается потенциал базы, то потенциал коллектора уменьшается. Это уменьшение через обратную связь подается на базу транзистора. При этом напряжение входного сигнала и обратной связи будут направлены друг против друга.

19.5. Транзисторный ключ

Схема, включающая и отключающая цепь нагрузки под воздействием управляющего сигнала, называется транзисторным ключом. На рис. 19.9. приведена схема простейшего транзисторного ключа. Активная нагрузка $R_к$ подключена в

цепь коллектора. Управляющие импульсы на базу транзистора VT1 подаются через резистор R_b . При отсутствии импульсов (на схеме 19.9 б промежутки времени $0-t$, t_1-t_2) эмиттерный переход закрыт, ток коллектора равен нулю. Поэтому падение напряжения на R_k также будет равно нулю. Напряжение коллектора будет равно напряжению источника — E_k . При подаче на вход схемы отрицательных импульсов транзистор открывается и по цепи коллектора проходит ток. Почти все напряжение источника подает на R_k , а напряжение коллектора практически будет равно нулю.

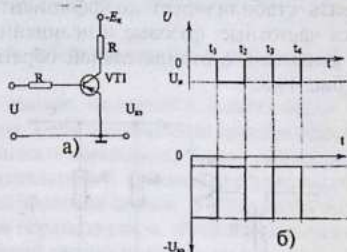


Рис. 19.9. Транзисторный ключ: а) схема; б) график работы.

Транзисторные ключи широко применяются в качестве бесконтактных реле.

ГЛАВА 20

ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Электронным генератором называется устройство, преобразующее энергию источника постоянного тока в незатухающие электрические колебания необходимой формы и частоты.

По способу возбуждения генераторы бывают независимого возбуждения и с самовозбуждением (автогенераторы). Генераторы независимого возбуждения усиливают колебания посторонних источников. Автогенераторы при помощи положительной обратной связи создают незатухающие колебания. Автогенераторы бывают генераторами синусоидального колебания и импульсными генераторами. Генераторы синусоидальных колебаний разделяются на генераторы типа LC и RC.

20.1. Транзисторный LC-автогенератор

На рис. 20.1. представлена схема транзисторного автогенератора с индуктивной связью. Конденсатор C_k и катушка L_k образуют параллельный колебательный контур.

Конденсатор C_k заряжается через резистор R_1 и транзистор VT. После заряда конденсатор C_k разряжается через катушку L_k . Магнитное поле этой катушки пересекает катушку обратной связи L_{∞} и создает в ней э.д.с., которая подается в цепь база-эмиттер транзистора VT. Транзистор открывается, конденсатор C_k вновь заряжается и

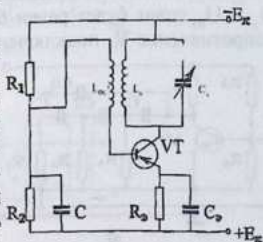


Рис. 20.1. Схема транзисторного LC-генератора.

т.д. В результате в цепи коллектора и база-эмиттер возникают незатухающие гармонические колебания с частотой

$$f_0 = \frac{I}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Так как обратная связь положительна, переменная составляющая тока коллектора усиливает колебания контура. Это приводит к увеличению переменной составляющей входного напряжения через катушку L_{∞} . Для получения незатухающих колебаний в контуре положительная обратная связь должна быть сильной. Поэтому катушка обратной связи располагается на одном каркасе с L_{∞} или рядом с ней. Кроме того, фазы входного сигнала (на базе) и выходного (на коллекторе) должны быть сдвинутыми между собой на 180° .

20.2. Транзисторный RC-автогенератор

LC-генераторы применяются на частотах свыше 20 кГц, так как ниже этих частот габариты контура LC увеличиваются. Поэтому на частотах ниже 20 кГц применяются RC-генераторы (рис.20.2). Вместо колебательного контура в этой схеме подключен резистор, являющийся нагрузкой коллектора. Положительная обратная связь осуществляется при помощи 3-х цепочек RC. Напряжение коллектора состоит из активной U_{R1} и реактивной составляющей U_{C1} . Ток I_1 по фазе опережает по фазе напряжение U_{C1} на 90° и совпадает с U_{R1} . Величины R_1 и C_1 можно подобрать такими, что между U_{κ} и U_{R1} сдвиг будет равен 60° . (рис.20.2 б). На активное сопротивление R_1 подключена цепь $R_2 C_2$. Величины R_2 и

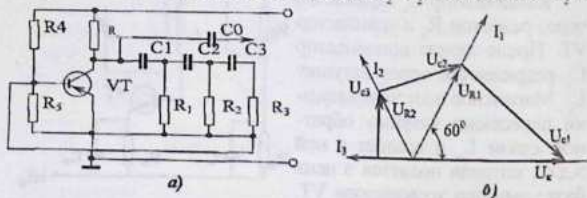


Рис. 20.2. Схема транзисторного RC-генератора:
а) схема; б) векторная диаграмма.

C_2 можно подобрать такими, чтобы сдвиг между U_{R1} и U_{R2} был равен 60° . В результате сдвиг фаз между U_k и U_{R3} будет равен 180° . Таким образом, выходное напряжение U_{R3} будет в противофазе входному напряжению U_k , тем самым создается положительная обратная связь. Если выполняется условие $C_1=C_2=C_3=C$ и $R_1=R_2=R_3=R$, то частота колебаний генератора находится из выражения

$$f_0 = 1/2\pi \cdot \sqrt{6R \cdot C} . \quad (20.1)$$

20.3. Генератор импульсов пилообразного напряжения

В некоторых электронных устройствах, например, в электронных осциллографах, управляемых тиристорных выпрямителях применяются импульсы пилообразного напряжения. Транзисторная схема такого генератора показана на рис. 20.3 а. Первоначально транзистор VT открыт и находится в насыщенном состоянии. Поэтому напряжение на коллекторе и конденсаторе C_2 равно 0. В момент времени t_1 (рис. 20.3 б) при подаче на базу положительного импульса

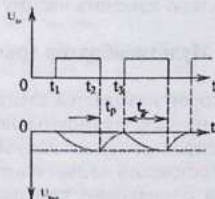
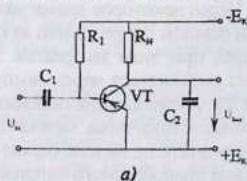


Рис. 20.3. Транзисторный генератор импульсов пилообразного напряжения: а) схема; б) график напряжения.

