

И.А.Данилов П.М.Иванов

ОБЩАЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
С ОСНОВАМИ
ЭЛЕКТРОНИКИ

ВЫСШАЯ ШКОЛА

И.А.Данилов П.М.Иванов

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА С ОСНОВАМИ ЭЛЕКТРОНИКИ

ИЗДАНИЕ ШЕСТОЕ, СТЕРЕОТИПНОЕ

Рекомендовано Министерством образования
Российской Федерации в качестве учебного пособия
для студентов неэлектротехнических специальностей
средних специальных учебных заведений



**Москва
«Высшая школа» 2005**

Рецензент — преподаватель Г.Ю. Дронина

Данилов, И.А.

Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для студ. неэлектротехн. спец. средних спец. учеб. заведений/И.А. Данилов, П.М. Иванов. — 6-е изд., стер. — М.: Высш. шк., 2005. — 752 с.: ил.

Изложены основы расчета электрических цепей постоянного и переменного тока, дано описание электрических машин, электронных приборов, ЭВМ и т. д.

Приведены новые материалы по интегральным микросхемам, микропроцессорам и микроЭВМ.

Для студентов неэлектротехнических специальностей средних специальных учебных заведений.

© ФГУП «Издательство
«Высшая школа», 2005

Структура предлагаемой книги соответствует требованиям организации обучения в автоматизированных классах, оборудованных техническими средствами самоконтроля с выбором ответа. Данную книгу можно использовать для самообучения и в отсутствие технических средств, что важно для заочных учебных заведений. В последнем случае убедиться в правильности выбранных ответов или обнаружить ошибку помогают числа, указанные в скобках возле номера каждой карточки самоконтроля.

Чтобы убедиться в правильности выполнения задания, нужно сначала выписать номера консультаций, соответствующие выбранным ответам на пять вопросов карточки самоконтроля, затем взять две последние цифры каждого номера консультации и сложить пять получившихся чисел. Если сумма этих пяти чисел совпадает с числом, указанным возле номера карточки в скобках, то все пять ответов правильны. Например, отвечая на вопросы карточки № 10.5, учащийся выбирает ответы, которым соответствуют номера консультаций 68, 159, 180, 125, 8; после этого следует взять две последние цифры каждого числа и, сложив получившиеся числа, найти сумму: $68 + 59 + 80 + 25 + 08 = 240$. Это число совпадает с указанным в скобках возле номера карточки. Следовательно, все пять ответов правильны и можно переходить к изучению следующего параграфа.

Не рекомендуется обращаться к консультациям, пока не сделана попытка самостоятельно выполнить задания карточки самоконтроля. Ведь ответы на вопросы — не цель работы, а лишь средство убедиться в правильности понимания изучаемого материала.

Занятия в автоматизированном классе должны сочетаться с традиционными формами обучения — лекциями, групповыми упражнениями, лабораторными работами и др.

В книге рассмотрены магнитные усилители и стабилизаторы напряжения, принципы расчета линий электропередачи и защиты электроустановок, основы электропривода, микропроцессоры и микрокалькуляторы.

Материал учебного пособия распределен между авторами следующим образом: П.М. Ивановым написаны гл. 1 — 5, 13, 14, 17 — 20, И.А. Даниловым — гл. 6 — 12, 15, 16, 21, 22.

Авторы выражают признательность рецензенту — преподавателю Г.Ю. Дрониной — за ряд полезных советов, позволивших улучшить содержание учебного пособия.

Все замечания и пожелания по книге просим направлять по адресу: 127994, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

ВВЕДЕНИЕ

Электротехника — область науки и техники, которая занимается изучением электрических и магнитных явлений и их использованием в практических целях.

Можно выделить три основных направления электротехники: 1) преобразование различных видов энергии в электрическую и обратно; 2) превращение одних веществ природы в другие; 3) обработка и передача информации.

Научно-технический прогресс невозможен без электрификации всех отраслей народного хозяйства. Потребности народного хозяйства в электрической энергии непрерывно растут, что приводит к увеличению ее производства.

В условиях научно-технической революции особенно отчетливо проявилась диалектическая связь науки, техники и производства. Наука стала непосредственной производительной силой, а научные достижения оказались в существеннейшей степени зависящими от уровня развития и возможностей современных технологий.

Электроникой называют область науки, техники и производства, в которой разрабатываются принципы производства и совершенствования электронных приборов, методы их инженерного расчета и технологического обеспечения, способы создания электронных систем для нужд народного хозяйства.

Широкое использование электронной аппаратуры обусловлено ее быстрым действием, точностью, высокой чувствительностью, малым потреблением энергии, постоянно возрастающей экономичностью.

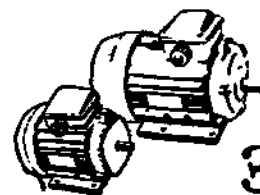
Электронные приборы составляют основу важнейших средств современной связи, автоматики, измерительной техники. Они помогают проникнуть в тайны микромира и космоса, измерить электрические потенциалы живой клетки и атомарные шероховатости обрабатываемой поверхности. Эти приборы преобразуют солнечное излучение в электрическую энергию, питающую спутники.

На основе электроники реален переход к полностью автоматизированному производству. Уже сейчас широко применяются станки с числовым программным управлением и промышленные роботы.

Качественным скачком в развитии электроники было создание в последние два десятилетия микросхем с последовательно и быстро увеличивающейся степенью интеграции электронных элементов: ИС, БИС, СБИС.

Перевод цифровой вычислительной техники на электронную, а затем и микроэлектронную базу открыл перспективы дальнейшей автоматизации процессов управления вплоть до создания автоматов, наделенных элементами интеллекта.

Предлагаемое учебное пособие имеет целью в доступной форме дать учащимся неэлектротехнических техникумов основные сведения из важнейших разделов электротехники и электроники.



Электротехника

.....

Глава 1

Электрическое поле

•

Глава 2

Электрические цепи постоянного тока

•

Глава 3

Электромагнетизм

•

Глава 4

Основные понятия переменного тока

•

Глава 5

Однофазные электрические цепи

•

Глава 6

Трёхфазные электрические цепи

•

Глава 7

Трансформаторы

•

Глава 8

Электрические машины переменного тока

•

Глава 9

Электрические машины постоянного тока

•

Глава 10

Электрические и магнитные элементы автоматки

•

Глава 11

Электрические измерения и приборы

•

Глава 12

Передача и распределение электрической энергии

•

Глава 13

Основы электропривода

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

§ 1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ИЗОБРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Электрические свойства тел объясняются присутствием в них заряженных частиц. Такие частицы, как электрон и протон, имеют равные по абсолютному значению заряды, при этом заряд электрона отрицателен, а заряд протона положителен. Указанные частицы вместе с нейтронами входят в состав атомов вещества, однако они могут находиться и в свободном состоянии. Если тело заряжено, то в нем преобладают положительные или отрицательные заряды; если число тех и других зарядов одинаково, то тело в электрическом отношении нейтрально.

Тела с одноименными зарядами отталкиваются, тела с разноименными зарядами притягиваются. Электрически заряженное тело неразрывно связано с окружающим его электрическим полем, через которое и осуществляется взаимодействие электрически заряженных тел.

Электрическое поле — одна из двух сторон электромагнитного поля, характеризующаяся воздействием на электрически заряженную частицу с силой, пропорциональной заряду частицы и не зависящей от ее скорости.

Из определения электрического поля следует, что оно является силовым или векторным. Для обнаружения и изучения электрического поля используются пробные неподвижные точечные заряженные тела с очень малым положительным зарядом q . Линейные размеры точечных заряженных тел очень малы по сравнению с расстоянием до точек, в которых рассматривается их электрическое поле.

Ввиду малости линейных размеров и значения заряда пробного тела исследуемое электрическое поле практически можно считать неискаженным.

В данной главе будут рассмотрены электростатические поля, т. е. такие, которые создаются неподвижными заряженными телами. Для краткости будем называть их просто электрическими полями.

Рассмотрим электрическое поле уединенного неподвижного точечного заряженного тела с зарядом Q (рис. 1.1, а), расположенного в произвольной точке горизонтальной плоскости. Поместим в точку A этой плоскости пробное заряженное тело с зарядом q . Поскольку сила отталкивания, действующая на пробное заряженное тело, лежит на линии, соединяющей центры взаимодействующих заряженных тел, пробное заряженное тело будет перемещаться в радиальном направлении (так же, как и пробное заряженное тело, помещенное в точку B). Помещая пробное заряженное тело в другие точки и продолжая эти рассуждения, получим картину, которая условно изображает электрическое поле с помощью линий, называемых силовыми (рис. 1.1, б). В частном случае уединенного точечного заряженного тела силовые линии представляют собой прямые, проведенные через точку, в которой находится это тело. В общем случае вектор силы, с которой поле действует на пробное заряженное тело в данной точке поля, совпадает с касательной к силовой линии в этой точке.

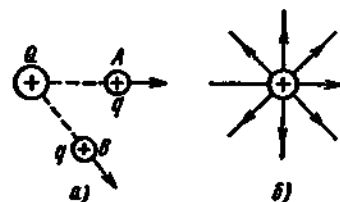
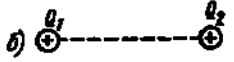
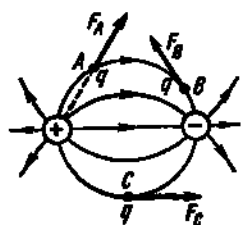


Рис. 1.1. Электрическое поле уединенного заряженного тела

Карточка № 1.1 (146)
Определение и изображение электрического поля

На рисунке показана модель атома водорода. В какой области пространства действует электрическое поле?	В области B	16
	И в области A , и в области B	96
	В области A	89
Какое из приведенных утверждений вы считаете правильным?	Поле и силовые линии существуют реально	52
	Поле существует реально, а силовые линии — условно	17

	Поле существует условно, а силовые линии — реально	36
	И поле, и силовые линии существуют условно	28
Где существует поле уединенного заряженного тела?	Только в плоскости	30
	В пространстве	21
В каком из приведенных случаев взаимодействующие заряженные тела можно считать точечными? а)  б) 	В обоих случаях	88
	В случае а)	83
	В случае б)	1
	Ни в том, ни в другом случае	69
На рисунке показано электрическое поле системы разноименно заряженных тел. В какой точке поля сила F , с которой поле действует на пробный заряд, расположена правильно?	В точке А	10
	В точке В	40
	В точке С	11



§ 1.2. ЗАКОН КУЛОНА.

НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Взаимодействие точечных заряженных тел описывается законом Кулона.

Сила взаимодействия F между точечными заряженными телами Q и q , расположенными в данной среде на расстоянии R друг от друга (рис. 1.2, а), прямо пропорциональна произведению зарядов этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$F = Qq / (4\pi\epsilon_r\epsilon_0 R^2), \quad (1.1)$$

где Q и q — значения зарядов, Кл (1 Кл = $6,3 \cdot 10^{18}$ зарядов электрона); ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость среды, показывающая, во сколько раз сила взаимодействия в данной среде меньше, чем в вакууме (величина безразмерная); $\epsilon_0 = 8,86 \times 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная.

Введем силовую характеристику поля — напряженность:

$$\mathcal{E} = F/q.$$

Напряженность электрического поля в данной точке определяется силой, действующей на помещенное в эту точку пробное тело, обладающее единичным положительным зарядом.

Единица напряженности

$$[\mathcal{E}] = \text{Н/Кл (ньютон на кулон)}.$$

Для поля уединенного точечного заряженного тела на основании закона Кулона

$$\mathcal{E} = Q / (4\pi\epsilon_r\epsilon_0 R^2). \quad (1.2)$$

Рассмотрим в качестве примера электрическое поле уединенного заряженного металлического шара с зарядом — Q (рис. 1.2, б). Напряженность поля внутри металлического шара при статическом заряде равна нулю. В самом деле, при наличии электрического поля в проводящей среде электроны благодаря взаимному отталкиванию придут в движение и, следовательно, статическое состояние установится только тогда, когда напряженность поля внутри шара станет равной нулю. Таким образом, избыточный электрический заряд распределится только на его поверхности.

Напряженность поля вне шара и на его поверхности находят, предполагая, что заряд — Q сосредоточен в центре шара.

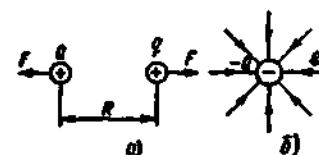
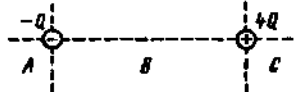
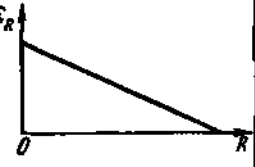
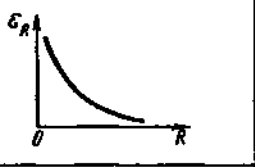
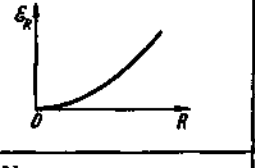


Рис. 1.2. Взаимодействие двух разноименно заряженных тел (а), электрическое поле заряженного шара (б)

Карточка № 1.2 (277)
Закон Кулона. Напряженность электрического поля

Как изменится сила взаимодействия между двумя заряженными телами с зарядами Q и q , если при $q = \text{const}$ заряд Q увеличить в 2 раза, причем расстояние между зарядами также удвоится?	Остается неизменной	23
	Увеличится в 2 раза	62
	Уменьшится в 2 раза	56
	Уменьшится в 4 раза	85
Как изменится сила взаимодействия между двумя заряженными телами, если разделяющий их воздух заменить дистиллированной водой?	Увеличится	78
	Уменьшится	94
	Останется неизменной	60
В какой зоне находится точка, напряженность поля которой равна нулю? 	В зоне C	71
	В зоне A	90
	Не существует	95
	В зоне B	103
Какой из приведенных графиков соответствует изменению напряженности поля уединенного заряженного тела? 		32
		35
		42
Изменится ли напряженность поля уединенного точечного заряженного тела в данной точке, если знак заряда тела изменить на противоположный, а значение заряда оставить неизменным?	Изменится	102
	Не изменится	75

§ 1.3. ПОТЕНЦИАЛ. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Пусть уединенное неподвижное точечное заряженное тело с зарядом Q расположено в произвольной точке горизонтальной плоскости (рис. 1.3). Если в точке A окажется пробное заряженное тело с зарядом q , то под действием силы F_A оно станет перемещаться. При этом за счет энергии поля зарядов Q и q будет совершаться определенная работа. Поскольку сила $F_R = Qq/(4\pi\epsilon_0 R^2)$ непрерывно меняется, для нахождения работы, которую совершает поле, перемещая пробное заряженное тело из данной точки в бесконечность, разобьем весь путь на элементарные участки ΔR , так что в пределах каждого такого участка силу F_R можно считать неизменной. Тогда элементарная работа этой силы $\Delta A = F_R \Delta R$.

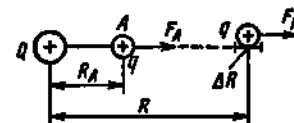


Рис. 1.3. К определению потенциала электрического поля

Для определения всей работы A необходимо просуммировать элементарные работы ΔA на участке пути от R_A до бесконечности. Тогда $A \approx \sum \Delta A = \sum F_R \Delta R$. Точное значение этой работы

$$A = \int_{R_A}^{\infty} F_R dR = Qq/(4\pi\epsilon_0 R_A).$$

Работа выражается в джоулях (Дж).

Введем энергетическую характеристику поля — потенциал ϕ .

Потенциалом электрического поля заряда Q в данной точке называют величину, численно равную работе, которую совершает поле, перемещая пробное тело, обладающее единичным положительным зарядом, из данной точки в бесконечность:

$$\phi_A = A_A/q = Q/(4\pi\epsilon_0 R_A). \quad (1.3)$$

Единица потенциала

$$[\phi] = 1 \text{ Дж/1 Кл} = 1 \text{ В.}$$

Потенциал данной точки поля равен 1 В, если при переносе пробного тела с зарядом в 1 Кл из данной точки в бесконечность совершается работа в 1 Дж.

В том случае, когда заряженное тело, создающее поле, имеет отрицательный заряд, поле будет препятствовать удалению пробного заряженного тела, т. е. потенциал поля будет отрицательным. Сопоставив формулы (1.2) и (1.3), видим, что

$$\varphi_A = \mathcal{E}_A R_A, \quad (1.4)$$

откуда $\mathcal{E}_A = \varphi_A / R_A$.

Единица напряженности поля

$$[\mathcal{E}] = \text{В/м (вольт на метр)}.$$

Определив потенциал электрического заряда Q в точках A и B (рис. 1.4), найдем их разность, которую называют электрическим напряжением между двумя точками поля:

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B. \quad (1.5)$$

Таким образом, электрическим напряжением или разностью потенциалов между двумя точками поля называют величину, чис-



Рис. 1.4. К определению разности потенциалов электрического поля

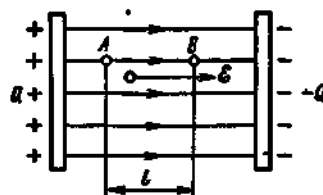


Рис. 1.5. Однородное электрическое поле

ленно равную работе, которую совершает поле, перемещая между этими точками пробное тело, обладающее единичным положительным зарядом.

Выясним, как изменяется потенциал точек внутри и вне металлического шара с зарядом $-Q$. Так как избыточный заряд шара неподвижен и расположен на поверхности, разность потенциалов между внутренними точками шара и точками, расположенными на его поверхности, равна нулю. Следовательно, потенциалы всех точек шара равны потенциалу точек на его поверхности. Потенциал точек, расположенных на

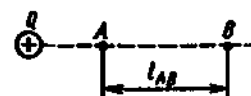
поверхности и вне шара, определяют из предположения, что весь заряд шара сосредоточен в его центре.

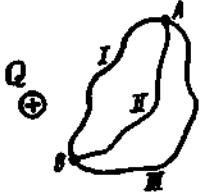
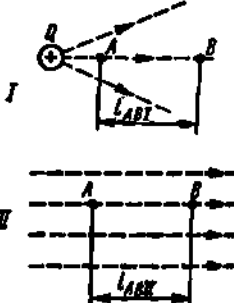
Электрические поля уединенного точечного заряженного тела и уединенного заряженного шара являются неоднородными, т. е. полями, у которых напряженность во всех точках различна. На практике часто приходится иметь дело с однородным полем, у которого напряженность во всех точках одинакова. Такое поле возникает, например, между двумя равномерно заряженными металлическими пластинами на достаточном удалении от их краев (рис. 1.5). При этом электрическое напряжение однородного поля

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = \mathcal{E} l. \quad (1.6)$$

Карточка № 1.3 (264)
Потенциал. Электрическое напряжение

Найти правильное соотношение между φ_A и φ_B , если $R_A = R_B$ (каждый случай рассматривается отдельно)	$\varphi_A = \varphi_B$	37
	$\varphi_A > \varphi_B$	54
	$\varphi_A < \varphi_B$	61
Совершается ли работа при перемещении пробного заряженного тела по поверхности сферы, в центре которой находится точечное заряженное тело?	Совершается	49
	Не совершается	72
	Это зависит от формы траектории движения пробного заряженного тела	34
Какая из формул может быть использована для определения разности потенциалов между точками A и B ?	$\varphi_A - \varphi_B = \mathcal{E}_A l_{AB}$	46
	$\varphi_A - \varphi_B = \mathcal{E}_B l_{AB}$	68
	Обе формулы не верны	4



Какое из приведенных выражений правильно? 	$U_{AB1} < U_{AB2} < U_{AB3}$	24
	$U_{AB1} = U_{AB2} = U_{AB3}$	58
	$U_{AB1} > U_{AB2} > U_{AB3}$	31
Даны два поля: неоднородное I и однородное II, причем $\mathcal{E}_{A1} = \mathcal{E}_{A2}$, $U_{AB1} = U_{AB2}$. Каково соотношение между U_{AB1} и U_{AB2} ? 	$U_{AB1} = U_{AB2}$	15
	$U_{AB1} > U_{AB2}$	18
	$U_{AB1} < U_{AB2}$	76

§ 1.4. ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ИНДУКЦИЯ

Внесем проводящее металлическое тело в электрическое поле, образованное разноименными зарядами двух пластин (рис. 1.6). Под действием сил этого поля свободные электроны металла начинают перемещаться в сторону, противоположную направлению поля. В результате перемещения электронов в металле произойдет разделение зарядов и возникнет внутреннее поле напряженностью $\mathcal{E}_{вт}$. Это поле направлено против внешнего; следовательно, напряженность результирующего поля в проводящем теле $\mathcal{E}_{рез} = \mathcal{E}_{вн} - \mathcal{E}_{вт}$.