транзистор закрывается и конденсатор C_2 начинает заряжаться. Напряжение на конденсаторе возрастает в форме пилы. В конце запускающего импульса (в момент времени t_2) транзистор открывается, и конденсатор разряжается через эмиттер-коллектор транзистора, который входит в режим насыщения. Далее процесс повторяется. На рис. 20.4 а показана схема генератора импульсов пилообразного напряжения на неоновой лампе.

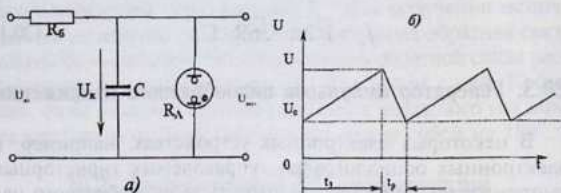


Рис. 20.4. Генератор импульсов пилообразного напряжения на неоновой лампе: а) схема; б) график напряжения.

При подаче напряжения конденсатор C заряжается через балластное сопротивление R_0 , и напряжение на нем возрастает (рис. 20.4 б). Через некоторое время напряжение конденсатора становится равным напряжению зажигания U_3 неоновой лампы, которая при этом загорается. После этого конденсатор начинает разряжаться через лампу. Разряд конденсатора продолжается до напряжения гашения лампы. При этом лампа гаснет и конденсатор вновь заряжается. Далее процесс повторяется. В результате на выходе схемы появляются незатухающие импульсы пилообразного напряжения. Изменяя величины R_0 и C , можно изменять частоту импульсов.

20.4. Мультивибратор (рис. 20.5)

Мультивибратором называется электронный генератор, генерирующий импульсы прямоугольной формы. Наиболее широкое распространение получил симметричный мультивибратор, состоящий из двух одинаковых половин. В них используются одинаковые транзисторы, одинаковые резисторы $R_{k1}=R_{k2}$, $R_1=R_2$ и конденсаторы $C_1=C_2$. Однако, при подаче напряжения питания из-за наличия положи-

тельной обратной связи начнется процесс генерации, т.е. при увеличении тока в одном транзисторе, в другом он уменьшается. Например, начал увеличиваться ток коллектора транзистора VT_1 . Это ведет к увеличению падения напряжения на R_{k1} и приращению положительного потенциала на коллекторе VT_1 . Однако на конденсаторе напряжение мгновенно измениться не может. Поэтому это приращение прикладывается к базе транзистора VT_2 , запирая его. Это ведет к уменьшению тока коллектора VT_2 , уменьшению падения напряжения на R_{k2} и увеличению отрицательного потенциала коллектора VT_2 . Этот отрицательный потенциал через конденсатор C_2 подается на базу VT_1 , уско-

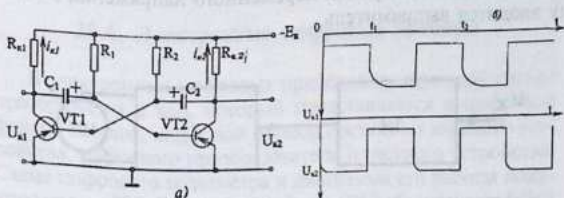


Рис. 20.5. Транзисторный мультивибратор:
а) схема; б) график напряжения.

рая его открытие. Этот процесс происходит лавинообразно и в результате транзистор VT_1 откроется, а VT_2 закроется.

Мультивибратор переходит в одно из своих временных устойчивых состояний. Описанные процессы на графике рис. 20.5 б соответствуют моменту времени $t=0$. После этого конденсатор C_2 начинает заряжаться по цепи $+E_k$, эмиттер-база VT_1 , C_2 , R_{k2} и $-E_k$ до напряжения E_k . Конденсатор C_1 разряжается через резистор R_2 и транзистор VT_1 . В момент времени t_1 знаки напряжений конденсаторов меняются. В результате этого транзистор VT_2 отпирается, а VT_1 запирается. Таким образом, переходя из одного устойчивого состояния в другое, на выходе мультивибратора формируется напряжение почти прямоугольной формы. Это напряжение можно снимать с коллектора любого транзистора.

20.5. Электронные аналоговые приборы

Эти приборы состоят из электронного преобразователя и магнитоэлектрического прибора. Они служат для измерения напряжения, частоты и других электрических величин. Они обладают большим входным сопротивлением и большой чувствительностью. На рис. 20.6 показана функциональная схема электронного вольтметра. Высокоомный делитель ДН обеспечивает большое входное сопротивление прибора и изменение пределов измерения. Усилитель усиливает измеряемое напряжение, повышая чувствительность прибора. Магнитоэлектрический прибор МП измеряет напряжение. Для измерения переменного напряжения в схему вводится выпрямитель.

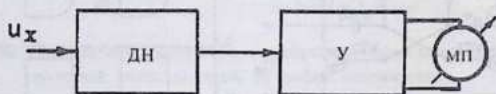


Рис. 20.6. Функциональная схема электронного вольтметра.

Схема измерителя частоты показана на рис. 20.7. Преобразователь П преобразует неизвестной частоты переменное напряжение в прямоугольные импульсы одинаковой амплитуды. Частота импульсов равна частоте измеряемого

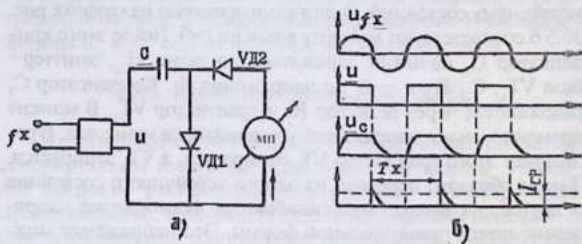


Рис. 20.7. Измеритель частоты: а) схема; б) рабочая диаграмма.

напряжения. При нарастании импульса конденсатор C заряжается через диод VD_1 .

При спаде импульса конденсатор разряжается через диод VD_2 на магнитоэлектрический прибор МП (рис.20.6 б). Среднее значение разрядного тока определяется из следующего выражения:

$$I_{cp} = qf_x = C \cdot U_c \cdot f_x,$$

где C — емкость конденсатора, $q = C \cdot U$ — заряд конденсатора, U — напряжение конденсатора, f_x — неизвестная частота. При неизменных значениях C и U ток прямо пропорционален f_x . Таким образом, если шкалу прибора отградуировать в частоте, то неизвестную частоту можно измерять непосредственно.