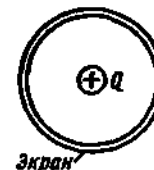
Рис. 1.6. Проводник в электрическом поле

Перемещение свободных электронов в металле продолжается до тех пор, пока внутреннее поле не уравнивается внешнему, т. е. пока напряженность $\mathcal{E}_{рез} = 0$. Рассмотренное явление называется электростатической индукцией (наведением) и используется для защиты механизмов приборов, некоторых радиодеталей и т. д. от внешних электрических полей. Защищаемую деталь помещают в алюминиевый или латунный кожух (экран). Экраны могут быть как сплошными, так и сетчатыми.

Карточка № 1.4 (195)

Проводники в электрическом поле. Электростатическая индукция

Может ли существовать электрическое поле в металлическом проводнике?	Может	64
	Не может	26
Какие заряды перемещаются в металле в процессе электростатической индукции?	Положительные ионы	86
	Электроны	98
	И электроны, и ионы	104
Под действием электрического поля $\mathcal{E}$ в металлическом бруске произошло разделение зарядов. Существует ли разность потенциалов между поверхностями A и B?	Существует	12
	Не существует	2
Сохранился ли поле разделенных зарядов внутри металла, если убрать внешнее поле?	Не сохранился	22
	Сохранился	67
Будет ли защищено внешнее пространство от поля заряда Q, заключенного в металлический экран?	Будет	48
	Не будет	105
	Будет при условии заземления экрана	65



§ 1.5. ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКА

Диэлектрики характеризуются присутствием ничтожного числа свободных электронов. Электроны диэлектрика связаны в основном с положительно заряженным ядром и движутся по некоторым орбитам вокруг него.

Существует ряд диэлектриков, молекулы которых при отсутствии внешнего поля электрически нейтральны, так как среднее положение отрицательного заряда совпадает с ядром (рис. 1.7, а). Такие молекулы называют неполярными. У диэлектриков с полярными молекулами среднее положение отрицательного заряда смещено относительно ядра.

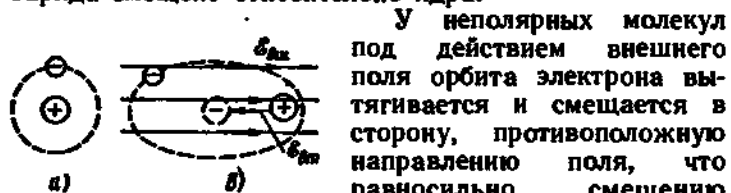


Рис. 1.7. Неполярная молекула при отсутствии (а) и наличии (б) внешнего поля

У неполярных молекул под действием внешнего поля орбита электрона вытягивается и смещается в сторону, противоположную направлению поля, что равносильно смещению среднего положения отрицательного заряда не совпадает с положением ядра и образуется электрический диполь (пара разноименных точечных зарядов, связанных между собой и находящихся на малом расстоянии друг от друга), напряженность электрического поля которого $E_{\text{вн}}$ ослабляет внешнее поле. Формально это явление отражается введением коэффициента ϵ_r (относительная диэлектрическая проницаемость среды) в формулу закона Кулона. Чем больше ϵ_r , тем сильнее ослабляется внешнее поле. Повышая напряженность электрического поля, в котором расположен диэлектрик, можно достичь такого состояния, когда орбитальные электроны начнут срывать с орбит полем, произойдет местное разрушение диэлектрика, или его пробой. Напряженность поля $E_{\text{пр}}$, при которой наступает пробой диэлектрика, называется пробивной.

Напряженность поля $E_{\text{доп}}$, которая допускается в диэлектрике при его работе в электроустройствах, называется допустимой. Для надежной работы

электроустройства напряженность диэлектрика должна быть не выше допустимой. Значение $E_{\text{доп}}$ должно быть в несколько раз ниже значения $E_{\text{пр}}$.

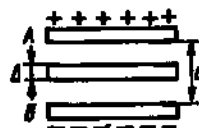
Необходимо заметить, что внутреннее поле в диэлектрике существует только при наличии внешнего поля и в большинстве случаев исчезает при снятии последнего.

Однако есть диэлектрики, которые, будучи поляризованными внешним электрическим полем, сохраняют остаточную поляризацию, т. е. внутреннее поле остается при исчезновении внешнего (сегнетоэлектрики и электреты). Относительная диэлектрическая проницаемость таких диэлектриков сильно зависит от напряженности внешнего поля и, следовательно, не постоянна, причем максимальное значение ϵ_r достигает нескольких тысяч. Конденсаторы с сегнетоэлектриком применяются в устройствах автоматики. Электреты представляют собой источники постоянного электрического поля и используются в электрических вольтметрах, элементах электрической памяти, для световой записи информации на диэлектрическую пленку и т. д.

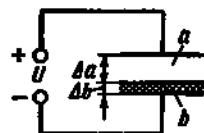
Карточка № 1.5 (291)

Диэлектрики в электрическом поле. Поляризация диэлектрика

Может ли поле поляризованного диэлектрика полностью компенсировать внешнее электростатическое поле?	Может	33
	Не может	66
	Это зависит от типа диэлектрика	3
В пространстве между двумя разноименно заряженными пластинами введена металлическая пластина. Как изменится напряженность поля в пространстве между пластинами, если расстояние и напряжение между ними останутся неизменными?	Увеличится	50
	Уменьшится	45
	Останется неизменным	55
К пластинам, разделенным воздухом, приложено напряжение U .	В слое a уменьшится, в слое b увеличится	91



Затем в слой b вводится диэлектрик из слюды. Как изменится напряженность поля в слоях a и b после введения слюды ($\epsilon_a > \epsilon_b$)?



Какая из приведенных молекул является полярной?



Какими признаками характеризуется твердый диэлектрик в состоянии пробоя?

Наличием свободных ионов

Наличием свободных электронов

Наличием свободных ионов и электронов

§ 1.6. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Электронизоляционными называются материалы, предназначенные для разделения токоведущих элементов, находящихся под разными потенциалами во время работы электро- и радиоустановок. В качестве электронизоляционных материалов используются газообразные, жидкие и твердые диэлектрики.

Особую группу составляют твердеющие материалы: лаки, клеи, компаунды.

Газообразные диэлектрики. Наиболее распространенным газообразным диэлектриком является воздух. Воздух изолирует провода ЛЭП, обнаженные токоведущие части электро- и радиоаппаратуры и т. д.

Достаточно широкое распространение имеет газ — газообразный диэлектрик с пробивной напряженностью, в 2,5 раза большей, чем у воздуха. Водород, азот, инертные газы также используются в качестве газообразных диэлектриков.

Жидкие диэлектрики. К таким диэлектрикам относятся нефтяные электроизолирующие масла и синтетические жидкие диэлектрики. Нефтяные масла являются продуктом перегонки нефти и представляют собой смесь различных углеводородов. Самое большое распространение в электротехнике находит трансформаторное масло. Оно используется для заливки силовых трансформаторов и заполнения баков высоковольтных выключателей. Конденсаторное масло применяется для пропитки бумажной изоляции в конденсаторах, кабельное масло для пропитки бумажной изоляции кабелей. Синтетические жидкие диэлектрики наиболее широко представлены соволом. Реже применяются кремнийорганические и фторорганические жидкие диэлектрики.

Твердые диэлектрики. К этому классу диэлектриков относятся:

1) диэлектрики на основе волокнистых органических материалов. Это различные электронизоляционные бумаги (конденсаторная, кабельная, телефонная и т. д.), картон, фибра (тонкая бумага, обработанная раствором хлористого цинка), природные (хлопчатобумажные ткани, натуральный шелк) и синтетические (вискозный и ацетатный шелк) текстильные материалы. Применяются также текстильные материалы, пропитанные электроизоляционными лаками (лакоткани);

2) природные минеральные материалы (слюда, асбест). Слюда используется в качестве диэлектрика в конденсаторах, а также для изготовления миканита — листового или рулонного материала, склеенного из отдельных лепестков слюды с помощью лака или смолы, асбест — для изоляции нагревательных элементов, которые работают при высоких температурах;

3) пластмассы, состоящие из двух компонентов: связующего и наполнителя. Связующий компонент — это органический полимер, обладающий способностью деформироваться под давлением; наполнитель — порошкообразное, волокнистое или листовое вещество (каменная мука, мелкие опилки, хлопчатобумажные

асбестовые или стеклянные волокна). Распространенный представитель пластмасс — гетинакс — слоистый пластик, получаемый путем горячей прессовки бумаги, пропитанной бакелитом;

4) эластомассы — материалы, полученные на основе каучука и близких к нему по свойствам веществ. Широкое распространение получили резина и эбонит;

5) стекла — неорганические аморфные вещества на основе оксида кремния. Стекла используются для изготовления изоляторов, баллонов электронных ламп и стеклотканей;

6) керамики. Наиболее распространенным является фарфор. В частности, в радиотехнике используется радиофарфор.

Твердеющие диэлектрики. К ним относятся смолы, лаки, компаунды. К природным смолам относятся шеллак и канифоль. Большее применение имеют синтетические смолы (полистирол, полиэтилен, поливинилхлорид). Эпоксидные смолы в чистом виде являются термопластичными материалами, растворяются в различных растворителях, могут храниться длительное время, не изменяя своих свойств. При добавлении отвердителей эпоксидные смолы довольно быстро твердеют.

Электроизолирующие лаки применяются для пропитки волокнистой изоляции, что приводит к увеличению пробивного напряжения, уменьшению гигроскопичности, созданию изолирующей пленки на поверхности лакируемых предметов.

Компаунды представляют собой смеси смол, воскообразных веществ и битумов с различными добавлениями. Это термопластичные материалы, расплавляемые перед употреблением. Расплавленные компаунды применяют для получения толстого слоя при покрытиях, пропитки обмоток трансформаторов и т. д.

Параметры некоторых изоляционных материалов даны в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Диэлектрик	$\varphi_{пр} \cdot 10^3$, В/см	ϵ_r	Диэлектрик	$\varphi_{пр} \cdot 10^3$, В/см	ϵ_r
Воздух	30	1,0	Поливинилхлорид	325	3,2
Трансформаторное масло	50—180	2—2,5	Резина	150—200	3—6

Продолжение табл. 1.1

Диэлектрик	$\varphi_{пр} \cdot 10^3$, В/см	ϵ_r	Диэлектрик	$\varphi_{пр} \cdot 10^3$, В/см	ϵ_r
Совоя	150	5,3	Стекло	100—150	6—10
Бумага, пропитанная маслом	100—250	3,6	Слюда	500—1000	5,4
Гетинакс	100—150	4—7	Фарфор	150—200	5,5
Миканит	150—400	5—6	Электрокартон	80—120	3—5

§ 1.7. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ ПЛОСКИЙ КОНДЕНСАТОР

Потенциал металлического уединенного тела с увеличением сообщенного ему заряда возрастает. При этом заряд Q и потенциал φ связаны между собой соотношением

$$Q = C\varphi, \quad (1.7)$$

откуда

$$C = Q/\varphi. \quad (1.8)$$

Здесь C — коэффициент пропорциональности, или электрическая емкость тела.

Таким образом, электрическая емкость C тела определяет заряд, который нужно сообщить телу, чтобы вызвать повышение его потенциала на 1 В.

Единицей емкости, как следует из формулы (1.8), является кулон на вольт, или фарада:

$$[C] = 1 \text{ Кл} / 1 \text{ В} = 1 \text{ Ф}.$$

На практике пользуются более мелкими единицами — микрофарадой ($1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$) или пикофарадой ($1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$).

В технике для получения емкостей используют конденсаторы — устройства, состоящие из двух металлических проводников, разделенных диэлектриком, и предназначенные для использования их емкости. Условное изображение конденсатора показано на рис. 1.8, а. В частности, плоский конденсатор состоит из двух параллельных пластин,

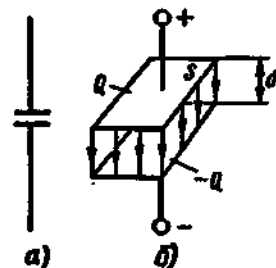


Рис. 1.8. Плоский конденсатор: а — конструкция; б — условное обозначение

расстояние между которыми мало по сравнению с их размерами (рис. 1.8, б). При подключении к источнику постоянного напряжения происходит зарядка конденсатора, свободные электроны пластины, соединенной с положительным полюсом источника, переходят через источник на пластину, соединенную с его отрицательным полюсом. Этот процесс закончится, когда разность потенциалов между пластинами окажется равной напряжению между зажимами источника. В результате одна пластина конденсатора получает заряд $+Q$, а другая $-Q$. При этом заряд Q и напряжение U между пластинами связаны соотношением $Q = CU$, откуда

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

Здесь C — электрическая емкость конденсатора.

Таким образом, электрическая емкость C конденсатора определяет заряд, который нужно сообщить одной его пластине, чтобы вызвать повышение напряжения между пластинами на 1 В.

Для нахождения заряда Q при заданном напряжении необходимо знать емкость конденсатора. В случае плоского конденсатора

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 S/d, \quad (1.10)$$

где ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, разделяющего пластины конденсатора; ϵ_0 — электрическая постоянная; S — площадь одной пластины, м^2 ; d — расстояние между пластинами, м.

Промышленность выпускает конденсаторы различной емкости — от 1 пФ до нескольких тысяч микрофарад на различные номинальные напряжения (от единиц вольт до сотен киловольт), различного назначения и конструкции. По типу диэлектрика конденсаторы делятся на бумажные, слюдяные, керамические и др.

Конденсаторы находят широкое применение в электротехнике и радиотехнике.

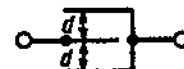
Карточка № 1.6 (212)

Электрическая емкость. Плоский конденсатор

Нужно ли изменять емкость конденсатора, чтобы при неизменном напряжении между его пластинами заряд увеличился? Если да, то как?	Уменьшить	8
	Оставить без изменения	47
	Увеличить	14

Продолжение

Как изменятся емкость и заряд на пластинах конденсатора, если напряжение на его зажимах повысится?	Емкость и заряд увеличатся	19
	Емкость уменьшится, заряд увеличится	9
	Емкость останется неизменной, заряд увеличится	5
	Емкость останется неизменной, заряд уменьшится	39
При неизменном напряжении увеличится расстояние между пластинами конденсатора. Как изменится при этом заряд конденсатора?	Увеличится	44
	Не изменится	63
	Уменьшится	93
Конденсатор образован тремя пластинами, как показано на рисунке. Площадь каждой пластины S . Какую площадь следует подставить в формулу для определения емкости?	$3S$	100
	S	82
	$2S$	57
Расстояние между пластинами конденсатора d . Какой параметр нужно подставить в формулу для определения емкости?	$2d$	74
	d	43



§ 1.8. СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

На практике нужную емкость получают, прибегая к различным способам соединения стандартных конденсаторов.

Параллельное соединение. При параллельном соединении конденсаторов потенциал пластин, соединенных с положительным полюсом источника, одинаков и равен потенциалу этого полюса (рис. 1.9). Соответ-

ственно потенциал пластин, соединенных с отрицательным полюсом, равен потенциалу этого полюса. Следовательно, напряжение, приложенное к конденсаторам, одинаково. Общий заряд $Q_{\text{общ}} = Q_1 + Q_2 + Q_3$.

Так как, согласно (1.9), $Q = CU$, то $Q_{\text{общ}} = C_{\text{общ}}U$; $Q_1 = C_1U$; $Q_2 = C_2U$; $Q_3 = C_3U$ и $C_{\text{общ}}U = C_1U + C_2U + C_3U$.

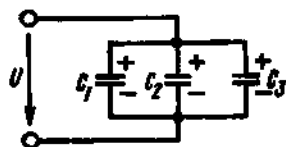


Рис. 1.9. Параллельное соединение конденсаторов

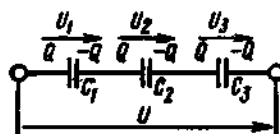


Рис. 1.10. Последовательное соединение конденсаторов

Таким образом, общая, или эквивалентная, емкость при параллельном соединении конденсаторов равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$$C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + C_3. \quad (1.11)$$

Из формулы (1.11) следует, что при параллельном соединении одинаковых конденсаторов емкостью C общая емкость

$$C_{\text{общ}} = nC. \quad (1.12)$$

Последовательное соединение. При последовательном соединении конденсаторов (рис. 1.10) на пластинах будут одинаковые заряды. На внешние электроды заряды поступают от источника питания. На внутренних электродах конденсаторов C_1 и C_3 удерживается такой же заряд, как и на внешних. Но поскольку заряды на внутренних электродах получены за счет разделения зарядов с помощью электростатической индукции, заряд конденсатора C_2 имеет такое же значение.

Найдем общую емкость для этого случая. Так как $U = U_1 + U_2 + U_3$, где $U = Q/C_{\text{общ}}$; $U_1 = Q/C_1$; $U_2 = Q/C_2$; $U_3 = Q/C_3$, то $Q/C_{\text{общ}} = Q/C_1 + Q/C_2 + Q/C_3$. Сократив на Q , получим

$$1/C_{\text{общ}} = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3. \quad (1.13)$$

При последовательном соединении двух конденсаторов, используя (1.13), найдем

$$C_{\text{общ}} = C_1 C_2 / (C_1 + C_2). \quad (1.14)$$

При последовательном соединении n одинаковых конденсаторов емкостью C каждый на основании (1.13) общая емкость

$$C_{\text{общ}} = C/n. \quad (1.15)$$

При зарядке конденсатора от источника питания энергия этого источника преобразуется в энергию электрического поля конденсатора:

$$W_c = CU^2/2, \quad (1.16)$$

или с учетом того, что $Q = CU$,

$$W_c = QU^2/2. \quad (1.17)$$

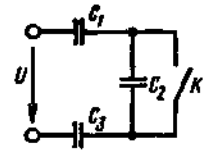
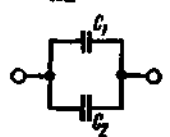
Физически накопление энергии в электрическом поле происходит за счет поляризации молекул или атомов диэлектрика.

При замыкании пластин конденсатора проводником происходит разрядка конденсатора и в результате энергия электрического поля преобразуется в теплоту, выделяемую при прохождении тока через проводник.