20.6. Электронные цифровые приборы

В электронных цифровых приборах измеряемый сигнал преобразуется в код, который представляется в цифровой форме. Вообще, цифровой прибор состоит из входного устройства, цифрового преобразователя и счетного устройства. Схема цифрового вольтметра и диаграмма его работы показаны на рис. 20.8. Входное устройство (ВУ) обеспечивает большое входное сопротивление прибора. Управляющее устройство запускает генератор линейно измеряющего напряжения (ГЛИН). Напряжение этого генератора и измеряемое напряжение подаются на сравнивающее устройство CY_1 . Одновременно импульсы ГЛИНа подаются на сравнивающее устройство CY_2 . Когда напряжение ГЛИНа и измеряемое напряжение будут равны друг другу, а также когда напряжение ГЛИНа будет равно 0, сравнивающие устройства

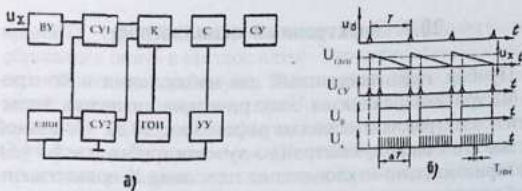


Рис. 20.8. Цифровой вольтметр: а) функциональная схема; б) рабочая диаграмма

выдают сигналы U_{cy} , которые открывают ключ К. В результате импульсы образцового генератора (ГОИ) через ключ подаются на счетное устройство (СУ). Время ΔT открытого состояния ключа определяется от момента, когда напряжение ГЛИНа и измеряемое напряжение равны, до момента, когда напряжение ГЛИНа будет равно 0 (на диаграмме U_x). Число импульсов, проходящих через ключ за время ΔT , пропорционально величине измеряемого напряжения.

$$\Delta T = N \cdot T_{ron} = \frac{N}{f_{ron}}, \quad (20.2)$$

где N — число импульсов за время ΔT .

$$U_x = \Delta T \cdot \operatorname{tg} \beta$$

где β — угол, определяющий скорость изменения напряжения ГЛИН.

Таким образом,

$$U_x = \Delta T \cdot \operatorname{tg} \beta = \frac{N}{f_{ron}} \cdot \operatorname{tg} \beta$$

или

$$N = \frac{U_x \cdot f_{ron}}{\operatorname{tg} \beta} = K \cdot U_x,$$

где $K = \frac{f_{ron}}{\operatorname{tg} \beta}$ т.к. f_{ron} и $\operatorname{tg} \beta$ не изменяются.

Следовательно, число импульсов пропорционально величине неизвестного напряжения.

20.7. Электронный осциллограф

Прибор, предназначенный для наблюдения и контроля быстро изменяющихся электрических сигналов, называется электронным осциллографом (рис. 20.9). Основной частью его является электронно-лучевая трубка (см. § 14.6). На горизонтально-отклоняющие пластины Х подается пилообразное напряжение развертки. На вертикально-отклоняющие пластины У подается проверяемое напряжение. Пе-

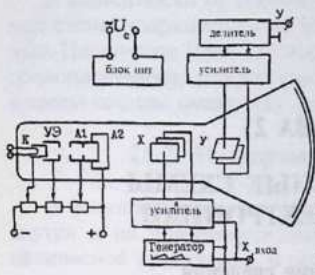


Рис. 20.9. Электронный осциллограф.

риод пилообразного напряжения должен быть равным или в целое число раз больше периода исследуемого напряжения. В начальный момент времени, когда напряжение пилообразной формы равно U_0 на экране появляется светлое пятно. С ростом пилообразного напряжения пятно вырастает в горизонтальную линию слева направо за время $T_{пр}$. Это движение называется прямым ходом луча.

Напряжение развертки (пилообразное напряжение), достигнув максимума, резко уменьшается до U_0 за

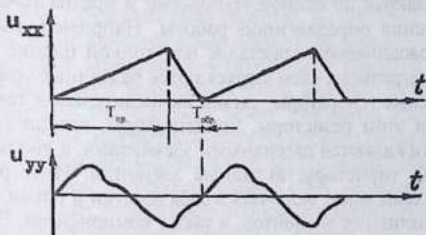


Рис. 20.10. Графики напряжений, подаваемых на отклоняющие пластины осциллографа.

время $T_{обр}$ (рис.20.10). При этом луч движется справа налево, обращаясь опять в светлое пятно. Это перемещение называется обратным ходом луча. Этот процесс происходит с частотой напряжения развертки. При подаче исследуемого напряжения на вертикальные пластины луч перемещается в вертикальном направлении. При одновременной подаче напряжения развертки на пластины X, исследуемого напряжения—на Y, на экране осциллографа получим полную развертку исследуемого напряжения.

ГЛАВА 21

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

21.1. Общие сведения

Одним из основных направлений развития электроники является уменьшение массы и размеров электронной аппаратуры. Большие изменения в этом направлении связаны с интегральными микросхемами. Интегральные микросхемы изготавливаются по единой технологии и предназначены для выполнения определенной работы. Например, на одном полупроводниковом кристалле или тонкой пленке в качестве интегральных схем выпускаются различные усилители, импульсные генераторы, схемы вычислительной техники и т.д. При этом резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности являются пассивными элементами, а диоды, транзисторы, тиристоры — активные элементы. Интегральные микросхемы могут включать в себя десятки и сотни пассивных и активных элементов, а также компонентов. Элемент представляет часть ИМС (диод, транзистор, резистор и др.), выполненных неразрывно с кристаллом и его нельзя рассматривать как самостоятельное изделие. Компонент также является частью ИМС, но его можно выделить как самостоятельное комплектующее изделие (например, бескорпусные диоды, транзисторы в гибридной интегральной схеме).

Уровень развития ИМС определяется с помощью показателя, называемого уровнем интеграции, который представляет собой суммарное число элементов и компонентов N , входящих в ИМС. Десятичный логарифм от уровня интеграции, округленный до ближайшего большего целого числа, называется степенью интеграции $K = \lg N$. В соответствии с этой формулой ИМС с числом элементов и компонентов до 10 является ИМС 1-ой степени интеграции, если $N = 11 \div 100$, то $K = 2$ и т.д.

В зависимости от технологии изготовления интегральные схемы подразделяют на полупроводниковые и пленочные. Пленочные ИМС, в свою очередь, подразделяются на тонкопленочные, толстопленочные и гибридные, которые в своем составе имеют как элементы, так и компоненты.

21.2. Полупроводниковые ИМС

В полупроводниковых ИМС все элементы выполнены внутри и на поверхности полупроводниковой подложки, называемой кристаллом. В качестве кристалла обычно используется пластинка кремния, толщиной 30-50 мкм. Площадь кристалла бывает обычно от 1,5х1,5 до 6х6 мм. На поверхности или в объеме этих пластинок путем введения примесей создаются различные элементы ИМС.

Причиной применения кремния при изготовлении полупроводниковых ИМС является то, что он при высоких температурах сохраняет свои свойства. Кроме того, при нагревании в кислородной среде образуется диоксид кремния SiO_2 , который защищает р-п-переходы от внешних воздействий и выполняет роль диэлектрика. В основе формирования элементов на подложке лежит планарная технология. Эта технология даёт возможность групповым методом обрабатывать одновременно несколько десятков подложек с сотнями и тысячами полупроводниковых ИМС на каждой. Групповой метод даёт возможность экономии и применения стандартизации производства. Элементы, изготовленные по планарной технологии, имеют плоскую структуру: р-п-переходы и соответствующие контактные площадки выходят на одну плоскость подложки. После окончания технологического цикла подложки разрезают алмазным резцом или лазерным лучом на отдельные кристаллы, представляющие собой полупроводниковые ИМС. Элементы в кристалле изолированы друг от друга р-п-переходами, подключенными под обратное напряжение. Кремниевый переход при обратном напряжении имеет очень высокое сопротивление (несколько мОм), которое и выполняет роль изоляции.

Наиболее сложными и часто применяемыми элементами полупроводниковых ИМС являются транзисторы. На рис. 21.1. показано поперечное сечение биполярного транзисто-

ра типа р-п-р. Эмиттер и база представляют собой прямоугольники, что обеспечивает рациональное использование площади кристалла. По двум сторонам эмиттера имеются контакты для присоединения к базе. Контакт к коллекторной области выполнен в виде прямоугольной рамки с разрывом, через который проходят металлизированные дорожки к эмиттеру и базе. Граница между коллектором п-типа

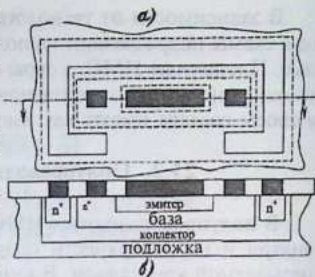


Рис. 21.1. Интегральный биполярный транзистор: а) топология; б) поперечное сечение.

и подложкой р-типа и границы двух других переходов выходят на поверхность пластины под окисной пленкой (на рис. 21.1. показаны пунктиром). Многослойные устройства транзисторов с несколькими р-п-переходами изготавливаются путем диффузии в кристалл кремния донорных или акцепторных примесей. В большинстве случаев для изготовления полупроводниковых ИМС используются планарно-диффузионные и планарно-эпитаксиальные методы.

В качестве диодов применяются биполярные транзисторы в диодном включении, что является удобным для производства (рис. 21.2. а,б). У диодов с использованием коллекторного перехода обратное напряжение будет наи-

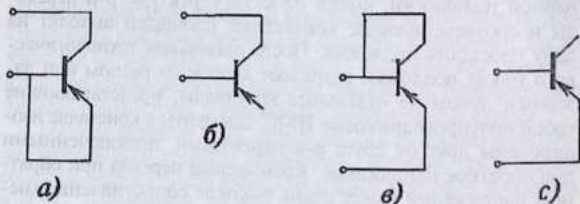


Рис. 21.2. Схемы применения интегральных биполярных транзисторов в качестве диодов: а, б) использование в качестве диодов коллекторного перехода; в,г) использование в качестве диода эмиттерного перехода.

большим. У диодов с использованием эмиттерного перехода будет малый обратный ток и большое быстродействие.

Резисторы в полупроводниковых ИМС представляют собой тонкий слой полупроводника, образованный при диффузии и изолированный от остальной части кристалла. Такие резисторы называются диффузионными. Они изготавливаются, как правило, одновременно с изготовлением одной из областей транзистора. Резисторы с малым сопротивлением создают при получении эмиттера, резисторы со средним сопротивлением — при получении базы, резисторы с большим сопротивлением — при получении коллектора. На рис. 21.3, а показан резистор, выполненный при изготовлении базы. n -слой служит для изоляции глубиной примерно 3 мкм p -слой определяет сопротивление резистора. На рис. 21.3, б показан резистор, выполненный при изготовлении коллектора. Изменяя толщину эпитаксиального слоя, можно по-

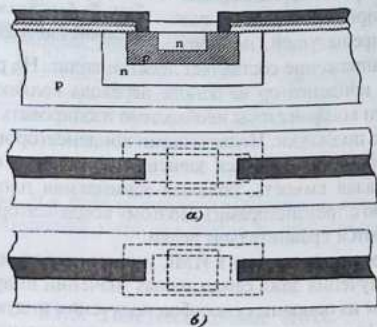


Рис. 21.3. Диффузионные резисторы, изготавливаемые при создании базы (а), коллектора (б).

лучить резисторы с различными сопротивлениями. Температурный коэффициент сопротивления у диффузионных резисторов бывает большим. Максимальное напряжение резисторов ограничивается напряжением пробоя p - n -перехода. Максимальная мощность резисторов составляет 0,1–0,25 Вт. В качестве переменных сопротивлений могут быть использованы полевые транзисторы, в которых, изменяя напряжение затвора, можно изменять сопротивление канала.

В качестве конденсатора в ИМС используется зарядная емкость, диффузионная емкость и емкость МДП-структуры. Интегральные конденсаторы формируются преимущественно на основе зарядных (барьерных) емкостей эмиттерного, коллекторного р-п-переходов биполярных транзисторов. (рис. 21.4). Конденсатор на эмиттерном переходе (рис. 21.4 а) имеет наибольшую емкость и наименьшее пробивное напряжение (единицы вольт). Емкость конденсатора на коллекторном переходе примерно в шесть раз меньше предыдущей, но пробивное напряжение составляет десятки вольт. На рис. 21.4 в

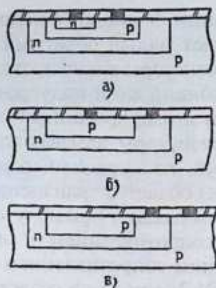


Рис. 21.4. Интегральные конденсаторы, основанные на переходах: а) эмиттер-база; б) база-коллектор; в) коллектор-подложка.