Карточка № 1.7 (267)

Соединение конденсаторов. Энергия электрического поля

Три конденсатора, подключенные к источнику питания, соединены последовательно. Как распределяется напряжение на конденсаторах?	$U_1 > U_2 > U_3$	73
	$U_1 = U_2 = U_3$	6
	$U_2 > U_1 > U_3$	13
	Недостаточно данных для ответа на вопрос	65
При последовательном соединении двух конденсаторов, подключенных к источнику питания, один из них оказался пробитым. Как изменится запас прочности другого конденсатора?	Увеличится	70
	Уменьшится	53
	Останется неизменным	7

Как изменятся энергия последовательно включенных конденсаторов и их заряд при замыкании ключа K? 	Энергия увеличится, заряд уменьшится Энергия увеличится, заряд не изменится Энергия увеличится, заряд увеличится Энергия уменьшится, заряд не изменится	25 87 29 80
В данной схеме $C_1 \gg C_2$. Какой из этих емкостей можно пренебречь при приближенном определении $C_{\text{общ}}$? 	C_1 C_2	41 59
В приведенной схеме $C_1 \gg C_2$. Какой из этих емкостей можно пренебречь при приближенном определении общей емкости? 	C_1 C_2	51 99

ГЛАВА 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 2.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ

Электрической цепью называют совокупность устройств, предназначенных для получения, передачи, преобразования и использования электрической энергии.

Электрическая цепь состоит из отдельных устройств — элементов электрической цепи.

Источниками электрической энергии являются электрические генераторы, в которых механическая энергия преобразуется в электрическую, а также первичные элементы и аккумуляторы, в которых происходит преобразование химической, тепловой, световой и других видов энергии в электрическую.

К потребителям электрической энергии относятся электродвигатели, различные нагревательные приборы, световые приборы и т. д. Все потребители электрической энергии принято характеризовать некоторыми параметрами.

Параметры определяют свойства элементов поглощать энергию из электрической цепи и преобразовывать ее в другие виды энергии (необратимые процессы), а также создавать собственные электрические или магнитные поля, в которых энергия способна накапливаться и при определенных условиях возвращаться в электрическую цепь. Элементы электрической цепи постоянного тока задаются только одним параметром — сопротивлением. Сопротивление определяет свойство элемента поглощать энергию из электрической цепи и преобразовывать ее в другие виды энергии.

Передающие элементы цепи связывают источники и приемники. Кроме электрических проводов в это звено могут входить аппараты для включения и отключения цепи, приборы для измерения электрических параметров (амперметры, вольтметры), устройства защиты (предохранителей), преобразующие устройства (трансформаторы) и др.

Любая электрическая цепь характеризуется током, электродвижущей силой и напряжением.

§ 2.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Явление направленного движения носителей заряда, сопровождаемое магнитным полем, называют полным электрическим током.

Полный электрический ток принято разделять на следующие основные виды: ток проводимости, ток переноса и ток смещения.

Электрическим током проводимости называют явление направленного движения свободных носителей электрического заряда в веществе или вакууме.

Электрический ток, обусловленный направленным упорядоченным движением электронов, имеет место в проводниках первого рода (металлах), электронных и полупроводниковых приборах. В проводниках второго рода — электролитах (водные растворы солей, кислот и щелочей) — электрический ток обусловлен движением положительных и отрицательных ионов, упорядоченно перемещающихся под действием приложенного поля.

Электрическим током переноса называют явление переноса электрических зарядов заряженными частицами или телами, движущимися в свободном пространстве. Основным видом электрического тока переноса является движение в пустоте элементарных частиц, обладающих зарядом (движение свободных электронов в электронных лампах), движение свободных ионов в газоразрядных приборах.

Электрическим током смещения (током поляризации) называют упорядоченное движение связанных носителей электрических зарядов. Этот вид тока можно наблюдать в диэлектриках.

В данной главе будет рассмотрен ток проводимости.

В большинстве случаев причиной упорядоченного движения электрических зарядов является электрическое поле. При отсутствии электрического поля свободные электрические заряды совершают тепловое беспорядочное движение, в результате чего количество электричества, проходящего через любое сечение проводника, в среднем равно нулю.

Для количественной оценки электрического тока служит величина, называемая силой тока.

Сила тока численно равна количеству электричества, проходящего через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \Delta q / \Delta t. \quad (2.1)$$

Таким образом, сила тока характеризует расход электричества в единицу времени через данное сечение электрической цепи. В дальнейшем наряду с термином «сила тока» будем применять термин «ток». Очевидно, что ток определяется как упорядоченной скоростью носителей заряда (например, электронов), так и их плотностью.

Единицей силы тока является ампер (А).

Сила тока равна 1 А, если через поперечное сечение проводника за 1 с проходит электрический заряд в 1 Кл:

$$[I] = 1 \text{ Кл} / 1 \text{ с} = 1 \text{ А}. \quad (2.2)$$

Ток, неизменный во времени по значению и направлению, называют постоянным:

$$I = q / t. \quad (2.3)$$

За положительное направление тока принимают направление, в котором перемещаются положительные заряды, т. е. направление, противоположное движению электронов.

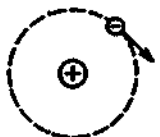
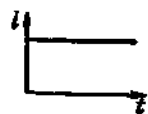
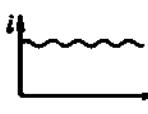
Наряду с силой тока важное значение имеет плотность тока I , равная количеству электричества, проходящего за 1 с через единицу перпендикулярного току сечения проводника. В однородном проводнике ток равномерно распределяется по сечению, так что

$$I = I/S, \quad (2.4)$$

где I — в А/мм².

Плотность тока позволяет охарактеризовать проводник с точки зрения способности выдерживать ту или иную нагрузку.

Карточка № 2.1 (165)
Электрический ток

Является ли движение электрона вокруг ядра электрическим током?	Является	48
	Не является	14
	Правый	11
	Левый	96
	Оба	125
Какой из приведенных графиков является графиком постоянного тока?  		

За 1 ч при постоянном токе был перенесен заряд в 180 Кл. Определить силу тока	180 А	16
	0,05 А	53
Можно ли, пользуясь графиком постоянного тока, определить, какое количество электричества прошло через проводник за данное время?	Нельзя	68
	Можно	6
Проводник имеет форму, показанную на рисунке. В каком сечении скорость упорядоченного движения свободных электронов, обеспечивающих данный ток I , больше?	В сечении S_1	24
	В сечении S_2	47
	Скорости в обоих сечениях одинаковы	149



§ 2.3. ЭДС и НАПРЯЖЕНИЕ

Рассмотрим простейшую электрическую цепь (рис. 2.1) с источником электрической энергии E и потребителем R . Предположим, что в источнике преобразуется какой-либо вид энергии в электрическую. Это происходит за счет так называемых сторонних (не электрических) сил, которые производят внутри источника разделение зарядов. Если цепь оказывается замкнутой через потребитель, то разделенные заряды под действием возникшего электрического поля стремятся объединиться. Вследствие движения зарядов в цепи возникает ток и в потребителе расходуется энергия, запасенная источником. Для количественной оценки указанных энергетических преобразований в источнике служит величина, называемая электродвижущей силой (ЭДС).

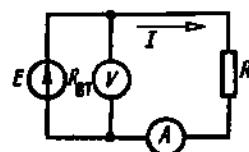


Рис. 2.1. Схема простейшей электрической цепи

Вследствие движения зарядов в цепи возникает ток и в потребителе расходуется энергия, запасенная источником. Для количественной оценки указанных энергетических преобразований в источнике служит величина, называемая электродвижущей силой (ЭДС).

ЭДС E численно равна работе, которую совершают сторонние силы при перемещении единичного положительного заряда внутри источника или сам источник, проводя единичный положительный заряд по замкнутой цепи.

Единицей ЭДС является вольт (В). Таким образом, ЭДС равна 1 В, если при перемещении заряда в 1 Кл по замкнутой цепи совершается работа в 1 Дж:

$$[E] = 1 \text{ Дж/1 Кл} = 1 \text{ В.} \quad (2.5)$$

Перемещение зарядов по участку цепи сопровождается затратой энергии.

Величину, численно равную работе, которую совершает источник, проводя единичный положительный заряд по данному участку цепи, называют **напряжением** U . Так как цепь состоит из внешнего и внутреннего участков, разграничивают понятия напряжений на внешнем $U_{\text{вн}}$ и внутреннем $U_{\text{вт}}$ участках.

Из определений очевидно, что ЭДС источника равна сумме напряжений на внешнем и внутреннем участках цепи:

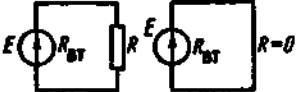
$$E = U_{\text{вн}} + U_{\text{вт}}. \quad (2.6)$$

Эта формула выражает закон сохранения энергии для электрической цепи.

Измерить напряжения на различных участках цепи можно только при замкнутой цепи. ЭДС измеряют между зажимами источника при разомкнутой цепи.

Карточка № 2.2 (290)
ЭДС и напряжение

Какой характеристикой источника является ЭДС — силовой или энергетической?	Силовой	29
	Энергетической	139
Встречают ли сторонние силы противодействие в процессе разделения зарядов внутри источника?	Встречают	66
	Не встречают	74
Почему при разомкнутой цепи источника разделение зарядов прекращается в определенный момент?	Энергия источника иссякает	99
	Возникшее электрическое поле уравновешивает поле сторонних сил	154

Для какой из приведенных схем справедливо равенство $E = U_{вт}$? 	Для левой	120
	Для правой	43
Будет ли проходить в цепи постоянный ток, если вместо источника ЭДС включить заряженный конденсатор?	Не будет	163
	Будет, но недолго	89
	Будет	109

§ 2.4. ЗАКОН ОМА

Рассмотрим участок цепи длиной l и площадью поперечного сечения S (рис. 2.2.).

Пусть проводник находится в однородном электрическом поле напряженностью $\mathcal{E} = U/l$. Под действием этого поля свободные электроны проводника совершают ускоренное движение в направлении, противоположном вектору $\mathcal{E}$. Движение электронов происходит до тех пор, пока они не столкнутся с ионами

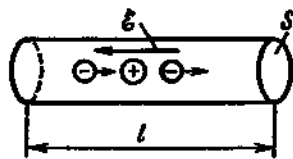


Рис. 2.2. Участок электрической цепи в виде отрезка металлического проводника

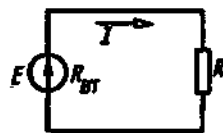


Рис. 2.3. К выводу закона Ома для всей цепи

кристаллической решетки проводника. При этом скорость электронов падает до нуля, после чего процесс ускорения электронов повторяется снова. Так как движение электронов равноускоренное, то их средняя скорость

$$v_{\text{ср}} = v_{\text{max}}/2, \quad (2.7)$$

где v_{max} — скорость электронов перед столкновением с ионами.

Очевидно, что скорость v_{max} прямо пропорциональна напряженности поля $\mathcal{E}$; следовательно, и средняя скорость пропорциональна $\mathcal{E}$. Но ток и плотность тока определяются скоростью движения электронов в проводнике. Таким образом,

$$I = \gamma \mathcal{E}. \quad (2.8)$$

Это выражение является дифференциальной формой закона Ома.

Коэффициент пропорциональности γ называют удельной электрической проводимостью. Он зависит от материала проводника и при данной температуре является постоянной величиной.

Преобразуем выражение (2.8). Так как $I = I/S$, $\mathcal{E} = U/l$, а $\gamma = 1/\rho$ (ρ — удельное сопротивление), то $I/S = (1/\rho) (U/l)$, откуда

$$I = \frac{U}{\rho l/S}.$$

Введя понятие сопротивления проводника через соотношения $\rho l/S = R$ (R — сопротивление проводника), окончательно получим

$$I = U/R. \quad (2.9)$$

Выражение (2.9) является законом Ома для участка цепи: сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению, приложенному к этому участку.

Приведенные рассуждения справедливы при условии, что γ , а следовательно, и R — постоянные величины, т. е. для линейной цепи, характеризуемой зависимостью $I = (1/R)U$, ток линейно зависит от напряжения. Отсюда следует важный вывод: закон Ома справедлив для линейных цепей ($R = \text{const}$).

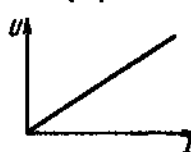
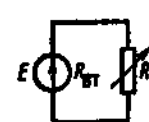
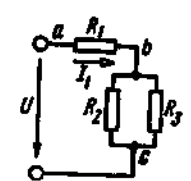
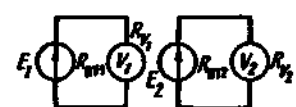
Рассмотрим полную цепь (рис. 2.3). Согласно закону Ома для участка цепи, $U = IR$, $U_{\text{вт}} = IR_{\text{вт}}$. Тогда в соответствии с (2.6) $E = IR + IR_{\text{вт}}$. Отсюда

$$I = E / (R + R_{\text{вт}}). \quad (2.10)$$

Выражение (2.10) является законом Ома для всей цепи: сила тока в цепи прямо пропорциональна ЭДС источника.

Из выражения $E = U + U_{\text{вт}}$ следует, что $U = E - IR_{\text{вт}}$, т. е. при наличии тока в цепи напряжение на ее зажимах меньше ЭДС источника на значение падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника.

Карточка № 2.3 (158)
Закон Ома

При каком условии справедлив приведенный график? 	$R = \text{const}$	115
	$R \neq \text{const}$	92
В результате изменения сопротивления нагрузки ток в цепи увеличился. Как это влияет на напряжение на зажимах цепи? 	Напряжение U растет	160
	Напряжение U уменьшается	3
	Напряжение U остается неизменным	71
Какая из приведенных формул для определения тока I_1 не верна? 	$I_1 = U/R_1$	100
	$I_1 = U_{\text{вн}}/R_1$	144
	$I_1 = U/R_{\text{св}}$	201
Что можно сказать о соотношении между показаниями вольтметров, если $R_{V2} > R_{V1}$; $E_1 = E_2$; $R_{\text{вт}1} = R_{\text{вт}2}$? 	$U_1 = U_2$	123
	$U_1 < U_2$	151
	$U_1 > U_2$	60
В одинаковых схемах включены различные амперметры, причем $R_{A1} > R_{A2}$. Какой амперметр сильнее влияет на режим работы цепи? 	Второй	2
	Первый	145
	Оба амперметра одинаково влияют на режим работы цепи	155

§ 2.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ПРОВОДИМОСТЬ

При наличии электрического тока в проводниках движущиеся свободные электроны, сталкиваясь с ионами кристаллической решетки, испытывают противодействие своему движению. Это противодействие количественно оценивается сопротивлением цепи. По закону Ома для участка цепи, $I = U/R$, откуда $R = U/I$. За единицу сопротивления принято сопротивление такого участка цепи, в котором устанавливается ток в 1 А при напряжении в 1 В:

$$[R] = 1 \text{ В/1 А} = 1 \text{ Ом.} \quad (2.11)$$

Более крупными единицами сопротивления являются килоом (кОм): 1 кОм = 10^3 Ом; мегаом (МОм); 1 МОм = 10^6 Ом.

В § 2.4 была получена формула, выражающая зависимость сопротивления R от геометрии и свойств материала проводника:

$$R = \rho l/S. \quad (2.12)$$

Преобразовав формулу (2.12), получим $\rho = RS/l$.

По определению, удельное сопротивление ρ численно равно сопротивлению проводника длиной 1 м, площадью поперечного сечения 1 м² при температуре 20° С.

Единица удельного сопротивления Ом·м. Значение ρ для металлов при такой единице очень мало. Поэтому для удобства расчетов поперечное сечение проводника берут в квадратных миллиметрах. Тогда единицей ρ будет Ом·мм²/м.

Значения удельных сопротивлений некоторых материалов приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Материал	Удельное электрическое сопротивление ρ при температуре 20° С, Ом·мм ² /м	Среднее значение температурного коэффициента сопротивления α в диапазоне изменения температуры 0—100° С, 1/°С
Медь	0,0175	0,004
Бронза	0,021—0,4	0,004
Алюминий	0,029	0,004
Вольфрам	0,056	0,00464
Латунь	0,07—0,08	0,002

Материал	Удельное электрическое сопротивление ρ при температуре 20° С, Ом·мм ² /м	Среднее значение температурного коэффициента сопротивления α в диапазоне изменения температуры 0—100° С, 1/°С
Сталь	0,13—0,25	0,006
Константан	0,4—0,51	0,000005
Манганин	0,42	0,000006
Нихром	1,1	0,00015
Хромаль	1,3	0,00004
Фехраль	1,4	0,00028

При расчете электрических цепей иногда удобнее пользоваться не сопротивлением, а величиной, обратной сопротивлению, т. е. электрической проводимостью:

$$g = 1/R = \gamma S/l = I/U, \quad (2.13)$$

где $\gamma = 1/\rho$ — удельная проводимость.

Единицей электрической проводимости является сименс (См):

$$[g] = 1/1 \text{ Ом} = 1 \text{ См}. \quad (2.14)$$

Элементы электрической цепи, характеризующиеся сопротивлением R , называют резистивными (рис. 2.4, 2.5). Они могут быть проволочными и непроволочными. Проволочные резисторы и реостаты



Рис. 2.4. Внешний вид резистора



Рис. 2.5. Внешний вид реостата

изготавливают из материалов с большим удельным сопротивлением. При этом обеспечивается нужное сопротивление при относительно малых габаритах.

Реостат обеспечивает получение переменного сопротивления, значение которого регулируется изменением положения подвижного контакта реостата.

Длину и диаметр проводника увеличили в 2 раза. Как изменится сопротивление проводника?	Не изменится	9
	Уменьшится в 2 раза	140
	Увеличится в 2 раза	67
Известно сопротивление проводника R при $t = 20^\circ \text{С}$, его длина l и площадь поперечного сечения S : $R = 4,2 \text{ Ом}$; $l = 10 \text{ м}$; $S = 1 \text{ мм}^2$. Определить материал проводника	Фехраль	108
	Алюминий	106
	Манганин	147
	Нихром	167
Почему спираль ползункового реостата не изготавливают из медного провода?	Его сопротивление незначительно	50
	Он будет громоздким	159
Обязательно ли в качестве материала для изготовления резисторов использовать металлы?	Не обязательно	165
	Обязательно	83
Как изменится проводимость проводника при увеличении площади его поперечного сечения S ?	Увеличится	136
	Уменьшится	17

§ 2.6. ОСНОВНЫЕ ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПРОВОДНИКОВЫЕ ИЗДЕЛИЯ

Проводниковые материалы подразделяют на две группы. К первой группе относят материалы с низким удельным сопротивлением. Они применяются для изготовления проводов и токопроводящих участков различных электро- и радиотехнических устройств. Самое низкое удельное сопротивление имеют серебро и золото, однако стоимость этих проводниковых материалов очень высока. В связи с этим они используются для ответственных контактных соединений, в технике СВЧ и т. д., если невозможно применить другие материалы.

Самыми распространенными проводниковыми материалами являются медь и алюминий. Медь имеет низкое удельное сопротивление (почти в два раза меньше, чем у алюминия; см. табл. 2.1), хорошие механические свойства. Она используется для изготовления силовых кабелей и шин обмоточных и монтажных проводов и контактных соединений.

Алюминий уступает меди по своим электрическим и механическим свойствам. Однако он характеризуется низкой стоимостью и гораздо меньшей плотностью, чем у меди. В связи с этим алюминий является основным материалом для изготовления проводов воздушных ЛЭП.

Ко второй группе относятся материалы с высоким удельным сопротивлением. Манганин (сплав меди, марганца и никеля) имеет очень малый коэффициент α , используется для изготовления эталонов, магазинов сопротивлений, шунтов, добавочных резисторов к измерительным приборам.

Фехраль (сплав железа, хрома и алюминия) и константан (сплав меди и никеля) применяются в основном для изготовления резисторов, нихром (сплав никеля и хрома с добавлением марганца) — для изготовления элементов нагревательных приборов.