приведен конденсатор на основе перехода коллектор-подложка. Эти конденсаторы необходимо изолировать от других элементов подложки. Недостатками конденсаторов на основе р-п-переходов являются зависимость емкости от напряжения, малая емкость, большая занимаемая площадь (по сравнению с транзисторами). Поэтому конденсаторы в ИМС используются сравнительно редко.

Еще реже используют в ИМС индуктивность из-за трудности получения даже самых малых значений индуктивности. Одним из основных способов получения индуктивности является нанесение на поверхность окисла кремния металлических спиралей. Изготавливать такие катушки просто, но они обладают малой индуктивностью. Например, плоская катушка с 20 витками с наружным диаметром 0,8 мм на частоте 80 МГц обладает индуктивностью 4,5 мкГ.

После изготовления всех элементов необходимо выполнить межэлементные соединения, а также контактные площадки. Для этого окисленную поверхность кремниевой пластины покрывают слоем осажденного алюминия толщиной 0,5-2 мкм, который после заключительной операции стравливается в ненужных местах. На поверхности полупровод-

ника остается требуемый рисунок алюминиевых проводников шириной около 10 мкм и контактные площадки. Контактные площадки с выводами корпуса соединяются в большинстве случаев с помощью золотых проволочек диаметром 25-50 мкм ультразвуковой или термокомпрессионной сваркой. На рис. 21.5. показан монтаж ИМС, на рис. 21.6. показана часть ИМС (транзисторный ключ).

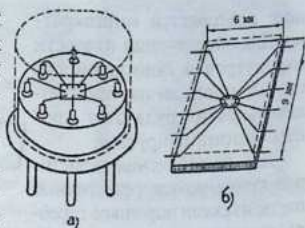


Рис. 21.5. Монтаж ИМС:

- а) в круглом корпусе;
- б) в плоском корпусе.

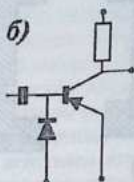
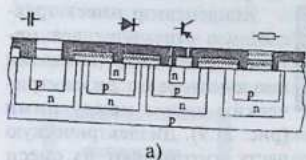


Рис. 21.6. Часть интегральной полупроводниковой схемы (транзисторный ключ): а) в разрезе; б) электрическая схема.

21.3. Толсто пленочные ИМС

При толщине пленки 1 мкм и более ИМС считается толсто пленочной. Обычно применяются пленки толщиной несколько десятком микрон. В качестве подложки применяются специальное стекло (ситал), керамика или кварц. На подложку методом трафаретной печати наносится нижний слой (рис. 21.7). После этого трафарет убирается и нанесенный рисунок подвергается нагреванию до 600-900°C. Толщина слоя рисунка зависит от толщины трафарета. Затем накладывается следующий трафарет и наносится слой другой пасты. При изготовлении сложных схем этот про-

цесс повторяется многократно. Для обеспечения точности параметров и повторяемости схемы, повышения производительности труда этот процесс автоматизируется.

Для изготовления резисторов применяются резистивные пасты из смеси порошков серебра, палладия и стекла (рис. 21.8). Изменяя содержание стекла можно изменять сопротивление резистора. По конструкции резисторы изготавливаются в виде прямоугольной формы. С повышением частоты сопротивление резисторов уменьшается.

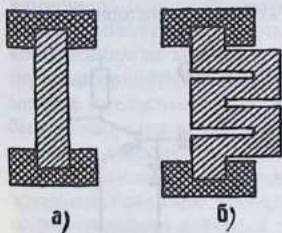


Рис. 21.8. Резисторы: а) мал-
лого сопротивления; б) боль-
шого сопротивления.

риала обкладок чаще всего при-
меняют алюминий.

Катушки индуктивности, трансформаторы, конденсаторы большой емкости в толсто-
пленочных ИМС выполняются на-
весными.

21.4. Тонкопленочные ИМС

Принято считать ИМС тон-
копленочной если толщина
пленки не более 1 мкм.

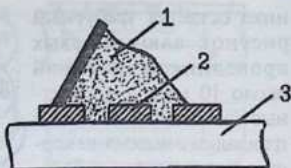


Рис. 21.7. Нанесение пасты на подложку: 1) паста;
2) трафарет; 3-подложка.

Конденсатор имеет трех-
слойную структуру: два ме-
таллических слоя (обкладки
конденсатора) с диэлектри-
ческим слоем между ними
(рис. 21.9). Диэлектрическую
пасту изготавливают из смеси
порошков титанита и сегне-
токерамики. В качестве мате-

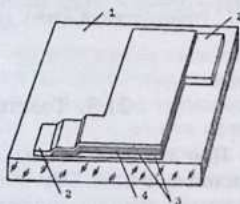


Рис. 21.9. Толсто-пленочный
конденсатор: 1) подложка;
2-контактная площадка;
3-диэлектрический слой.

В качестве подложки для тонкопленочных схем используют стекло, керамику, ситалл. Для создания тонкой пленки на подложке используются методы вакуумного напыления, катодного распыления, химического осаждения, анодирования. При методе вакуумного напыления испаряемый металл осаждается на поверхности подложки, покрывая его тонким слоем (рис. 22.10). Экран, установленный между металлом и подложкой, притягивает молекулы, не попавшие на подложку.

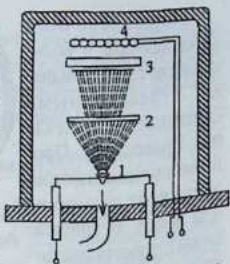


Рис. 21.10. Схема вакуумного напыления: 1-испаряемый металл; 2-экран; 3-подложка; 4-нагреватель подложки.

Меняя металл и трафарет, можно за один цикл операций изготовить большое количество проводников, резисторов, конденсаторов. Для крепкого соединения подложки и пленки подложка нагревается специальным нагревателем.

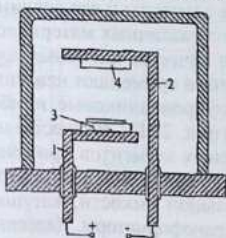


Рис. 21.11. Схема катодного дугового напыления: 1-анод; 2-катод; 3-подложка; 4-металл.

При катодном распылении (рис. 21.11) инертный газ в камере под действием высокого напряжения ионизируется. Положительные ионы газа ударяются об катод (металл) и выбивают из него атомы, которые движутся к аноду (подложке), оседают на ней, образуя тонкую пленку.