Особо следует остановиться на сверхпроводниках. Это материалы, у которых возможен переход в сверхпроводящее состояние. К ним относятся чистые металлы, сплавы, интерметаллические соединения, некоторые диэлектрические материалы. Возможности практического использования сверхпроводимости определяются температурой перехода в сверхпроводящее состояние $T_{кр}$ (близкой к температуре абсолютного нуля) и критической напряженностью магнитного поля $H_{кр}$. Основная трудность в разработке сверхпроводников — повышение $T_{кр}$.

Области применения сверхпроводников все время расширяются. Это волноводы, электрические машины и трансформаторы с высоким КПД, обмотки электромагнитов в ускорителях элементарных частиц и т. д.

Проводниковые (кабельные) изделия можно подразделить на обмоточные, монтажные и установочные провода, а также кабели.

Обмоточные провода применяются для изготовления обмоток электрических машин и приборов. Их выпускают с жилами из проводниковой меди, проводникового алюминия и сплавов с большим удельным сопротивлением (манганин, нихром и т. д.).

Монтажные провода и кабели предназначаются для различного рода соединений в электрических аппаратах, приборах и других электроустройствах. Жилы этих проводов выполняются лужеными из проводниковой меди.

Установочные провода используются для распределения электроэнергии в силовых и осветительных сетях. Установочные провода выпускают с медными и алюминиевыми жилами (однопроводными и многопроводными).

§ 2.7. ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

С повышением температуры проводника увеличивается амплитуда колебательного движения ионов в узлах кристаллической решетки. Это приводит к возрастанию числа столкновений свободных электронов с ионами, а следовательно, к уменьшению средней скорости направленного движения электронов, а значит, и удельной электрической проводимости, что соответствует увеличению сопротивления проводника. Подобное явление характерно для металлов. В проводниках второго рода (например, электролитах) при повышении температуры возрастает число свободных электронов и ионов в единице объема проводника и сопротивление проводника уменьшается. К таким проводникам относятся уголь и графит.

Существуют сплавы металлов (например, манганин), сопротивление которых почти не зависит от температуры. Для количественной оценки зависимости сопротивления металлов от температуры служит температурный коэффициент сопротивления α .

Температурный коэффициент сопротивления определяет относительное изменение сопротивления при изменении температуры на 1°C .

При незначительных изменениях температуры ($0-100^\circ\text{C}$) значение α для большинства металлов постоянно: $\alpha \approx 0,004 \text{ } 1/^\circ\text{C}$.

Обозначив R_1 и R_2 сопротивления при температурах соответственно θ_1 и θ_2 , по определению α получим

$$\frac{R_2 - R_1}{R_1(\theta_2 - \theta_1)} = \alpha.$$

Преобразуем это выражение относительно R_2 :

$$R_2 = R_1 + R_1\alpha(\theta_2 - \theta_1) = R_1[1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)]. \quad (2.15)$$

Из (2.15) следует, что $\theta_2 = \frac{R_2 - R_1}{R_1\alpha} + \theta_1$.

Значение α для различных металлов и сплавов указаны в табл. 2.1.

Карточка № 2.5 (281)
Зависимость сопротивления от температуры

Каким признаком характеризуются металлические проводники?	Наличием свободных ионов	55
	Наличием свободных электронов	80
	Наличием свободных электронов и ионов	59
	Отсутствием свободных электронов и ионов	95
Какое явление приводит к увеличению сопротивления металлического проводника?	Изменение напряженности электрического поля	85
	Уменьшение расстояния между ионами кристаллической решетки	128
	Увеличение амплитуды колебаний ионов в узлах кристаллической решетки	44
	Изменение концентрации зарядов (числа заряженных частиц в единице объема)	146
Какой из факторов больше влияет на изменение сопротивления проводников второго рода?	Изменение концентрации зарядов	18
	Изменение числа столкновений зарядов	4
Зависит ли сопротивление катушки, изготовленной из медного провода, от приложенного к ней напряжения?	Не зависит	101
	Сильно зависит	81
	Почти не зависит	87
Существуют ли химически чистые металлы, у которых температурный коэффициент сопротивления $\alpha=0$?	Существуют	32
	Не существуют	58

§ 2.8. СПОСОБЫ СОЕДИНЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ

При расчете цепей приходится сталкиваться с различными схемами соединений потребителей. В случае цепи с одним источником часто получается смешан-

ное соединение, представляющее собой комбинацию параллельного и последовательного соединений, известных из курса физики. Задача расчета такой цепи состоит в том, чтобы определить токи и напряжения отдельных ее участков.

Соединение, при котором по всем участкам проходит один и тот же ток, называют последовательным. Любой замкнутый путь, проходящий по нескольким участкам, называют контуром электрической цепи. Например, цепь, показанная на рис. 2.3, является одноконтурной.

Участок цепи, вдоль которого проходит один и тот же ток, называют ветвью, а место соединения трех и большего числа ветвей — узлом.

На рис. 2.6 показан участок цепи, состоящий из шести ветвей и трех узлов.

Соединение, при котором все участки цепи присоединяются к одной паре узлов, т. е. находятся под действием одного и того же напряжения, называют параллельным.

Рассмотрим различные способы соединения сопротивлений подробнее.

Параллельное соединение. Схема рис. 2.6 представляет собой последовательное соединение участков цепи ab и bc . В свою очередь, эти участки представляют собой параллельное соединение сопротивлений. Выясним свойства такого соединения сопротивлений.

1. Рассмотрим соотношение токов, например, для узла a цепи. Очевидно, что ток, приходящий к узлу, равен току, уходящему от узла: $I - I_1 - I_2 = 0$. В общем виде

$$\sum I = 0. \quad (2.16)$$

Это уравнение отражает первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма токов ветвей для любого узла электрической цепи равна нулю.

Первый закон Кирхгофа является следствием закона сохранения заряда, согласно которому в узле

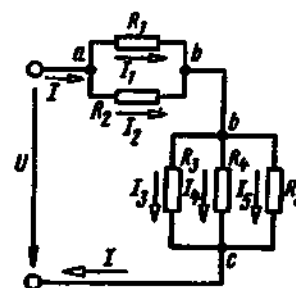


Рис. 2.6. Смешанное соединение сопротивлений

заряд одного знака не может ни накапливаться, ни убывать.

При составлении уравнения для какого-либо узла цепи необходимо иметь в виду, что токи, направленные к узлу, условились брать со знаком плюс, а токи, направленные от узла, — со знаком минус.

II. При параллельном соединении все ветви одним полюсом присоединяют к одному узлу, а другим — к другому. Так как потенциалы этих узлов фиксированы, то и разность их фиксирована и одинакова для всех ветвей, входящих в соединение.

Применительно к схеме рис. 2.6 получим $U_1 = U_2 = U_{ab}$; $U_3 = U_4 = U_5 = U_{bc}$, т. е. при параллельном соединении сопротивлений напряжения на ветвях одинаковы.

III. Применим закон Ома для всех ветвей параллельного разветвления на участке bc . Тогда $U_{bc} = I_3 R_3 = I_4 R_4 = I_5 R_5$, откуда

$$I_3/I_4 = R_4/R_3 \text{ и } I_3/I_5 = R_5/R_3. \quad (2.17)$$

Таким образом, при параллельном соединении токи ветвей обратно пропорциональны их сопротивлениям.

IV. Во многих случаях рассчитывают не исходные сложные, а упрощенные (эквивалентные) схемы замещения. Под схемой замещения понимают такую схему, которая обеспечивает неизменность режимов работы во всех ветвях электрической цепи.

Часто приходится прибегать к замене резистивных элементов, соединенных сложным образом, одним, сопротивлением которого равно общему сопротивлению исходных элементов. Найдем эквивалентное сопротивление при параллельном соединении ветвей, подключенных к узлам b и c (рис. 2.6).

Согласно первому закону Кирхгофа, для узла b справедливо равенство

$$I = I_3 + I_4 + I_5. \quad (2.17a)$$

Вместе с тем согласно закону Ома и условию эквивалентности можно записать $I_3 = U_{bc}/R_3$, $I_4 = U_{bc}/R_4$, $I_5 = U_{bc}/R_5$, $I = U_{bc}/R_{\text{эк}}$. Подставляя эти выражения в (2.17a), получим $U_{bc}/R_{\text{эк}} = U_{bc}/R_3 + U_{bc}/R_4 + U_{bc}/R_5$, откуда

$$1/R_{\text{эк}} = 1/R_3 + 1/R_4 + 1/R_5. \quad (2.18)$$

Переходя от сопротивлений участков к их проводимостям, определим

$$g_{\text{эк}} = g_3 + g_4 + g_5. \quad (2.19)$$

В общем виде

$$g_{\text{эк}} = \sum g.$$

При параллельном соединении эквивалентная, или общая, проводимость равна сумме проводимостей всех параллельных ветвей.

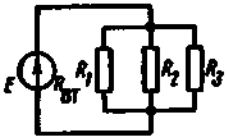
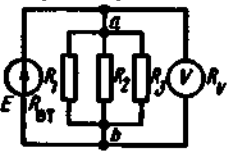
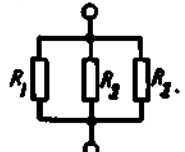
Определенный интерес для практики представляют два частных случая: 1) соединение состоит из двух ветвей с различными сопротивлениями; 2) соединение состоит из n ветвей с одинаковыми сопротивлениями. В первом случае, применяя формулу (2.18), найдем

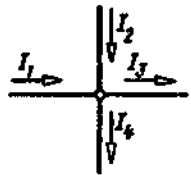
$$R_{\text{эк}} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2), \quad (2.20)$$

во втором

$$R_{\text{эк}} = R/n. \quad (2.21)$$

Карточка № 2.6а (280)
Параллельное соединение сопротивлений

Как изменится напряжение на параллельном разветвлении, подключенном к источнику с $R_{\text{вт}} \neq 0$, если число ветвей увеличить? 	Не изменится	88
	Увеличится	75
	Уменьшится	105
Каким должно быть сопротивление вольтметра, чтобы он не влиял на режим работы цепи? 	$R_v = 0$	117
	$R_v \gg R_{\text{аб}}$	76
	$R_v \approx R_{\text{аб}}$	38
Найти эквивалентное сопротивление данного разветвления, если $R_1 = 4 \text{ Ом}$; $R_2 = 2 \text{ Ом}$; $R_3 = 3 \text{ Ом}$ 	$R_{\text{эк}} \approx 1,1 \text{ Ом}$	57
	$R_{\text{эк}} \approx 0,9 \text{ Ом}$	27
	$R_{\text{эк}} \approx 2,7 \text{ Ом}$	46

Как изменятся токи I_1 и I_2, если сопротивление R_3 уменьшится? 	Увеличатся	93
	Уменьшатся	150
	Останутся неизменными	64
Какое из приведенных уравнений не соответствует рисунку? 	$I_1 + I_2 = I_3 + I_4$	69
	$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$	162
	$I_3 + I_4 - I_1 - I_2 = 0$	152
	$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0$	22

Последовательное соединение. Как указывалось, схема рис. 2.6 представляет собой последовательное соединение участков цепи ab и bc . Эту схему можно представить так, как показано на рис. 2.7, где R_{ab} — сопротивление, эквивалентное сопротивлению участка ab ; R_{bc} — сопротивление, эквивалентное сопротивлению участка bc . Полученная схема представляет собой последовательное соединение сопротивлений.

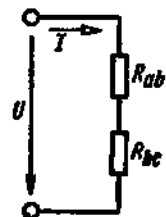


Рис. 2.7. Последовательное соединение сопротивлений

участках: $U = U_{ab} + U_{bc}$. В общем виде

$$U = \sum U. \quad (2.22)$$

III. Согласно закону Ома для участка цепи можно записать $U_{ab} = IR_{ab}$; $U_{bc} = IR_{bc}$. Поделив приведенные

равенства одно на другое, получим $U_{ab}/U_{bc} = R_{ab}/R_{bc}$, т. е. напряжения на участках цепи при последовательном соединении прямо пропорциональны сопротивлениям этих участков.

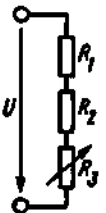
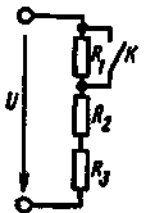
Из этого очень важного свойства вытекают условия перераспределения напряжений на участках цепи при изменении сопротивлений этих участков.

IV. В общем случае, если имеется n последовательно соединенных сопротивлений, согласно второму свойству, $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$. Тогда $IR_{\Sigma} = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n$ или, сократив на I ,

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + \dots + R_n. \quad (2.23)$$

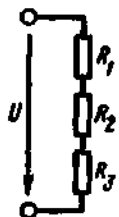
В общем виде $R_{\Sigma} = \sum R$.

Карточка № 2.66 (226)
Последовательное соединение сопротивлений

В приведенной схеме сопротивление R_3 увеличилось. Как изменится напряжение на других участках цепи, если напряжение $U = \text{const}$? 	Не изменится	94
	Уменьшится	19
Как изменится напряжение на участках R_2 и R_3 при замыкании ключа К ($U = \text{const}$)? 	Увеличится	86
	Уменьшится	20
	Не изменится	161
		61

Дано: $R_1 = 10 \text{ Ом}$; $R_2 = 20 \text{ Ом}$; $R_3 = 70 \text{ Ом}$; $U = 100 \text{ В}$.

Сопротивления цепи заменили на $R_1 = 20 \text{ кОм}$; $R_2 = 40 \text{ кОм}$; $R_3 = 140 \text{ кОм}$ ($U = \text{const}$). Как изменится напряжение на участках цепи?



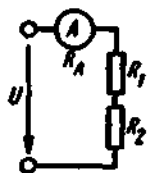
Увеличится	33
Не изменится	8
Уменьшится	63

Для измерения напряжения сети последовательно соединили два вольтметра с номинальным напряжением 150 В и сопротивлениями 28 и 16 кОм. Определить показания каждого вольтметра



110 В	5
140 и 80 В	62

Каким должно быть сопротивление амперметра R_A , чтобы он не влиял на режим работы цепи?



$R_A \gg R_1 + R_2$	133
$R_A \approx R_1 + R_2$	137
$R_A \ll R_1 + R_2$	156

Смешанное соединение. Смешанное соединение представляет собой комбинацию параллельного и по-

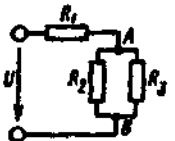
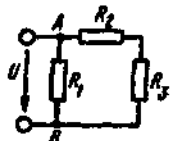
следовательного соединений сопротивлений. Определим по схеме рис. 2.6 токи и напряжения на всех участках цепи. Пусть напряжения на зажимах цепи U и сопротивления ее участков заданы.

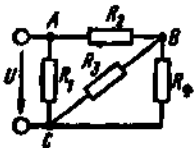
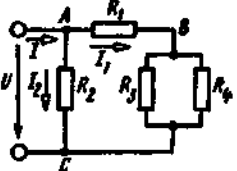
Эквивалентное сопротивление цепи $R_{эк} = R_{ab} + R_{bc}$, где $R_{ab} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$; $1/R_{bc} = 1/R_3 + 1/R_4 + 1/R_5$.

Общий ток источника $I = U/R_{эк}$, напряжения на участках ab и bc $U_{ab} = I R_{ab}$; $U_{bc} = I R_{bc}$.

Токи в соответствующих ветвях: $I_1 = U_{ab}/R_1$; $I_2 = U_{ab}/R_2$; $I_3 = U_{bc}/R_3$; $I_4 = U_{bc}/R_4$; $I_5 = U_{bc}/R_5$.

Карточка № 2.6а (214)
Смешанное соединение сопротивлений

Какое соединение представлено на схеме?	Параллельное	157
	Смешанное	21
Как изменится напряжение на участке AB, если параллельно ему включить еще одно сопротивление ($U = \text{const}$)?	Не изменится	135
	Уменьшится	15
	Увеличится	77
Можно ли считать, что сопротивления R_1 и R_3 включены параллельно?	Можно	131
	Нельзя	166

Можно ли считать, что сопротивления R_2 и R_4 включены последовательно? 	Нельзя	114
Выберите правильную формулу для определения тока I_1 	Можно	35
	$I_1 = U/R_1$	79
	$I_1 = \frac{U}{R_1 + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}}$	41

§ 2.9. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РАБОТА И МОЩНОСТЬ. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ

Если электрическую цепь замкнуть, то в ней возникнет электрический ток. При этом энергия источника будет расходоваться. Найдем работу, которую совершает источник тока для перемещения заряда q по всей замкнутой цепи. Исходя из определения ЭДС получим

$$W_n = Eq. \quad (2.24)$$

Но так как $q = It$, $E = U + U_{вт}$, то $W_n = (U + U_{вт}) \times It$, или $W_n = UIt + U_{вт}It$, где $UIt = W$ — работа, совершаемая источником на внешнем участке цепи; $U_{вт}It = W_{вт}$ — потеря энергии внутри источника.

Используя закон Ома для участка цепи, можно записать

$$W = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t. \quad (2.25)$$

Величину, характеризующую скоростью, с которой совершается работа, называют **мощностью**:

$$P = W/t. \quad (2.26)$$

Соответственно мощность, отдаваемая источником,

$$P_n = EIt/t = EI. \quad (2.27)$$

Мощность потребителей

$$P = UIt/t = UI = I^2 R = U^2/R \quad (2.28)$$

Мощность потерь энергии внутри источника

$$P_{вт} = U_{вт}I = I^2 R_{вт} = U_{вт}^2/R_{вт}. \quad (2.29)$$

Единица мощности — ватт (Вт):

$$[P] = 1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ Вт}, \quad (2.30)$$

т. е. мощность равна 1 Вт, если за 1 с совершается работа в 1 Дж.

Электрическая работа выражается в джоулях, но согласно формуле $P = W/t$ имеем $W = Pt$, откуда

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot 1 \text{ с} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}. \quad (2.31)$$

На практике пользуются такими единицами работы, как киловатт-час (кВт·ч): $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3\,600\,000 \text{ Вт} \cdot \text{с}$.

Когда в цепи с сопротивлением R существует ток, электроны, перемещаясь под действием поля, сталкиваются с ионами кристаллической решетки проводника. При этом кинетическая энергия электронов передается ионам, что приводит к увеличению амплитуды колебательного движения ионов, и, следовательно, к нагреванию проводника. Количество теплоты, выделенной в проводнике,

$$Q = I^2 R t. \quad (2.32)$$

Приведенная зависимость носит название **закона Ленца** — Джоуля: *количество теплоты, выделяемой при прохождении тока в проводнике, пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока.*

Преобразование электрической энергии в тепловую имеет большое практическое значение и широко используется в различных нагревательных приборах как в промышленности, так и в быту. Однако часто тепловые потери являются нежелательными, так как они вызывают непроизводительные расходы энергии, например в электрических машинах, трансформаторах и других устройствах, что снижает их КПД.