Для изготовления резисторов применяются нихром, тантал, титан, кермет (смесь металла с керамикой). Для уменьшения

пределов изменения сопротивлений готовых резисторов предусмотрена их подгонка. Наиболее распространенными методами подгонки являются: подгонка с помощью струи воздуха, содержащей частицы окиси алюминия (абразивная подгонка), термическая и лазерная. Тонкопленочные резисторы изготавливаются в виде прямоугольной формы.

Тонкопленочные конденсаторы в большинстве случаев бывают трехслойными (проводник-диэлектрик-проводник). Проводники чаще изготавливаются из алюминия или меди. В качестве диэлектрика используют окислы металлов и сернистые соединения: SiO_2 , TiO_2 и легкоплавкие стекла. Их толщина примерно равна 0,05 мкм.

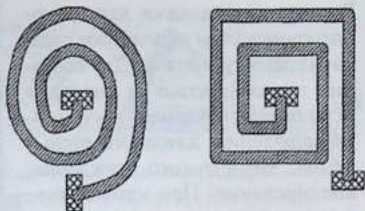


Рис. 21.12. Тонкопленочные индуктивности.

Тонкопленочные индуктивности выполняют на подложке в виде круглой или прямоугольной спирали (рис. 21.12). Из-за большой индуктивности рассеяния и большой занимаемой площади индуктивности они мало применяются.

21.5. Гибридные ИМС

В гибридных ИМС пассивные элементы и все соединения представляют собой пленки из различных материалов,

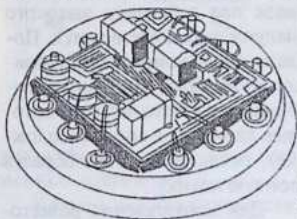


Рис. 21.13. Гибридная микросхема.

а в качестве активных элементов применяют навесные полупроводниковые приборы (рис. 21.13). В качестве навесных элементов применяют также конденсаторы большой емкости, катушки и трансформаторы. Навесные элементы по возможности должны иметь маленькие размеры и сравнимы по размерам с тонкопленочными элементами. Например, ди-

оды и транзисторы имеют объем 1 мм^3 . Для увеличения надежности микросхем и уменьшения собственных шумов надо улучшать качество контактных соединений. Для получения хорошего контакта применяются лазерная техника, термокомпрессионная и ультразвуковая сварка. При этом навесные элементы соединяются с контактными площад-

ками тонкими золотыми или позолоченными проволоками. Собранный микросхема помещается в металлический или пластмассовый корпус. Для правильного размещения микросхемы корпус имеет срез или выпуклость.

21.6. Оформление ИМС

Для защиты ИМС от пыли, влаги, механических воздействий они герметизируются, что существенно повышает их эксплуатационную надежность. Герметизацию ИМС осуществляют либо с помощью изоляционных материалов, либо размещением их в герметизированных корпусах. Для герметизации ИМС изоляционными материалами кристалл полупроводниковой или подложку гибридной ИМС покрывают слоем органического диэлектрика. Однако изоляционные материалы не обеспечивают надежной защиты от повышенной влажности. Самым надежным способом защиты кристалла (подложки) является размещение их в герметизированный корпус (рис. 21.14). Различают следующие типы корпусов: металlostеклянные, металлокерамические,

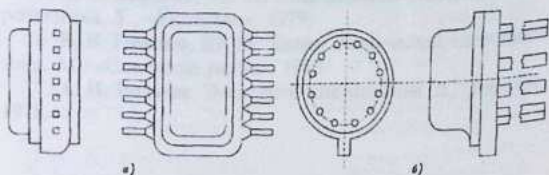


Рис. 21.14. Корпуса ИМС: а) четырехугольной формы; б) круглой формы.

керамические и пластмассовые. Для правильной их установки на корпусе большей частью имеется срез.

21.7. Условные обозначения ИМС и их применение

Условные обозначения ИМС состоят из четырех элементов:

Первый — цифра: 1, 5, 7 — полупроводниковый, 2, 4, 6, 8 — гибридный, 3 — обозначения других ИМС. Второй

элемент состоит из трех (от 000 до 999) или двух (от 00 до 99) цифр и определяет порядковый номер серии микросхем. Микросхемы широкого применения имеют в начале обозначения букву К. Третий элемент — две буквы — обозначает функциональное назначение схемы. Четвертый элемент обозначает порядковый номер разработки микросхемы в данной серии. Например, К144ИР1П — полупроводниковый резистор, в этой серии 1 — порядковый номер изготовления, корпус четырехугольный, пластмассовый. Из-за малых размеров и веса, высокой надежности, высокой стабильности, малого потребления электроэнергии ИМС широко применяются в автоматике, вычислительной технике, радио и телевизионной связи, различных научно-исследовательских работах. ИМС стали основой для создания микропроцессоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.С.Попов, С.А.Николаев. Общая электротехника с основами электроники. М.: Энергия, 1976.
2. Электротехника. Под ред. А. Я. Шихина. М.: Высшая школа, 1991.
3. Ф.Е.Евдокимов. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1968.
4. Ю. А. Овечкин. Полупроводниковые приборы. М.: Высшая школа, 1979.
5. А. С. Каримов, М. М. Мирхайдаров. Назарий электротехника. Т., «Ўқитувчи», 1979.
6. В. В. Романов, Ю. М. Хашев. Химические источники тока. М.: «Советское радио», 1968.
7. А. И. Вольдек. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
----------------	---

ГЛАВА 1. Электрическое поле и диэлектрики

1.1. Напряженность электрического поля. Закон Кулона	4
1.2. Потенциал и напряжение	5
1.3. Электропроводность и электрический ток	7
1.4. Диэлектрик в электрическом поле	9
1.5. Электроизоляционные материалы	10
1.6. Электрическая ёмкость. Конденсаторы	11
1.7. Типы конденсаторов	13
1.8. Соединения конденсаторов	13
1.9. Энергия электрического поля	15
Задачи	16

ГЛАВА 2. Магнетизм и электромагнетизм

2.1. Магнитное поле	18
2.2. Параметры магнитного поля	19
2.3. Закон полного тока	21
2.4. Магнитное поле прямолинейного проводника с током	22
2.5. Магнитное поле коаксиального кабеля	23
2.6. Магнитное поле катушки с кольцевым сердечником ..	24
2.7. Магнитное поле цилиндрической катушки	24
2.8. Электрон в магнитном поле	25
2.9. Проводник с током в магнитном поле	26
2.10. Взаимодействие параллельных проводников с токами	27
2.11. Явление электромагнитной индукции	28
2.12. Э.д.с., наводимая в контуре	29
2.13. Принцип Ленца	31
2.14. Потокосцепление катушки. Индуктивность	31
2.15. Э.д.с. самоиндукции	33
2.16. Энергия магнитного поля	33
2.17. Взаимная индукция	35
2.18. Намагничивание ферромагнитных материалов	36
2.19. Циклическое перемагничивание	38
2.20. Ферромагнитные материалы	38
2.21. Магнитные цепи и их расчет	40
2.22. Электромагниты	42
2.23. Вихревые токи	42
Задачи	43

ГЛАВА 3. Электрические цепи постоянного тока

3.1. Электрическое сопротивление	49
3.2. Зависимость сопротивления от температуры	50
3.3. Проводниковые материалы	51
3.4. Электрическая цепь и её элементы	53
3.5. Закон Ома	55
3.6. Работа, энергия и мощность	56
3.7. Закон Джоуля–Ленца	56
3.8. Последовательное соединение сопротивлений	57
3.9. Первый Закон Кирхгофа	58
3.10. Параллельное соединение сопротивлений	58
3.11. Смешанное соединение сопротивлений	60
3.12. Два режима работы источников тока	61
3.13. Второй Закон Кирхгофа	62
3.14. Подение напряжения в линиях передачи электрической энергии	63
3.15. Допустимые токи в проводах и защита их от перегрузок	64
3.16. Расчет сложных электрических цепей	66
3.17. Химические источники тока	69
Задачи	74

ГЛАВА 4. Основные понятия по переменному току

4.1. Получение синусоидального переменного тока	80
4.2. Параметры синусоидального переменного тока	81
4.3. Векторная диаграмма	84
4.4. Сложение и вычитание векторных величин	85
Задачи	86

ГЛАВА 5. Цепи синусоидального переменного тока

5.1. Введение	88
5.2. Цепь с активным сопротивлением	88
5.3. Цепь с индуктивностью	90
5.4. Поверхностный эффект	93
5.5. Цепь с ёмкостью	94
5.6. Цепь с индуктивностью и активным сопротивлением	97
5.7. Цепь с активным сопротивлением и ёмкостью	99
5.8. Цепь с активным сопротивлением, индуктивностью и ёмкостью. Резонанс напряжений	101
5.9. Расчет разветвленной цепи методом проводимостей	104
5.10. Резонанс токов	106

5.11. Коэффициент мощности	108
5.12. Колебательный контур	109
Задачи	111

ГЛАВА 6. Трехфазный ток

6.1. Получение трехфазного тока	119
6.2. Соединение обмоток генератора звездой	121
6.3. Соединение обмоток генератора треугольником	122
6.4. Соединение приемников электроэнергии звездой	124
6.5. Соединение приемников электроэнергии треугольником	127
6.6. Свойства линейных токов и линейных напряжений	129
6.7. Присоединение приемников электроэнергии к трехфазной сети	130
6.8. Вращающееся магнитное поле трехфазного тока	130
Задачи	132

ГЛАВА 7. Трансформаторы

7.1. Устройство и принцип работы трансформаторов	138
7.2. Холостой ход однофазного трансформатора	141
7.3. Работа трансформатора под нагрузкой	143
7.4. Режим короткого замыкания трансформатора	146
7.5. Коэффициент полезного действия трансформатора	147
7.6. Трехфазные трансформаторы	148
7.7. Измерительные трансформаторы	149
7.8. Параллельная работа трансформаторов	152
7.9. Автотрансформаторы	153
7.10. Сварочные трансформаторы	155
7.11. Расчет трансформаторов	157
Задачи	168

ГЛАВА 8. Электрические измерения и электроизмерительные приборы

8.1. Некоторые понятия из метрологии	173
8.2. Классификация электроизмерительных приборов. Условные обозначения на шкале	174
8.3. Приборы магнитоэлектрической системы	174
8.4. Приборы электромагнитной системы	178
8.5. Приборы электродинамической системы	179
8.6. Приборы ферродинамической системы	160

8.7. Электростатические приборы	181
8.8. Термоэлектрические приборы	182
8.9. Выпрямительные приборы	182
8.10. Логометры	183
8.11. Цифровые приборы	185
8.12. Регистрирующие приборы	185
8.13. Измерение тока и напряжения	187
8.14. Измерение мощности	189
8.15. Измерение активной мощности в трехфазных цепях	191
8.16. Измерение реактивной мощности в трехфазной системе	193
8.17. Измерение электрической энергии	194
8.18. Измерение сопротивлений	196
8.19. Измерение неэлектрических величин электрическими методами	199
Задачи	201

ГЛАВА 9. Электрические машины переменного тока.

Асинхронные электродвигатели

9.1. Устройство асинхронного двигателя	206
9.2. Обмотка статора	208
9.3. Принцип работы асинхронного двигателя	210
9.4. Э.д.с. обмоток статора и ротора	211
9.5. Сопротивление и ток ротора	212
9.6. Вращающий момент асинхронного двигателя	213
9.7. Пуск асинхронных двигателей	216
9.8. Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей	220
9.9. Торможение асинхронных двигателей	222
9.10. Однофазный асинхронный двигатель	223
9.11. Потери энергии и КПД асинхронных двигателей	225
9.12. Рабочие характеристики и коэффициент мощности асинхронных двигателей	226
9.13. Синхронные машины. Устройство и принцип работы	227
9.14. Синхронные генераторы	230
9.15. Вращающий момент синхронной машины	232
9.16. Синхронные двигатели	234
9.17. Асинхронный исполнительный двигатель	237
9.18. Шаговые двигатели	238
Задачи	239

ГЛАВА 10. Машины постоянного тока

10.1. Общие понятия	244
10.2. Устройство машин постоянного тока	244
10.3. Устройство обмотки якоря	246
10.4. Э.д.с. якоря	248
10.5. Реакция якоря	249
10.6. Коммутация	250
10.7. Генераторы постоянного тока	252
10.8. Момент на валу машины постоянного тока	259
10.9. Двигатели постоянного тока	260
10.10. Потери электроэнергии и КПД	270
10.11. Двигатели постоянного тока с цилиндрическим якорем	271
10.12. Двигатель постоянного тока с дисковым якорем	272
Задачи	273