Карточка № 2.7 (107)
Электрическая работа и мощность.
Преобразование электрической энергии в тепловую

Изменятся ли потери энергии внутри источника при изменении сопротивления внешнего участка цепи при условии, что ЭДС $E = \text{const}$?	Изменятся	102
	Не изменятся	98
Два источника имеют одинаковые ЭДС и тока, но различные внутренние сопротивления. Какой из источников имеет больший КПД?	КПД источников равны	168
	С меньшим внутренним сопротивлением	129
	С большим внутренним сопротивлением	110
Как изменится количество теплоты, выделяющейся в нагревательном приборе, при ухудшении контакта в штепсельной розетке?	Не изменится	118
	Увеличится	111
	Уменьшится	104
Какая из формул для определения количества теплоты, выделяющейся в проводнике, является наиболее универсальной?	$Q = I^2 R t$	39
	$Q = \frac{U^2}{R} t$	30
	$Q = U I t$	45
	$Q = W$	49
Для нагревания воды в баке применяют электрическую печь, ток которой равен 10 А при напряжении 120 В. Определить КПД печи, если для нагревания воды затрачивается 250 кДж и нагревание продолжается 4,5 мин	77%	23
	4,6%	130

§ 2.10. ТОКОВАЯ НАГРУЗКА ПРОВОДОВ И ЗАЩИТА ИХ ОТ ПЕРЕГРУЗОК

Рассмотрим процесс нагревания проводов в электрической цепи. В первый момент, когда температура провода равна температуре окружающей среды, вся теплота, выделяемая током, идет на нагрев провода. В результате его температура быстро повышается. По мере ее роста увеличивается количество теплоты, отдаваемой проводом среде, а количество теплоты, расходуемой на нагрев, уменьшается. Наконец, наступает

момент установления температурного баланса: количество отдаваемой энергии равно количеству полученной энергии и повышение температуры провода прекращается. Температуру провода, соответствующую моменту баланса, называют установившейся. Время, в течение которого провода нагреваются до установившейся температуры, зависит от их геометрических размеров и условий охлаждения. Нагрев провода допускается до температур порядка 60—80° С. В соответствии с допустимой температурой вводится понятие допустимого тока. Допустимым называют ток, при котором устанавливается наибольшая допустимая температура.

Площадь сечения проводов в зависимости от токовой нагрузки для медных проводов с резиновой и полихлорвиниловой изоляцией, проложенных открыто, определяют по табл. 2.2.

Таблица 2.2

S , мм ²	I , А	S , мм ²	I , А	S , мм ²	I , А	S , мм ²	I , А	S , мм ²	I , А	S , мм ²	I , А
0,5	11	10	80	120	385	2,5	30	50	215	300	695
0,75	15	16	100	150	440	4	41	70	270	400	830
1,0	17	25	140	185	510	6	50	95	330		
1,5	23	35	170	240	605						

Коротким замыканием называют соединение двух неизолированных проводов различного потенциала.

При нормальном режиме работы (рис. 2.8, а) ток $I = E / (R_n + R_{np} + R_{ст}) \approx E / R_n$, так как $R_n \gg R_{np} + R_{ст}$. При коротком замыкании $R_n \approx 0$. Тогда $I_n = E / (R_{ст} + R_{np}) \gg I$.

Ток короткого замыкания может практически в десятки и сотни раз превышать номинальный ток цепи, что может вызвать тепловые и механические повреждения ее отдельных элементов. Для защиты цепи от перегрузок служат плавкие предохранители (вставки), которые при определенном токе плавятся, разрывая

электрическую цепь. Схема включения плавкого предохранителя показана на рис. 2.9.

Под номинальным понимают такой режим работы, при котором напряжение, ток и мощность в элементах электрической цепи соответствуют тем значе-

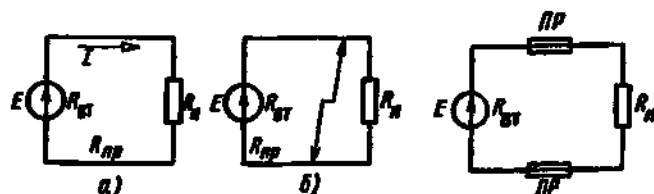


Рис. 2.8. Схема цепи при нормальном режиме работы (а) и режим короткого замыкания (б)

Рис. 2.9. Схема цепи с защитой от короткого замыкания

ниям, на которые они рассчитаны заводом-изготовителем. При этом гарантируются наилучшие условия работы (экономичность, долговечность и т. д.).

Кроме номинального режима работы источника существуют режимы короткого замыкания и холостого хода. Режимом короткого замыкания называют режим, при котором напряжение на внешних зажимах источника равно нулю. Режимом холостого хода источника называют режим, при котором ток в нем равен нулю.

Карточка № 2.8 (204)
Токсовая нагрузка проводов и защита их от перегрузок

Какой из проводов одинакового диаметра и длины сильнее нагреется — медный или стальной — при одном и том же токе?	Медный	26
	Стальной	103
	Оба провода нагреваются одинаково	70
Какой из проводов одинаковой длины из одного и того же материала, но разного диаметра, сильнее нагревается при одном и том же токе?	Оба провода нагреваются одинаково	62
	Сильнее нагревается провод с большим диаметром	31
	Сильнее нагревается провод с меньшим диаметром	153

Продолжение

Какой из проводов одинакового диаметра и из одного и того же материала, но разной длины, сильнее нагревается при одном и том же токе?	Более короткий	78
	Более длинный	28
	Оба провода нагреваются одинаково	90
Каким должно быть соотношение между температурой плавления плавкой вставки предохранителя $t_{пред}$ и температурой плавления проводов $t_{пр}$?	$t_{пред} > t_{пр}$	113
	$t_{пред} < t_{пр}$	121
	$t_{пред} = t_{пр}$	25
Установлено, что для медного провода, проложенного открыто, нагрузка составляет 32 А. Выберите стандартную площадь сечения проводов, пользуясь табл. 2.2	2,5 мм ²	40
	4 мм ²	37

§ 2.11. ПОТЕРИ НАПРЯЖЕНИЯ В ПРОВОДАХ

При передаче энергии по проводам большой протяженности (рис. 2.10) приходится считаться с их сопротивлением, на котором происходит заметное падение напряжения:

$$\Delta U = IR_A = I \frac{2l}{\gamma S}. \quad (2.33)$$

При заданном напряжении U_1 на входе линии напряжение на нагрузке при номинальном токе нагрузки $U_2 = U_1 - \Delta U$.

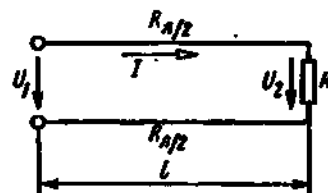


Рис. 2.10. Схема линии электропередачи

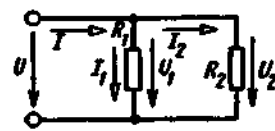


Рис. 2.11. Схема линии с распределенной нагрузкой

Падение напряжения ΔU не должно превышать определенных значений. Так, для осветительной нагрузки значение ΔU не должно превышать 2% от номинального напряжения. Найдем по заданному значению ΔU

необходимую площадь сечения провода S . Из формулы (2.33)

$$S = 2Il / (\gamma \Delta U). \quad (2.34)$$

Это выражение не универсально, и поэтому нагрузка линии задается в виде потребляемой мощности, а абсолютное значение потерь напряжения заменяется относительным:

$$\epsilon = \frac{\Delta U}{U_1} \cdot 100\%. \quad (2.35)$$

Использование ϵ вместо ΔU целесообразно, так как создается возможность универсального подхода к оценке линий электропередачи независимо от напряжения, при котором передается энергия.

Подставив в формулу (2.34) вместо ΔU значение, найденное из (2.35), получим

$$S = \frac{2Il}{\gamma U_1 \epsilon} \cdot 100\%. \quad (2.36)$$

Умножив числитель и знаменатель правой части на U_2 , окончательно найдем

$$S = \frac{2P_2 l}{\gamma U_1 U_2 \epsilon} \cdot 100\%. \quad (2.37)$$

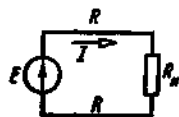
В процессе передачи энергии часть ее теряется в проводах. Мощность потерь $\Delta P = I^2 R_{\text{л}} = \Delta U I$. КПД линии электропередачи

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = \frac{U_1 I - \Delta U I}{U_1 I} = \frac{U_1 - \Delta U}{U_1} = \frac{U_2}{U_1}. \quad (2.38)$$

На практике приходится часто встречаться с линиями, нагрузка которых включена в различных местах (рис. 2.11).

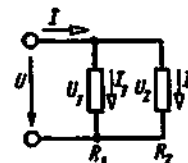
Карточка № 2.9 (299)
Потери напряжения в проводах

Сопротивление одного провода линии $R = 0,025$ Ом. Через нагрузку проходит постоянный ток 20 А. Определить потерю напряжения в линии	0,5 В	119
	1 В	148



Продолжение

При каком напряжении выгоднее передать энергию в линии при заданной мощности?	При пониженном	134
	При повышенном	138
	Безразлично	126
Каково соотношение между напряжениями U_1 и U_2 в середине и в конце линии?	$U_1 = U_2$	112
	$U_1 < U_2$	13
	$U_1 > U_2$	84
Как изменится напряжение U_1 в середине линии, если нагрузка в конце линии увеличится (см. схему предыдущей задачи)?	Увеличится	171
	Не изменится	73
	Уменьшится	127
Как изменится напряжение в конце линии, если в ее середине произойдет короткое замыкание?	Уменьшится	56
	Не изменится	51
	Станет равным нулю	132



§ 2.12. ДВА РЕЖИМА РАБОТЫ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

На практике часто встречаются цепи с двумя источниками, один из которых используется как генератор, а другой — как потребитель. Примером такого режима работы цепи может служить зарядка аккумулятора. Определим напряжение на зажимах источников.

Решим эту задачу в общем виде на примере схемы рис. 2.12. Для определения напряжений U_{BA} и U_{CD} на зажимах источников найдем потенциал точки B относительно точки A и потенциал точки C относительно точки D . Считаем, что $E_1 > E_2$. Тогда ток в цепи проходит по часовой стрелке, так как источник E_1 является генератором, а источник E_2 — потребителем.

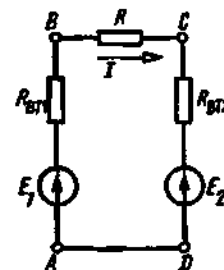


Рис. 2.12. Схема цепи с двумя источниками

Для определения тока I заменим источники E_1 и E_2 эквивалентным источником $E_{\text{эк}}$. Очевидно, что $E_{\text{эк}} = -E_1 - E_2$. Тогда на основании закона Ома для всей цепи

$$I = \frac{E_{\text{эк}}}{R + R_{\text{вт1}} + R_{\text{вт2}}} = \frac{E_1 - E_2}{R + R_{\text{вт1}} + R_{\text{вт2}}}, \quad (2.39)$$

где $R_{\text{вт1}}$ и $R_{\text{вт2}}$ — внутренние сопротивления источников E_1 и E_2 .

Рассчитаем потенциалы указанных точек. Участок BA состоит из сопротивления $R_{\text{вт1}}$ и источника E_1 . Выберем произвольно направление обхода цепи, например по часовой стрелке. Тогда на участке сопротивления $R_{\text{вт1}}$ потенциал уменьшится на $IR_{\text{вт1}}$, так как на резистивных элементах ток проходит от точек с более высоким потенциалом к точкам с более низким потенциалом. На участке источника E_1 потенциал повысится на E_1 , так как обход источника совпадает с направлением его ЭДС. Таким образом,

$$\varphi_B = \varphi_A - IR_{\text{вт1}}, \text{ или } \varphi_B - \varphi_A = U_{BA} = E_1 - IR_{\text{вт1}}. \quad (2.40)$$

Из выражения (2.40) следует, что напряжение на зажимах источника, работающего в режиме генератора, равно разности ЭДС и падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника.

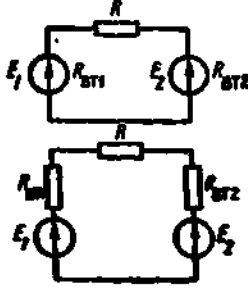
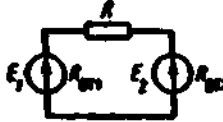
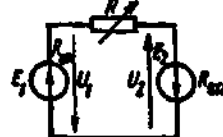
Данный вывод был получен при рассмотрении закона Ома для всей цепи с одним источником энергии, т. е. $I = E/(R + R_{\text{вт}})$, откуда $E = IR + IR_{\text{вт}}$. Так как $IR = U$ — напряжение на зажимах генератора, то $U = E - IR_{\text{вт}}$, что аналогично формуле (2.40). Проведя такие же рассуждения для участка CD , получим

$$\varphi_D = \varphi_C - IR_{\text{вт2}} - E_2, \text{ или } \varphi_C - \varphi_D = U_{CD} = E_2 + IR_{\text{вт2}}. \quad (2.41)$$

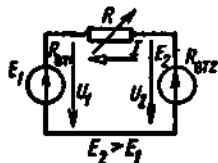
Следовательно, напряжение на зажимах источника, работающего в режиме потребителя, равно сумме ЭДС и внутреннего падения напряжения.

Умножив выражение (2.41) на I , получим $P_{CD} = -E_2 I + I^2 R_{\text{вт2}}$, т. е. энергия (мощность) источника E_1 на участке CD частично преобразуется в химическую или механическую энергию в зависимости от характера источника E_2 (аккумулятор или электрическая машина), частично в тепловую энергию внутри источника E_2 .

Карточка № 2.10 (102)
Два режима работы источника питания

Являются ли приведенные схемы эквивалентными?	Не являются	158
	Являются	116
Согласно § 2.12, ток в данной схеме выражается формулой $I = (E_1 - E_2) / (R_1 + R_{\text{вт1}} + R_{\text{вт2}})$.	Отражает	1
 или в иной форме записи $I = E_1 / (R_1 + R_{\text{вт1}} + R_{\text{вт2}}) - E_2 / (R_1 + R_{\text{вт1}} + R_{\text{вт2}})$ Отражает ли эта запись приведенные схемы?	Не отражает	42
	Как изменятся напряжения U_1 и U_2 на зажимах источников при уменьшении сопротивления R ?	66
	U_1 увеличится, U_2 уменьшится	66
	U_1 и U_2 увеличатся	143
	U_1 уменьшится, U_2 увеличится	52
	U_1 и U_2 уменьшатся	7

Как изменятся напряжения U_1 и U_2 на зажимах источников при уменьшении тока I ?	U_1 уменьшится, U_2 увеличится	141
	U_1 увеличится, U_2 уменьшится	142
Имеет ли значение направление обхода цепи для определения разности потенциалов между любыми ее точками?	Не имеет	36
	Имеет	164



§ 2.13. РАСЧЕТ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Сложной называют электрическую цепь, не сводящуюся к последовательному и параллельному соединению потребителей.

В качестве примера рассмотрим сложную цепь рис. 2.13. Задача сводится к определению токов во всех ее ветвях, в нашем случае токов I_1 , I_2 и I_3 . Значения ЭДС и сопротивлений заданы.

Существует несколько методов расчета сложных цепей. Рассмотрим некоторые из них.

Метод узловых и контурных уравнений. Приведем методику решения задачи этим методом.

Направление токов выбирают произвольно. Если в результате решения отдельные токи окажутся отрицательными, то это будет означать, что в действительности они проходят в направлении, противоположном выбранному. Для определения трех неизвестных токов необходимо составить три независимых уравнения, связывающих эти токи. На основании первого закона Кирхгофа для узла c

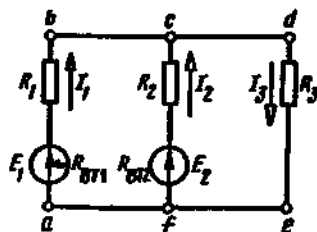


Рис. 2.13. Сложная электрическая цепь

необходимо составить три независимых уравнения, связывающих эти токи. На основании первого закона Кирхгофа для узла c

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0. \quad (2.42)$$

Уравнение для узла f имеет вид

$$I_3 - I_2 - I_1 = 0,$$

т. е. оно совпадает с уравнением (2.42). Таким образом, если в схеме два узла, то число независимых уравнений, составленных с помощью первого закона Кирхгофа, одно. Обобщая это положение, приходим к выводу, что если сложная цепь имеет n узлов, то число уравнений, которые можно составить на основании первого закона Кирхгофа, на единицу меньше, т. е. $n - 1$.

Недостающие уравнения можно получить на основании второго закона Кирхгофа. Возьмем контур $abcf$ (рис. 2.13) и определим потенциал точки a относительно той же точки, совершив обход этого контура по часовой стрелке:

$$\varphi_a = \varphi_a + E_1 - I_1 R_{m1} - I_1 R_1 + I_2 R_2 - E_2 + I_2 R_{m2}. \quad (2.43)$$

Записывая формулу (2.43) так, чтобы ЭДС оказались в левой части, а падения напряжения — в правой, получим уравнение, соответствующее второму закону Кирхгофа:

$$E_1 - E_2 = I_1 R_{m1} + I_1 R_1 - I_2 R_{m2} - I_2 R_2.$$

В общем виде

$$\sum E = \sum IR. \quad (2.44)$$

Таким образом, алгебраическая сумма ЭДС любого замкнутого контура равна алгебраической сумме падений напряжений этого контура.

Если направление обхода контура совпадает с направлением ЭДС и токов, то эти ЭДС и соответствующие падения напряжений берут со знаком плюс, в противном случае они будут отрицательными. Данное уравнение позволяет получить новое соотношение между неизвестными токами. Для контура fcd

$$E_2 = I_2 R_{m2} + I_2 R_2 + I_2 R_3. \quad (2.45)$$

При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа контуры нужно выбирать так, чтобы каждый из них отличался хотя бы одной ветвью.

Пример 2.1. Рассчитать цепь рис. 2.13, если $E_1 = 246$ В; $E_2 = -230$ В; $R_1 = 0,3$ Ом; $R_2 = 1$ Ом; $R_3 = 24$ Ом; $R_{m1} = R_{m2} = 0$.

Решение. Объединим уравнения (2.42), (2.43) и (2.45) в систему:

$$\left. \begin{aligned} I_1 + I_2 - I_3 &= 0; \\ E_1 - E_2 &= I_1 R_1 - I_2 R_2; \\ E_2 &= I_3 R_3 + I_3 R_4. \end{aligned} \right\}$$

Заменяя буквенные обозначения числовыми, получим

$$\left. \begin{aligned} I_1 + I_2 - I_3 &= 0; \\ 16 &= 0,3 I_1 - I_2; \\ 230 &= I_3 + 24 I_3. \end{aligned} \right\} \quad (2.46)$$

Решив систему (2.46), найдем $I_1 = 20$ А; $I_2 = -10$ А; $I_3 = 10$ А. Знак минус у тока I_2 означает, что его направление противоположно направлению, принятому на рис. 2.13, и источник E_2 является потребителем энергии.

Метод контурных токов. Если сложная цепь содержит довольно много узлов и контуров, то ее расчет с помощью первого и второго законов Кирхгофа будет связан с решением большого числа уравнений. Вводя понятие о контурных токах, можно свести уравнения, составленные по законам Кирхгофа, к системе уравнений, составленных только для независимых контуров.

Под контурными токами понимают условные токи, замыкающиеся в соответствующих контурах.

Рассмотрим схему цепи, представленную на рис. 2.14. Эта схема имеет два независимых контура I и II, в каждом из которых проходят токи I_I и I_{II} . Направления этих токов выбирается произвольными, например по часовой стрелке. Из рассмотрения схемы (рис. 2.14) видно, что реальные токи во внешних ветвях равны контурным: $I_1 = I_I$; $I_3 = I_{II}$. Ток во внутренней ветви равен разности контурных токов: $I_2 = I_I - I_{II}$. Для определения контурных токов составим два уравнения:

$$\begin{aligned} E_1 - E_2 &= (R_{\Sigma I} + R_1 + R_2 + R_{\Sigma II}) I_I - (R_2 + R_{\Sigma II}) I_{II}; \\ E_2 &= (R_{\Sigma II} + R_2 + R_3) I_{II} - (R_2 + R_{\Sigma II}) I_I. \end{aligned} \quad (2.47)$$

Пример 2.2. Рассчитать цепь рис. 2.14. Данные взять из примера 2.1.

Решение. На основании системы уравнений (2.47) получим

$$\begin{aligned} 16 &= 1,3 I_I - I_{II}; \\ 230 &= 25 I_{II} - I_I. \end{aligned} \quad (2.48)$$

Решив систему (2.48), найдем $I_I = I_1 = 20$ А; $I_{II} = I_3 = 10$ А; ток I_2 определяют как $I_2 = I_I - I_{II} = 20 - 10 = 10$ А.