ГЛАВА 11. Электрические и магнитные элементы автоматики

11.1. Системы автоматики	278
11.2. Датчики	280
11.3. Реле	282
11.4. Магнитные усилители	285
11.5. Ферромагнитный стабилизатор напряжения	288
11.6. Тахогенераторы	290
11.7. Вращающиеся трансформаторы	292
11.8. Сельсины	293
11.9. Электромагнитные муфты	296
11.10. Электромагниты	298
11.11. Шаговый искатель	300

ГЛАВА 12. Производство, передача

и распределение электроэнергии

12.1. Схемы распределения электроэнергии между потребителями	302
12.2. Расчет проводов	304
12.3. Расчет плавких вставок предохранителей	307
12.4. Действие электрического тока на организм	308
12.5. Меры по предупреждению поражения током человека	309

ГЛАВА 13. Электропривод и аппаратура управления

13.1. Нагрев и охлаждение электродвигателей	311
13.2. Режимы работы электродвигателей и расчет их мощностей	313

13.3. Аппаратура ручного управления	318
13.4. Аппаратура защиты	320
13.5. Аппаратура релейно-контакторного управления	322
13.6. Схемы управления электродвигателями	323

ГЛАВА 14. Электронные лампы

14.1. Электронная эмиссия. Катоды	327
14.2. Двухэлектродная лампа	328
14.3. Триод	330
14.4. Тетрод	333
14.5. Лучевые тетроды. Пентоды	334
14.6. Электронно-лучевые трубки	335

ГЛАВА 15. Газоразрядные приборы

15.1. Виды газового разряда	337
15.2. Газотрон	339
15.3. Тиратрон	340
15.4. Стабилитрон	341
15.5. Неоновая лампа	342
15.6. Лампа дневного освещения	343

ГЛАВА 16. Полупроводниковые приборы

16.1. Проводимость полупроводников	344
16.2. Проводимость примесных полупроводников	345
16.3. Электронно-дырочный переход	346
16.4. Полупроводниковые диоды	349
16.5. Биполярные транзисторы	353
16.6. Полевые транзисторы	359
16.7. Тиристоры	362
Задачи	365

ГЛАВА 17. Фотоэлектронные приборы

17.1. Фотоэлементы с внешним фотоэффектом	367
17.2. Фоторезистор	370
17.3. Фотодиод	372
17.4. Фототранзистор	373
17.5. Фототиристор	374

ГЛАВА 18. Электронные выпрямители

18.1. Однополупериодный выпрямитель	377
18.2. Двухполупериодные однофазные выпрямители	378
18.3. Трехфазные выпрямители	380
18.4. Тиристорные выпрямители	382

18.5. Электрические фильтры	383
18.6. Расчет выпрямителей	385
18.6.1. Расчет выпрямителей с ёмкостной нагрузкой	386
18.6.2. Расчет выпрямителей с индуктивной нагрузкой ...	400
18.6.3. Расчет выпрямителей с активной нагрузкой без фильтра	408

ГЛАВА 19. Электронные усилители

19.1. Предварительный каскад усилителя низкой частоты	414
19.2. Многокаскадные транзисторные усилители	416
19.3. Выходной каскад низкочастотного усилителя	418
19.4. Обратная связь в усилителях	420
19.5. Транзисторный ключ	421

ГЛАВА 20. Электронные генераторы и измерительные приборы

20.1. Транзисторный LC-автогенератор	423
20.2. Транзисторный RC-автогенератор	424
20.3. Генератор импульсов пилообразного напряжения ...	425
20.4. Мультивибратор	426
20.5. Электронные аналоговые приборы	428
20.6. Электронные цифровые приборы	429
20.7. Электронный осциллограф	430

ГЛАВА 21. Интегральные схемы микроэлектроники

21.1. Общие сведения	432
21.2. Полупроводниковые ИМС	433
21.3. Толсто пленочные ИМС	437
21.4. Тонко пленочные ИМС	438
21.5. Гибридные ИМС	440
21.6. Оформление ИМС	441
21.7. Условные обозначения ИМС и их применение	441

Список литературы	443
-------------------------	-----

Нуритдин Абазович Халилов
Ахмад Имерджанович Ханбабаев

**ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
С ОСНОВАМИ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Ответственный за издание *Н. Халилов*
Главный редактор *М. Миркомбаров*
Технический редактор *Т. Смирнова*
Компьютерная верстка *Ш. Хазратовой*

ИБ № 4257

Подписано в печать 30.07.2004. Формат 84×108¹/₁₆

Печать офсетная. Усл. печ. л. 28,0 Уч.-изд. л. 28,0.

Тираж 1000. Заказ № 252. Цена договорная.

Договор № 100—2004.

Издательско-полиграфический творческий дом имени Гафура Гуляма
Узбекского агентства по печати и информации. 700129, Ташкент,
ул. Навои, 30//700128, Ташкент, ул. У. Юсупова, 86.

Оригинал-макет набран в «ЦПИУЛ» при МВиССО РУз.

- Халилов, Н.А., Ханбабаев, А.И.
- X19 Общая электротехника с основами электроники/
А.И. Ханбабаев, Н.А. Халилов; МВ и ССО РУз. — Т.,
Изд.-полигр. творческий дом им. Г. Гуляма, «ЦПИУЛ»,
2004. — 452 с.
I. Соавт.

В книге излагаются основы электротехнических знаний с выделением в специальные главы теоретических и практических сведений по электронике.

Раскрываются такие понятия, как электрическое поле и электропроводимость, магнетизм и электромагнетизм, постоянный и переменный токи и их цепи, трехфазный ток, дается описание видов и устройств трансформаторов, электронизмерительных приборов, электрических машин (двигателей) переменного и постоянного тока, принцип их действия и целевого назначения, а также систем автоматики. Приведены сведения о схемах распределения электроэнергии между потребителями и мерах безопасности.

В главах, посвященных электронике, рассматривается устройство, принцип действия и область применения электронных ламп, газоразрядных приборов, полупроводниковых и фотоэлектронных элементов, электронных выпрямителей, усилителей, генераторов и электронно-измерительных приборов, а также интегральных микросхем.

Учебник предназначен для учащихся средних специальных учебных заведений и может быть использован студентами вузов неэлектрических специальностей, а также более широкой аудитории, интересующихся и желающих пополнить свои знания сведениями из области электротехники и электроники.

ББК 31.2 + 32.85я723