Метод узлового напряжения. Часто в сложной цепи имеется всего два узла, как, например, в схеме рис. 2.14. В этом случае расчет цепи значительно упрощается, так как достаточно определить так называемое

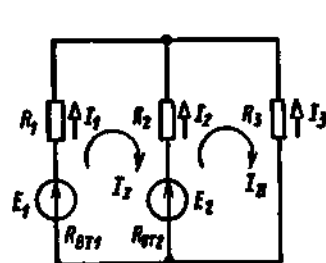


Рис. 2.14. Метод контурных токов

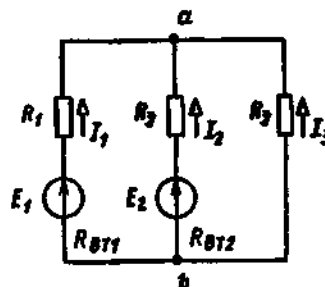


Рис. 2.15. Метод узлового напряжения

узловое напряжение U_{ab} (рис. 2.15). После этого токи в ветвях находят следующим образом. Все токи в ветвях направляют к узлу, потенциал которого условно принимают более высоким (для схемы рис. 2.15 это безусловно так). Узловое напряжение

$$U_{ab} = \frac{E_1 G_1 + E_2 G_2}{G_1 + G_2 + G_3}, \quad (2.49)$$

где G_1 , G_2 , G_3 — проводимости соответствующих ветвей. Если ЭДС какого-нибудь источника, например E_2 , направлена к узлу b , то произведение $E_2 G_2$ берется со знаком минус. Токи в ветвях определяются так:

$$\begin{aligned} I_1 &= (E_1 - U_{ab}) G_1; \\ I_2 &= (E_2 - U_{ab}) G_2; \\ I_3 &= -U_{ab} G_3. \end{aligned}$$

Пример 2.3. Рассчитать схему рис. 2.15. Данные взять из примера 2.1.

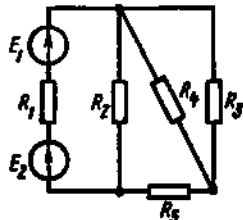
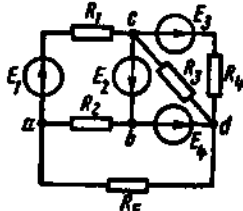
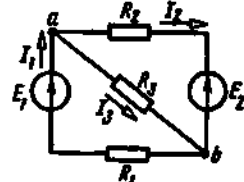
Решение. Узловое напряжение U_{ab} на основании (2.49)

$$U_{ab} = \frac{246 \cdot 10/3 + 230 \cdot 1/1}{10/3 + 1/1 + 1/24} = 240 \text{ В.}$$

Тогда $I_1 = (246 - 240) \cdot 10/3 = 20$ А;

$$I_2 = (230 - 240) \cdot 1/1 = -10 \text{ А}; \quad I_3 = -240 \cdot 1/24 = -10 \text{ А.}$$

Карточка № 2.11а (342)
Расчет сложных электрических цепей

Является ли схема данной цепи сложной?	Является	91
	Не является	72
Можно ли применить уравнения Кирхгофа для расчета цепей смешанного соединения?	Можно	169
	Нельзя	107
Сколько узловых и контурных уравнений необходимо составить для определения неизвестных токов в этой схеме?	4 узловых, 4 контурных	22
	3 узловых, 4 контурных	97
	4 узловых, 3 контурных	12
Какая из приведенных систем уравнений дает возможность найти неизвестные токи?	$I_1 - I_2 - I_3 = 0;$ $E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3;$ $E_2 = -I_2 R_2 + I_3 R_3$	34
	$I_1 = I_2 + I_3;$ $E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3;$ $I_2 + I_3 - I_1 = 0$	54
	$E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3;$ $E_2 = -I_2 R_2 + I_3 R_3;$ $E_1 - E_2 = I_1 R_1 + I_2 R_2$	10

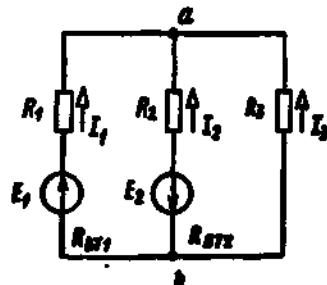
Продолжение

Можно ли рассматривать уравнение закона Ома для всей цепи $[I = E / (R + R_{\text{вн}})]$ как частный случай уравнения, составленного на основании второго закона Кирхгофа?	Можно	170
	Нельзя	124

Карточка № 2.11б (432)
Расчет сложных электрических цепей

Являются ли контурные токи реальными токами ветвей?	Да	188
	Нет	192
	Это зависит от расположения ветви (внешнее или внутреннее)	189
На сколько сокращается число уравнений при использовании метода контурных токов?	На число узлов в схеме	194
	На число независимых контуров в схеме	186
	На число узлов в схеме без одного	197
	На число независимых контуров в схеме без одного	176
Как выбирается направление контурных токов?	По часовой стрелке	180
	Против часовой стрелки	172
	Произвольно	179
Когда можно воспользоваться методом узлового напряжения?	Когда сложная цепь содержит всего два источника	182

Выберите правильную формулу для определения I_2 в этой цепи	Когда сложная цепь содержит всего два узла	177
	Для расчета любой сложной цепи	181
	$I_2 = (E_2 - U_{ab}) G_2$	185
	$I_2 = (-E_2 - U_{ab}) G_2$	190
	$I_2 = (-E_2 + U_{ab}) G_2$	185



§ 2.14. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

До сих пор рассматривались линейные цепи. В отличие от линейной цепи, у которой сопротивления нагрузки не зависят ни от тока, ни от напряжения, т. е. являются постоянными, *нелинейная цепь содержит один или несколько нелинейных элементов*.

Нелинейным называется элемент, который не обладает постоянным сопротивлением. Примерами нелинейных элементов являются лампы накаливания, электронные, полупроводниковые и ионные приборы.

В нелинейной цепи между током и напряжением нет линейной пропорциональной зависимости, следовательно, закон Ома неприменим для расчета таких цепей.

Расчет нелинейных цепей, как правило, производят графическими методами. Для этой цепи задаются вольт-амперные характеристики нелинейных элементов, которые представляют собой зависимость тока в элементе от напряжения на его зажимах: $I = f(U)$.

На рис. 2.16 представлены вольт-амперные характеристики нелинейных элементов — лампы накаливания с металлической нитью (кривая 1) и лампы накали-

вания с угольной нитью (кривая 3). Для сравнения показана вольт-амперная характеристика линейного элемента (прямая 2). Рассмотрим методы расчета нелинейных цепей.

Последовательное соединение. Задача состоит в том, чтобы по заданному напряжению U_0 и вольт-амперным характеристикам нелинейных элементов $ИЭ_1$, $ИЭ_2$ найти ток I_0 и напряжения U_1 , U_2 на элементах неразветвленной цепи (рис. 2.17).

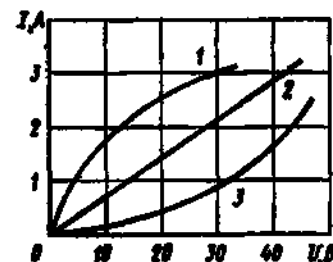


Рис. 2.16. Вольт-амперные характеристики линейного и нелинейных элементов

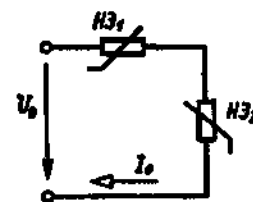


Рис. 2.17. Последовательное соединение нелинейных элементов

Так как элементы $ИЭ_1$ и $ИЭ_2$ соединены последовательно, то через них будет проходить одинаковый ток. Воспользуемся этим для построения общей характеристики цепи (рис. 2.18) (здесь $I = f_1(U)$ и $I = f_2(U)$ — вольт-амперные характеристики первого и второго нелинейных элементов).

Зададимся произвольными токами I' и I'' и произведем для них сложение характеристик по напряжению, т. е. используем свойство последовательного соединения сопротивлений: общее напряжение равно сумме напряжений на участках. Так, например, точку A' общей характеристики получаем в результате сложения абсцисс $A'_1A'_1$ и $A'_2A'_2$. Точно так же получаем точку A'' и т. д. Соединив точки A' , A'' и т. д. плавной кривой, получаем общую вольт-амперную характеристику $I = f(U)$ цепи. Теперь отложим на оси абсцисс отрезок, соответствующий в масштабе значению U_0 . Перпендикуляр, восставленный из точки, соответствующей U_0 , до пересечения с общей характеристикой, определяет силу тока I_0 цепи. Отрезки прямых A_0A_1 и A_0A_2 , проведенных через точку A парал-

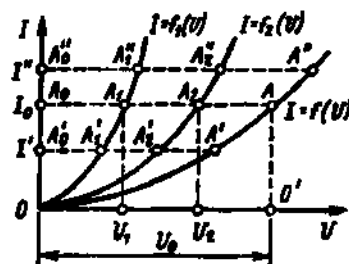


Рис. 2.18. Графический расчет неразветвленной цепи

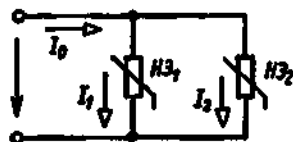


Рис. 2.20. Графический расчет разветвленной цепи

лельно оси абсцисс, определяют напряжения U_1 , U_2 на нелинейных элементах $HЭ_1$ и $HЭ_2$.

Параллельное соединение. По заданному напряжению U_0 и вольт-амперным характеристикам нелинейных элементов $HЭ_1$, $HЭ_2$ найдем общий ток I_0 и токи I_1 и I_2 в ветвях цепи (рис. 2.19).

Так как элементы $HЭ_1$ и $HЭ_2$ соединены параллельно, на них будет одинаковое напряжение. Воспользуемся этим для построения общей характеристики цепи (рис. 2.20). Зададимся произвольными напряжениями U' и U'' и, используя первый закон Кирхгофа, сложим характеристики по току. Операция сложения аналогична описанной, однако теперь складываются ординаты выбранных точек. Получив общую характеристику $I=f(U)$, находим токи I_0 , I_1 , I_2 . Для этого по оси абсцисс откладываем заданное напряжение U_0 .

Перпендикуляр OA , восстановленный из точки O до пересечения с общей характеристикой, определяет в масштабе силу тока I_0 цепи, а его отрезки OA_1 и OA_2 — соответственно токи I_1 и I_2 .

Рассмотренные методы расчета широко используются при анализе цепей, содержащих электронные и полупроводниковые приборы.

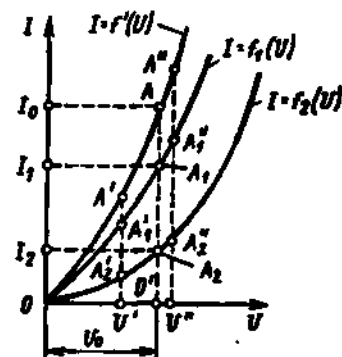


Рис. 2.19. Параллельное соединение нелинейных элементов

Карточка № 2.12 (397)
Нелинейные электрические цепи

Было установлено, что закон Ома неприменим к нелинейным цепям. Применимы ли к нелинейным цепям законы Кирхгофа?	Нет	193
	Да	175
Какую из приведенных здесь формул можно использовать для определения мощности нелинейного элемента?	$P = PR$	184
	$P = UI$	174
	$P = U^2/R$	199
	Все три	191
Можно ли применить графический метод расчета к линейным цепям?	Можно	183
	Нельзя	198
Можно ли так подобрать два нелинейных элемента, чтобы их общая вольт-амперная характеристика стала линейной?	Нельзя	173
	Можно	187
При изменении тока, проходящего через проволочное сопротивление, меняется температура этого сопротивления. Применим ли закон Ома к такому сопротивлению?	Да	200
	Нет	196
	Это зависит от значения температурного коэффициента сопротивления α	178

ГЛАВА 3

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

§ 3.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Магнитное поле — одна из двух сторон электромагнитного поля, характеризующаяся воздействием на электрически заряженную частицу с силой, пропорциональной заряду частицы и ее скорости.

Магнитное поле изображается силовыми линиями, касательные к которым совпадают с ориентацией магнитных стрелок, внесенных в поле (рис. 3.1). Таким образом, магнитные стрелки как бы являются пробными элементами для магнитного поля.

За положительное направление магнитного поля условно принимают направление северного полюса магнитной стрелки.

Можно утверждать, что магнитное поле и электрический ток — взаимосвязанные явления.

Вокруг проводника, в котором существует ток, всегда имеется магнитное поле, и, наоборот, в замкнутом проводнике, движущемся в магнитном поле, возникает ток.

Рассмотрим количественные характеристики магнитного поля.

Магнитная индукция B — векторная величина, характеризующая магнитное поле и определяющая силу, действующую на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля. Эта характеристика является основной характеристикой магнитного поля, так как определяет электромагнитную силу, а также ЭДС индукции в проводнике, перемещающемся в магнитном поле.

Единицей магнитной индукции является вебер, деленный на квадратный метр, или тесла (Тл):

$$[B] = 1 \text{ Вб} / 1 \text{ м}^2 = 1 \text{ Тл}.$$

Абсолютная магнитная проницаемость среды μ_0 — величина, являющаяся коэффициентом, отражающим магнитные свойства среды:

$$\mu_0 = \mu_0 \mu_r. \quad (3.1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (Ом} \cdot \text{с) / м}$ — магнитная постоянная, характеризующая магнитные свойства вакуума.

Единицу ом-секунда (Ом·с) называют генри (Гн). Таким образом, $[\mu_0] = \text{Гн} / \text{м}$.

Величину μ_r называют относительной магнитной проницаемостью среды. Она показывает, во сколько раз индукция поля, созданного током в данной среде, больше или меньше, чем в вакууме, и является безразмерной величиной.

Для большинства материалов проницаемость μ_r постоянна и близка к единице. Для ферромагнитных материалов μ_r является функцией тока, создающего магнитное поле, и достигает больших значений (10^2 — 10^5).

Напряженность магнитного поля H — векторная величина, которая не зависит от свойств среды и определяется только токами в проводниках, создающими магнитное поле.

Направление вектора H (рис. 3.1) для изотропных сред совпадает с вектором B и определяется касатель-

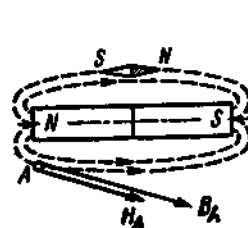


Рис. 3.1. Магнитное поле плоского магнита

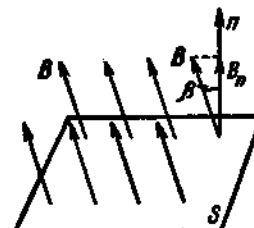


Рис. 3.2. Однородное магнитное поле

ной, проведенной в данной точке поля (точка A) к силовой линии. Напряженность связана с магнитной индукцией соотношением

$$B = \mu_0 H. \quad (3.2)$$

Единица напряженности магнитного поля — ампер на метр:

$$[H] = 1 \text{ А} / 1 \text{ м}.$$

Приведенные характеристики магнитного поля являются основными. Теперь рассмотрим производные характеристики.

Магнитный поток Φ — поток магнитной индукции. На рис. 3.2 показано однородное магнитное поле, пересекающее площадку S . Магнитный поток Φ через площадку S в однородном магнитном поле равен произведению нормальной составляющей вектора индукции B_n на площадь S площадки:

$$\Phi = B_n S = BS \cos \beta. \quad (3.3)$$

Магнитное напряжение U_H на участке AB (рис. 3.3, а) в однородном магнитном поле определяется как произведение проекции H_l вектора H на отрезок AB и длину этого отрезка l :

$$U_H = H_l l. \quad (3.4)$$

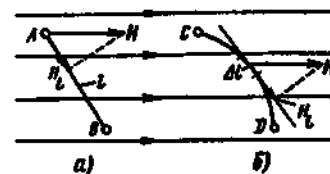


Рис. 3.3. К определению магнитного напряжения

Единица магнитного напряжения — ампер (А).
В том случае, когда поле неоднородное или участок, вдоль которого определяется U_m , не прямолинейный (рис. 3.3, б), необходимо разбить этот участок на элементарные отрезки Δl . Тогда в пределах малого участка Δl поле можно считать однородным или сам участок прямолинейным и найти ΔU_m на участке Δl :

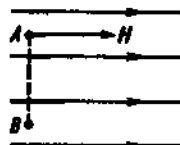
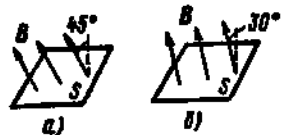
$$\Delta U_m = H_l \Delta l.$$

Полное магнитное напряжение на участке CD

$$U_{m, CD} = \sum H_l \Delta l. \quad (3.5)$$

Карточка № 3.1 (179)
Характеристики магнитного поля

Какое поле возникает вокруг движущихся электрических зарядов?	Магнитное	156
	Электрическое	36
	Электромагнитное	80
Какой величиной является магнитный поток Φ ?	Векторной	132
	Скалярной	245
Каково соотношение между магнитными потоками в этих случаях, если $B_a = B_b$?	$\Phi_a = \Phi_b$	154
	$\Phi_a > \Phi_b$	234
	$\Phi_a < \Phi_b$	215
Имеется однородное магнитное поле напряженностью $H = 5 \text{ А/см}$. Определить магнитное напряжение на пути AB , если $l_{AB} = 10 \text{ см}$	50 А	15
	0	6



Продолжение

В однородном магнитном поле определяется магнитное напряжение на участках AB и ABC . Каково соотношение между этими напряжениями?



$U_{m, AB} > U_{m, ABC}$	248
$U_{m, AB} = U_{m, ABC}$	233
$U_{m, AB} < U_{m, ABC}$	192

§ 3.2. ЗАКОН ПОЛНОГО ТОКА

Закон полного тока в ряде случаев позволяет установить зависимость между напряженностью магнитного поля и создающими его токами.

Рассмотрим произвольный контур длиной l (рис. 3.4), ограничивающий поверхность S . Через эту поверхность проходят токи I_1 и I_2 , создающие магнитное поле.

Алгебраическую сумму токов, пронизывающих поверхность, ограниченную замкнутым контуром, называют полным током и обозначают $\sum I$.

Выберем положительное направление обхода контура, как показано на рис. 3.4. Тогда в соответствии с правилом буравчика тока I_1 положителен, а ток I_2 отрицателен. Для нашего случая полный ток $\sum I = I_1 - I_2$.

Так как магнитное поле неоднородно, магнитное напряжение определяется по формуле (3.5).

Следует помнить, что произведение $H_l \Delta l$ берут со знаком плюс, если направление проекции H_l совпадает с выбранным направлением обхода.

Магнитное напряжение, вычисленное вдоль замкнутого контура, называют магнитодвижущей силой (МДС) или намагничивающей силой (НС) F .

Опытным путем установлено, что

$$F = \sum I = \sum H_l \Delta l. \quad (3.6)$$

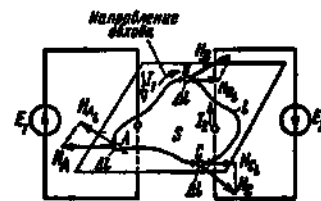
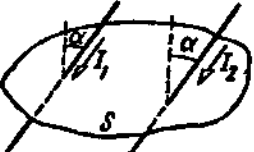
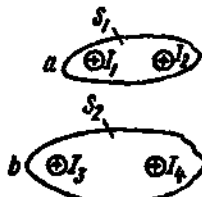


Рис. 3.4. К определению закона полного тока

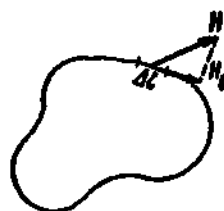
Намагничивающая сила вдоль контура равна полному току, проходящему сквозь поверхность, ограниченную этим контуром. В этом заключается смысл закона полного тока.

Карточка № 3.2 (265)
Закон полного тока

Заданы токи: $I_1=2$ А; $I_2=3$ А; $I_3=5$ А. Определить полный ток, пронизывающий поверхность S	$\sum I=10$ А	12
	$\sum I=0$	198
		
Заданы токи: $I_1=2$ А; $I_2=3$ А; $\alpha=60^\circ$. Найти полный ток, пронизывающий поверхность S	$\sum I=5$ А	193
	$\sum I=2,5$ А	201
Поверхности S_1 и S_2 пронизываются токами I_1-I_4 , причем $S_1 < S_2$, $I_1=3$ А; $I_2=4$ А; $I_3=4$ А; $I_4=3$ А.	$F_a < F_b$	41
Каково соотношение между НС для контуров a и b ?	$F_a = F_b$	17
	$F_a > F_b$	162

Продолжение

Влияет ли направление обхода контура на конечный результат при использовании закона полного тока?	Не влияет	121
	Влияет	30
Известно, что НС $F=\sum H_i \Delta l$. Какое значение Δl нужно выбрать, чтобы точность определения F была выше в случае неоднородного поля или произвольного контура?	Значение Δl должно быть большим	170
	Значение Δl не влияет на результат	186
	Значение Δl должно быть как можно меньше	237



§ 3.3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ТОКА

Магнитное поле прямолинейного проводника с током имеет вид концентрических окружностей (рис. 3.5, а). Направление поля определяют по правилу буравчика. Вследствие симметрии напряженность поля во всех точках, равноудаленных от оси проводника, одинакова. В качестве контура выберем окружность радиусом r , совпадающую с силовой линией поля. Так как контур совпадает с магнитной линией, длина вектора напряженности и его проекция на касательную в любой точке равны между собой: $H_t = H_r$.

НС находим по формуле (3.5): $F = \sum H_i \Delta l = \sum H_r \Delta l$. Так как H_r во всех точках контура радиуса r одинакова, то

$$F = H_r \sum \Delta l = 2\pi r H_r.$$

Полный ток $\sum I = I$. Следовательно,

$$I = H_r 2\pi r, \quad (3.7)$$

откуда $H_r = I / (2\pi r)$.

Эта формула справедлива для проводника бесконечной длины, но прак-

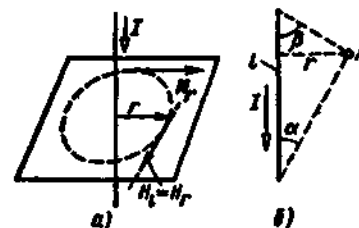


Рис. 3.5. Магнитное поле прямолинейного тока (а), определение H при r , соизмеримом с l (б)

тически ею пользуются и тогда, когда длина проводника значительно больше расстояния r .

Рассмотрим случай, когда $l \neq \infty$ и точка A , в которой необходимо определить напряженность поля, находится на расстоянии r , соизмеримом с l (рис. 3.5, б). Методика расчета сводится к следующему. Соединяя точку A с концами проводника длиной l , получаем треугольник с углами α и β . Формула, с помощью которой вычисляют H_A , дается без вывода и вытекает из закона Био — Савара, не рассматриваемого в данном пособии:

$$H_A = \frac{l}{4\pi r} (\cos \alpha + \cos \beta). \quad (3.7a)$$

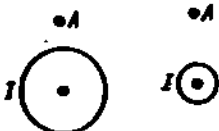
Если приближать точку A к проводнику или удлинить проводник, то выражение в скобке будет стремиться к двум и формула (3.7a) может быть заменена формулой (3.7).

Пример 3.1. На расстоянии $a=8$ см от оси длинного прямолинейного проводника с током напряженность поля $H=8,5$ А/см. Определить ток в проводнике.

Решение. Так как напряженность поля в этом случае рассчитывают по формуле (3.7), ток в проводнике $I=H \cdot 2\pi a=8,5 \times 2\pi \cdot 8=427$ А.

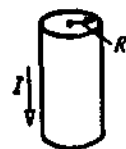
Карточка № 3.3 (236)
Магнитное поле прямолинейного тока

При известном токе I рассчитаны НС F_1 и F_2 вдоль concentрических окружностей радиусов r_1 и r_2 . Определить соотношение между НС F_1 и F_2	$F_1 > F_2$	134
	$F_1 < F_2$	150
	$F_1 = F_2$	7
Зависит ли напряженность поля в точке A , равноудаленной от оси проводника, от диаметра проводника при $I = \text{const}$?	Зависит	244
	Не зависит	39



Продолжение

Для какой точки будет больше ошибка в определении H при использовании приближенной формулы?	Для точки A	206
	Для точки B	178
	Для обеих точек ошибка одинакова	247
Можно ли пользоваться приближенной формулой для расчета напряженности поля H в точках A , B и т. д., расположенных на краю проводника?	Можно	147
	Нельзя	169
	Это зависит от расстояния точек до провода	250
Ток I проходит по тонкостенной длинной медной трубе радиусом R . Какой из приведенных графиков соответствует зависимости напряженности H , от расстояния до оси проводника r ?		188
		243
		225



§ 3.4. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КОЛЬЦЕВОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАТУШЕК

Магнитное поле кольцевой катушки имеет вид концентрических окружностей и сосредоточено внутри катушки (рис. 3.6). Направление поля определяется по правилу правой руки: если правую руку расположить вдоль катушки так, чтобы четыре пальца совпадали с направлением тока в витках катушки, то отогнутый большой палец покажет направление поля.

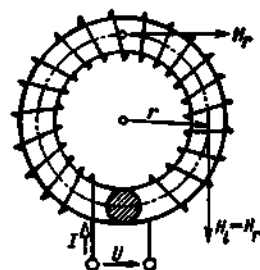


Рис. 3.6. Магнитное поле кольцевой катушки

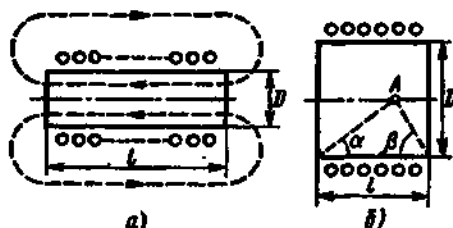


Рис. 3.7. Магнитное поле длинной (а) и короткой (б) цилиндрических катушек

При симметричной намотке катушки напряженность H во всех точках, равноудаленных от центра, будет одинакова. Рассмотрим контур, совпадающий с магнитной линией радиусом r . Поверхность, ограниченную этим контуром, пересекает полный ток $\sum I = I\omega$, где ω — число витков катушки.

НС вдоль этого контура $F = H_r \cdot 2\pi r = H_r l$, где $l = 2\pi r$ — длина контура.

Применив закон полного тока, получим

$$H_r = I\omega / r. \quad (3.8)$$

Эта формула справедлива для определения напряженности поля в точках средней части цилиндрической катушки (рис. 3.7, а) при условии, что $l \gg D$. Необходимо обратить внимание на то, что конфигурация поля такой катушки аналогична конфигурации поля плоского магнита.

Для случая, когда длина l соизмерима с D (рис. 3.7, б), напряженность поля в точках, расположенных на оси катушки, рассчитывают по следующей

методике. Соединив точку A с краями катушки, получим треугольник с углами α и β . Тогда формулу для расчета H можно записать в виде

$$H_A = \frac{I\omega}{2l} (\cos \alpha + \cos \beta). \quad (3.8a)$$

При изменении соотношения между l и D в сторону увеличения выражение в скобках приближается к двум и формула (3.8a) может быть заменена формулой (3.8). Практически принято, что для нахождения напряженности поля в точках средней части катушки при $l \geq 5D$ можно пользоваться формулой (3.8).

Пример 3.2. По цилиндрической катушке длиной $l = 90$ мм и диаметром $D = 200$ мм с числом витков $\omega = 450$ проходит ток $I = 0,3$ А. Вычислить напряженность поля на оси катушки в точке, равноудаленной от краев катушки.

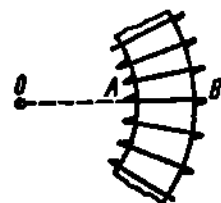
Решение. Так как длина катушки почти в пять раз больше ее диаметра, применяем формулу (3.8):

$$H \approx I\omega / l = 0,3 \cdot 450 / 9 = 15 \text{ А/см.}$$

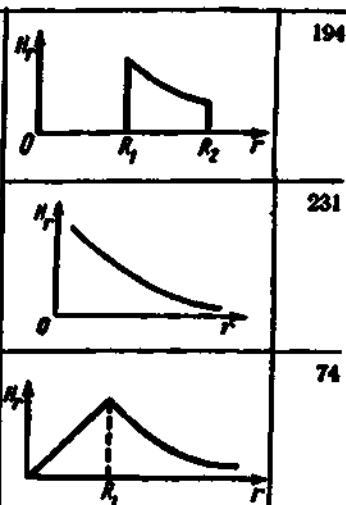
Карточка № 3.4 (247)

Магнитное поле кольцевой и цилиндрической катушек

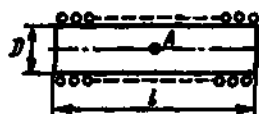
Каково соотношение между напряженностями поля в точках A и B кольцевой катушки?	$H_A = H_B$	230
	$H_A > H_B$	116
	$H_A < H_B$	209
У кольцевой катушки изменили диаметр каркаса, не изменяя НС и средний радиус кольца. Как это повлияет на магнитное состояние катушки?	Изменится значение H для средней линии	100
	Изменится значение B для средней линии	172
	Изменится Φ	86



Какой из приведенных графиков правильно отражает зависимость напряженности H , от расстояния до центра катушки r ?

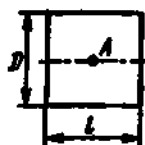


У цилиндрической катушки $l=100$ мм, $D=20$ мм. Можно ли использовать приближенную формулу для определения напряженности H в точке A ?



Можно	144
Нельзя	164

У цилиндрической катушки $l=D$. Какой формулой следует воспользоваться для расчета напряженности H в точке A ?



Приближенной	190
Точной	107

§ 3.5. НАМАГНИЧИВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Материалы, обладающие большой магнитной проницаемостью, называют ферромагнитными. К ним относятся железо, никель, кобальт и их сплавы. Оказавшись во внешнем магнитном поле, эти материалы значительно усиливают его. Это явление упрощенно можно объяснить таким образом.

Ферромагнитные материалы имеют области самопроизвольного намагничивания. Магнитное состояние каждой из таких областей характеризуется вектором намагниченности. Векторы намагниченности отдельных областей (доменов) ориентированы случайным образом. Поэтому намагниченность ферромагнитных тел в отсутствие внешнего магнитного поля не проявляется.

Если ферромагнитное тело поместить во внешнее магнитное поле, то под его воздействием произойдут изменения, в результате которых векторы намагниченности отдельных областей самопроизвольного намагничивания будут ориентированы в направлении внешнего поля. Индукция результирующего магнитного поля будет определяться как индукцией внешнего поля, так и магнитной индукцией отдельных доменов, т. е. результирующее значение индукции будет намного превышать ее начальное значение. Таким образом, суммарное магнитное поле значительно превысит внешнее поле.

Магнитное состояние ферромагнитного поля и характеризуется кривой намагничивания. Рассмотрим процесс намагничивания ферромагнитного сердечника, помещенного в катушку с током (рис. 3.8).

Предположим сначала, что сердечник отсутствует. Тогда при увеличении тока в катушке магнитная индукция меняется по линейному закону, так как $B_0 = \mu_0 H$ (рис. 3.9).

Теперь будем полагать, что катушка имеет сердечник, который в исходном состоянии размагничен. По мере увеличения тока в катушке магнитная индукция в сердечнике быстро возрастает (участок 0—1 кривой намагничивания; рис. 3.9). Это объясняется ориентацией векторов намагниченности ферромагнитного сердечника. Затем интенсивность ориентации замедляется (участок 1—2 кривой намагничивания);

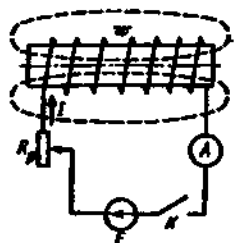


Рис. 3.8. К описанию процесса намагничивания ферромагнитного сердечника

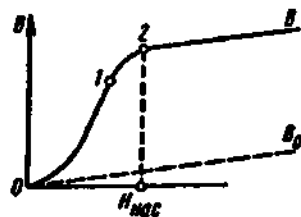
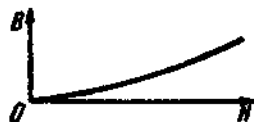
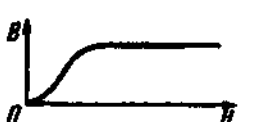
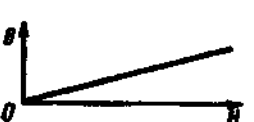
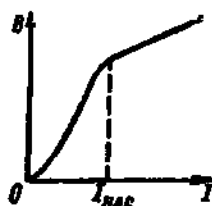


Рис. 3.9. Кривая намагничивания железа

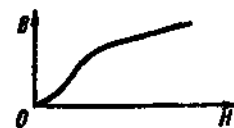
точка 2 соответствует магнитному насыщению, т. е. при некотором значении напряженности поля $H_{\text{нас}}$ все домены сорентированы и при дальнейшем увеличении тока в катушке индукция поля растет так же, как она росла бы при отсутствии сердечника.

Карточка № 3.5 (230)
Намагничивание ферромагнитных материалов

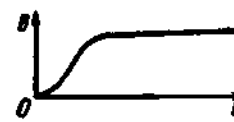
Какой из приведенных материалов не проявляет ферромагнитных свойств?	Кобальт	71
	Никель	191
	Платина	221
	Железо	45
Какой из приведенных графиков соответствует зависимости $B(H)$ для катушки с латунным сердечником?		159
		35
		4



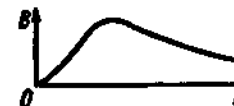
Какой из приведенных графиков соответствует процессу намагничивания катушки с ферромагнитным сердечником?



42



103



90

Отличается ли природа магнитного поля катушки с током от природы магнитного поля, возникающего в ферромагнитном сердечнике под действием поля катушки?

Отличается

114

Не отличается

168

Отличается ли характер изменения индукции B в катушке с ферромагнитным сердечником и без сердечника при $I > I_{\text{нас}}$?

Отличается

160

Не отличается

195



§ 3.6. ЦИКЛИЧЕСКОЕ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ

Если через катушку пропускать ток, меняющий свое направление, то сердечник будет перемагничиваться. Рассмотрим этот процесс (рис. 3.10). При увеличении тока в катушке магнитная индукция воз-

растает до индукции насыщения (точка a). При уменьшении тока магнитная индукция снижается но так, что при тех же значениях H она оказывается больше значений магнитной индукции, соответствующих увеличению тока. Это объясняется тем, что часть доменов еще сохраняет свою ориентацию. Таким об-

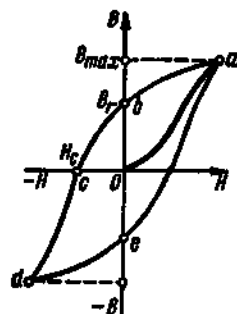


Рис. 3.10. К описанию процесса циклического перемагничивания

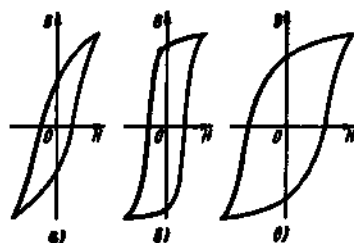


Рис. 3.11. Петли гистерезиса для различных материалов:
а — электротехническая сталь (магнитомягкий материал); б — пермаллой (магнитомягкий материал); в — магнитно (магнитотвердый материал)

разом, при $H=0$ в сердечнике сохраняется магнитное поле, характеризуемое остаточной индукцией B_r (точка b). При увеличении тока в противоположном направлении магнитное поле катушки компенсирует магнитное поле, созданное доменами сердечника. При напряженности поля H_c (точка c), которая называется коэрцитивной силой, результирующая магнитная индукция окажется равной нулю. Дальнейшее увеличение тока в катушке вызовет перемагничивание сердечника, т. е. поворот векторов намагниченности на 180° . При некотором значении H (точка d) сердечник снова будет насыщаться. При уменьшении тока в катушке до нуля индукция будет уменьшаться до остаточной индукции (точка e). Увеличение тока в положительном направлении вызовет намагничивание сердечника до исходного состояния (точка a). Полученную кривую называют петлей гистерезиса (запаздывания). Участок O_a характеристики намагничивания называют основной кривой намагничивания.

Процесс перемагничивания связан с затратами энергии и сопровождается выделением теплоты. Энер-

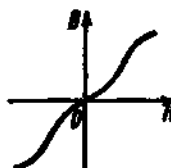
гия, которая затрачивается за один цикл перемагничивания, пропорциональна площади, ограниченной петлей гистерезиса.

В зависимости от вида петли гистерезиса ферромагнитные материалы подразделяют на магнитомягкие и магнитотвердые.

Магнитомягкие материалы обладают круто поднимавшейся основной кривой намагничивания и относительно малыми площадями гистерезисных петель. Для магнитотвердых материалов характерны пологость основной кривой намагничивания и большая площадь гистерезисной петли. На рис. 3.11, а—в приведены петли гистерезиса для различных материалов.

Карточка № 3.6 (202)
Циклическое перемагничивание

Может ли петля гистерезиса иметь вид, показанный на графике?	Может	145
	Не может	85
Из рассмотрения петли гистерезиса следует, что при $H=H_c$, $B=0$. Означает ли это, что	магнитные поля катушки и сердечника равны нулю?	36
	магнитные поля катушки и сердечника имеют равные значения, но направлены в разные стороны?	75
	магнитное поле сердечника отсутствует, магнитное поле катушки не равно нулю?	78

Затрачивается ли энергия для перематывания материала, представленного данной кривой?	Затрачивается	32
	Не затрачивается	208
	Для ответа недостаточно данных	214
	Кривая 1	229
	Кривая 2	218
	Обе кривые	196
	Остаточная индукция	166
Какая из приведенных кривых не соответствует физике процесса перематывания?	Потери на перематывание	19
	Двузначная зависимость $B(H)$	223
	Линейная зависимость $B(H)$	48
	Остаточная индукция	166

§ 3.7. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Совокупность устройств, содержащих ферромагнитные тела и образующих замкнутую цепь, в которой при наличии магнитодвижущей силы образуется магнитный поток и вдоль которой замыкаются линии магнитной индукции, называют магнитной цепью.

Примером таких цепей являются сердечники трансформаторов, магнитных усилителей, электрических машин и т. д. (рис. 3.12). Задача расчета магнитной цепи сводится к определению НС катушки или системы катушек, необходимой для создания заданного магнитного потока. Часто встречается и обратная задача,

когда по заданной намагничивающей силе необходимо определить магнитные потоки. Расчет магнитной цепи производят с помощью законов для магнитных цепей. Рассмотрим эти законы.

Первый закон Кирхгофа. За счет тока, протекающего через катушку, показанную на рис. 3.12, возникает магнитное поле и в левом стержне создается магнитный поток Φ . Этот поток в точке А сердечника разветвляется на потоки Φ_1 и Φ_2 . Так как силовые линии магнитного поля непрерывны и замкнуты, должно выполняться соотношение

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \text{ или } \Phi - \Phi_1 - \Phi_2 = 0. \quad (3.9)$$

Следовательно, алгебраическая сумма магнитных потоков для любого узла магнитной цепи равна нулю. Это уравнение выражает первый закон Кирхгофа для магнитной цепи.

Второй закон Кирхгофа. Применим закон полного тока к контуру ABCD (рис. 3.12). Полный ток, проходящий через поверхность, ограниченную этим контуром, $\sum I = Iw$. НС вдоль этого контура $F = H(l_1 + 2l_2) + H_1 l_1$, где H — напряженность магнитного поля на участке BCDA, в пределах которого оно однородно, так как магнитный поток Φ и площадь поперечного сечения сердечника S на этом участке неизменны; H_1 — напряженность магнитного поля на участке AB.

На основании закона полного тока

$$Iw = H(l_1 + 2l_2) + H_1 l_1,$$

т. е. для данного контура НС катушки равна сумме магнитных напряжений на отдельных участках. Если имеется не одна, а несколько катушек и во всех стержнях напряженность поля различна, то уравнение приобретает вид

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 + \dots + I_n w_n = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_m l_m. \quad (3.10)$$

Таким образом, алгебраическая сумма НС для любого замкнутого контура магнитной цепи равна алгебраической сумме магнитных напряжений на отдельных его участках.

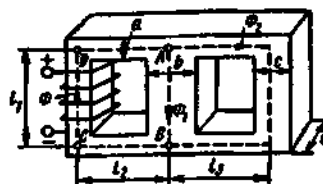


Рис. 3.12. Схема магнитной цепи

Это определение является вторым законом Кирхгофа для магнитной цепи. Знак НС катушки определяют по правилу буравчика, а знак магнитного напряжения — по направлению напряженности поля; если направление напряженности совпадает с выбранным направлением обхода контура, то магнитное напряжение берут со знаком плюс, и наоборот.

Закон Ома. Магнитное напряжение на данном участке цепи $U_m = Hl$. Если учесть, что $H = B/(\mu_r \mu_0)$, $B = \Phi/S$, то $U_m = \Phi l/(\mu_r \mu_0 S)$, $\Phi = \frac{U_m}{l/(\mu_r \mu_0 S)}$.

Введем обозначение $l/(\mu_r \mu_0 S) = R_m$, где R_m — магнитное сопротивление участка цепи. Тогда окончательное выражение закона Ома для участка магнитной цепи примет вид

$$\Phi = U_m / R_m.$$

Магнитный поток для участка цепи прямо пропорционален магнитному напряжению на этом участке.

Из выражения для R_m следует, что магнитное сопротивление ферромагнитных материалов мало. Необходимо отметить, что закон Ома справедлив только для линейных участков магнитной цепи.

Пример 3.8. Сколько витков нужно намотать на сердечник (рис. 3.13) для получения магнитного потока $\Phi = 47 \cdot 10^{-4}$ Вб при токе в обмотке $I = 25$ А? Верхняя часть сердечника выполнена из электротехнической стали Э330, нижняя — из литой стали.

Решение. Согласно рис. 3.13, $l_1 = 56$ см; $S_1 = 36$ см²; $l_2 = 17$ см; $S_2 = 36$ см²; $2l_0 = 1$ см; $S_0 = 36$ см².

Магнитная индукция для всех трех участков одинакова: $B = \Phi/S = 47 \cdot 10^{-4}/(36 \cdot 10^{-4}) = 1,3$ Тл. По кривой намагничивания для стали Э330 (рис. 3.14) индукции $B = 1,3$ Тл соответствует напряженность поля $H_1 = 750$ А/м. Магнитное напряжение на участке l_1

$$U_{m1} = H_1 l_1 = 750 \cdot 0,56 = 420 \text{ А}.$$

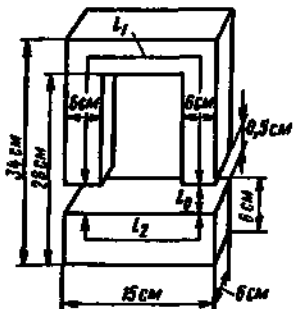


Рис. 3.13. К расчету магнитной цепи

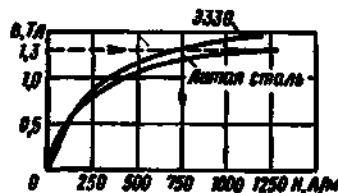


Рис. 3.14. Кривые намагничивания электротехнической стали Э330 и литой стали

Магнитное напряжение на участке l_2

$$U_{m2} = H_2 l_2 = 1250 \cdot 0,17 = 212,5 \text{ А}.$$

Напряженность поля в воздушном зазоре

$$H_0 = B/\mu_0 = 1,3/(4\pi \cdot 10^{-7}) = 1,04 \cdot 10^5 \text{ А/м}.$$

Магнитное напряжение в воздушном зазоре

$$U_{m0} = H_0 2l_0 = 1,04 \cdot 10^5 \cdot 0,01 = 1040 \text{ А}.$$

Намагничивающая сила

$$F_m = U_{m1} + U_{m2} + U_{m0} = 420 + 212,5 + 1040 \approx 11032 \text{ А}.$$

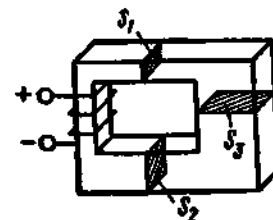
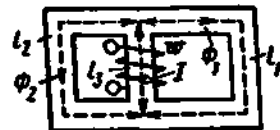
Число витков обмотки

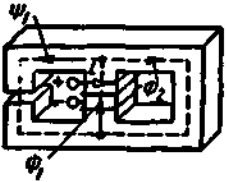
$$w = F_m / I = 11032/25 \approx 442.$$

Карточка № 3.7 (320)

Расчет магнитной цепи

Какое свойство магнитной цепи является главным?	Нелинейная зависимость B (H)	21
	Способность насыщаться	11
	Малое магнитное сопротивление	1
	Способность сохранять остаточную намагниченность	34
Какое уравнение соответствует внешнему контуру данной магнитной цепи?	$Iw = H_1 l_1 - H_2 l_2$	249
	$H_1 l_1 + H_2 l_2 = 0$	51
	$H_1 l_1 - H_2 l_2 = 0$	97
	$Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2$	64
Для приведения магнитной цепи $S_1 < S_2 < S_3$. Выберите правильное соотношение для Φ и H на соответствующих участках цепи	$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3$ $H_1 = H_2 = H_3$	57
	$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3$ $H_1 > H_2 > H_3$	63
	$\Phi_1 > \Phi_2 > \Phi_3$ $H_1 > H_2 > H_3$	67
	$\Phi_1 < \Phi_2 < \Phi_3$ $H_1 < H_2 < H_3$	10



Какое соотношение является ошибочным для данной магнитной цепи? 	$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$	61
	$\Phi_2 = \Phi_1$	73
	$\Phi_2 > \Phi_1$	199
Как изменится общий магнитный поток Φ, если увеличить воздушный зазор в сердечнике? (См. рисунок предыдущего вопроса.)	Не изменится	118
	Увеличится	25
	Уменьшится	95

§ 3.8. ЭЛЕКТРОН В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

На электрон, движущийся в магнитном поле (рис. 3.15), действует электромагнитная сила. Эта сила возникает в результате взаимодействия данного магнитного поля с магнитным полем, которое образуется в результате движения электрона. Она называется силой Лоренца и определяется соотношением

$$F_0 = q_0 B v \sin \alpha, \quad (3.11)$$

где q_0 — заряд электрона; B — магнитная индукция; v — скорость движения электронов; α — угол между направлениями магнитного поля и электронного тока.

Направление силы определяется по правилу левой руки: левую руку следует расположить так, чтобы магнитное поле входило в ладонь, вытянутые четыре пальца располагаются по направлению тока; тогда отогнутый под прямым углом большой палец покажет направление силы.

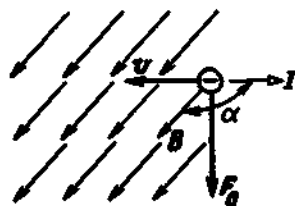


Рис. 3.15. Электрон в магнитном поле

Необходимо помнить, что ток, вызванный движением электрона, направлен в сторону, противоположную этому движению.

Пример 3.4. В однородном магнитном поле, индукция которого $B=2$ Тл, перпендикулярно направлению поля движется электрон ($q_0=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл) со скоростью $v=10$ м/с. Определить силу, действующую на электрон.

Решение. Поскольку, по условию задачи, $\alpha=\pi/2$, формула (3.11) принимает вид $F_0=q_0 B v=1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10=32 \cdot 10^{-19}$ Н.

Карточка № 3.8 (192)
Электрон в магнитном поле

На рисунке показано сечение электронно-лучевой трубки с магнитным управлением. Электроны в луче движутся к нам. Определить направление отклонения электронного луча



44



91



110



84

Электрон влетает в однородное магнитное поле индукцией B со скоростью v_0 . По какой траектории будет двигаться электрон под действием возникшей силы Лоренца F_0 ?



По линии действия силы Лоренца

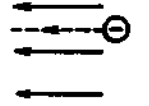
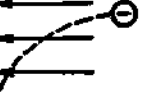


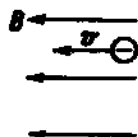
66

По окружности



23

	По параболе	137
		
Может ли электрон, движущийся в магнитном поле, получить ускорение в направлении движения за счет силы Лоренца?	Может	2
	Не может	142
	Это зависит от начального положения вектора скорости относительно поля	8
Что изменится, если в магнитном поле вместо электрона движется протон под прямым углом к полю и с той же скоростью, что и электрон?	Направление силы Лоренца	200
	Значение силы Лоренца	87
	И направление, и значение силы Лоренца	70
	Ничего не изменится	101
По какой траектории будет двигаться электрон, если его скорость имеет направление, показанное на рисунке?	По окружности	3
		
	По прямой линии	143
		
	По параболе	59
		



§ 3.9. ПРОВОДНИК С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОВОДНИКОВ С ТОКОМ

На проводник с током, находящийся в магнитном поле (рис. 3.16), действует сила. Так как ток в металлическом проводнике обусловлен движением электронов, то силу, действующую на проводник, можно рассматривать как сумму сил, действующих на все электроны проводника длиной l . В результате получаем соотношение $F = F_0 n l S$, где F_0 — сила Лоренца, действующая на электрон; n — концентрации электронов (число электронов в единице объема); l , S — длина и площадь поперечного сечения проводника.

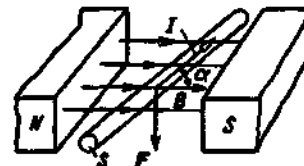


Рис. 3.16. Проводник с током в магнитном поле

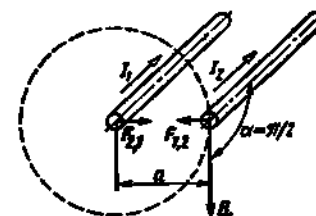


Рис. 3.17. Электромагнитные силы взаимодействия параллельных проводников с током

С учетом формулы (3.11) можно записать $F = q_0 n v S B l \sin \alpha$.

Легко понять, что произведение $q_0 n v$ является плотностью тока J ; следовательно, $F = J S B l \sin \alpha$.

Произведение $J S$ есть ток I , т. е.

$$F = I B l \sin \alpha. \quad (3.12)$$

Полученная зависимость отражает закон Ампера. Направление силы определяется по правилу левой руки. Рассмотренное явление положено в основу работы электрических двигателей.

На практике часто приходится встречаться с взаимодействием параллельных проводников, по которым проходят токи.

Рассмотрим это явление. Проводник с током I_2 находится в магнитном поле тока I_1 (рис. 3.17). При-

меним формулы (3.12) для определения электромагнитной силы, действующей на проводник с током I_2 : $F_{1,2} = I_2 B_1 l$. В данном случае $\alpha = \pi/2$. Магнитная индукция, как известно, $B_1 = \mu_0 H_1$.

Напряженность магнитного поля прямолинейного проводника с током, по формуле (3.7), $H_1 = I_1 / (2\pi a)$. Тогда выражение для $F_{1,2}$ примет вид $F_{1,2} = \mu_0 I_1 I_2 l / (2\pi a)$.

Согласно третьему закону Ньютона, проводник с током I_2 действует на проводник с током I_1 с такой же силой, как проводник с током I_1 на проводник с током I_2 , т. е.

$$F_{2,1} = F_{1,2} = F = \mu_0 I_1 I_2 l / (2\pi a). \quad (3.13)$$

Направление действия сил $F_{1,2}$ и $F_{2,1}$ определяется по правилу левой руки. Как видно из рис. 3.17, если токи проходят в одном направлении, то проводники притягиваются, если в разном — отталкиваются.

Пример 3.5. Двухжильный кабель с изоляцией имеет свинцовую оболочку, предохраняющую кабель от попадания влаги (рис. 3.18). Расстояние между центрами сечений жил $a = 20$ мм.

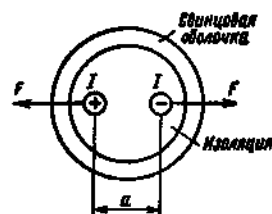


Рис. 3.18. К определению силы взаимодействия между жилами кабеля

Определить силу взаимодействия между токами на каждый метр длины кабеля и влияние этой силы на свинцовую оболочку. Ток в жилах кабеля $I = 500$ А.

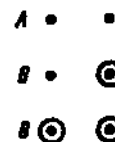
Решение. Рассчитаем силу взаимодействия между токами на 1 м длины. Так как $I_1 = I_2 = I$, $l = 1$ м, то формула (3.13) примет вид

$$F = \mu_0 I^2 / (2\pi a) = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 500^2 / (2\pi \cdot 20 \cdot 10^{-3}) = 2,5 \text{ Н.}$$

Так как токи в жилах проходят в противоположных направлениях, жилы отталкиваются. Силы, действующие на жилы через изоляцию, передаются на свинцовую оболочку, вызывая в ней внутренние механические напряжения.

Карточка № 3.9 (247)
Проводник с током в магнитном поле. Взаимодействие параллельных проводников с током

В магнитном и электрическом полях, как показано на рисунке, находятся проводник с током A и электронный пучок B . В каком случае электромагнитную силу можно уравновесить электрической?	В случае A	47
	В случае B	56
	В обоих случаях	125
	Ни в том, ни в другом случае	235
По какой формуле определяется сила, действующая на проводник с током?	$F = BIl$	212
	$F = B\Gamma l$	26
Исходное положение рамки с током показано на рисунке. Какое положение займет рамка после окончания движения?	Останется в исходном положении	13
	Повернется на угол $\alpha = 180^\circ$	20
	Повернется на угол $\alpha = 90^\circ$	155
	Будет непрерывно вращаться	224
На рис. A изображены электронные пучки, на рис. B — пучок и проводник с током, на рис. B — два проводника с током. В каком случае между токами возникает и электрическое, и магнитное взаимодействие?	В случае A	133
	В случае B	93
	В случае B	29
	Во всех случаях	83



В исходном положении подвижная рамка с током I_2 расположена под углом 45° к неподвижной рамке с током I_1 . Какое положение займет подвижная рамка после окончания движения?



Повернется на 45° против часовой стрелки	165
Повернется на 135° по часовой стрелке	177
Повернется на 45° по часовой стрелке	217
Повернется на 135° против часовой стрелки	203

§ 3.10. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Суть закона электромагнитной индукции, открытого английским физиком М. Фарадеем, заключается в следующем: *всякое изменение магнитного поля, в котором помещен проводник произвольной формы, вызывает в последнем появление ЭДС электромагнитной индукции.*

Рассмотрим этот закон с количественной стороны при движении прямолинейного проводника в однородном магнитном поле (рис. 3.19).

Пусть проводник длиной l движется со скоростью v . Тогда на свободные электроны, движущиеся вместе с проводником, будет действовать сила Лоренца, направление которой определяется по правилу левой руки. Под действием этой силы электроны движутся вдоль проводника, что приводит к разделению зарядов: на конце A проводника накапливаются положи-

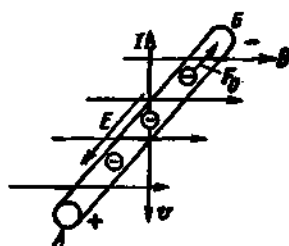


Рис. 3.19. Схема индукции ЭДС в проводнике, движущемся в однородном магнитном поле

тельные заряды, на конце B — отрицательные. Но при разделении зарядов возникает электрическое поле, препятствующее этому процессу. Когда силы поля уравниваются силе Лоренца, разделение прекратится. В процессе разделения зарядов силы Лоренца производят работу. Определим значение этой работы по отношению к единичному заряду, т. е. напряжение

между точками A и B . Поскольку поле сил Лоренца однородное, $U_{AB} = \mathcal{E}_L l$. Но $\mathcal{E}_L = F_L / q_0 = q_0 B v \sin \alpha / q_0 = Bv$, так как в нашем случае $\alpha = \pi/2$. В результате получим $U_{AB} = Bvl$.

Это напряжение равно ЭДС электромагнитной индукции и в общем случае, когда $\alpha \neq \pi/2$, выражается формулой

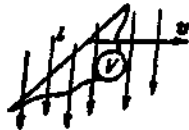
$$E = Bvl \sin \alpha. \quad (3.14)$$

Направление ЭДС определяется по правилу правой руки: *правую руку располагают так, чтобы магнитные линии входили в ладонь, отогнутый под прямым углом большой палец совмещают с направлением скорости; тогда вытянутые четыре пальца покажут направление ЭДС.*

Карточка № 3.10 (139)
Закон электромагнитной индукции

Будет ли наводиться ЭДС индукции в проводнике, если он неподвижен, а магнитное поле перемещается относительно этого проводника?	Не будет	222
	Это зависит от взаимного расположения проводника и поля	251
	Будет	108
Брусок из меди перемещается в магнитном поле так, как показано на рисунке. Определить направление ЭДС индукции в бруске		79
		115
		55
Как следует перемещать брусок в магнитном поле, чтобы в нем возникала ЭДС?		183
		181
		126

Желая измерить ЭДС в проводнике перемещающемся в однородном магнитном поле, к нему подключили вольтметр. Что покажет прибор?	Напряжение, пропорциональное скорости перемещения проводника	28
	Нулевое напряжение	102
Будет ли наводиться ЭДС индукции в диэлектрическом стержне, который перемещается в магнитном поле под прямым углом к полю?	Будет	148
	Не будет	123



§ 3.11. ЭДС ИНДУКЦИИ В КОНТУРЕ

Рассмотрим движение замкнутого контура (рамки) в неоднородном магнитном поле (рис. 3.20). Рамка перемещается в плоскости, перпендикулярной магнит-

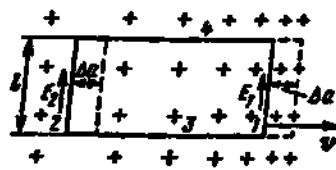


Рис. 3.20. Схема индукции ЭДС в рамке, движущейся в неоднородном магнитном поле

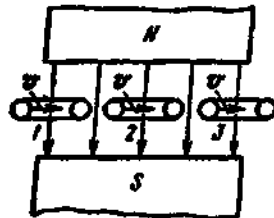


Рис. 3.21. К определению ЭДС в рамке, перемещающейся в неоднородном магнитном поле

ному полю, направленному от нас, и в сторонах 1 и 2 рамки наводятся ЭДС. В сторонах 3 и 4 продольные ЭДС не наводятся, поскольку они не пересекают силовых линий магнитного поля. ЭДС в стороне 1 больше ЭДС в стороне 2, так как магнитное поле справа интенсивней. Таким образом, результирующая ЭДС

$$e = E_1 - E_2 = B_1 lv - B_2 lv = (B_1 - B_2)lv.$$

При этом $v = \Delta a / \Delta t$; $B_1 \Delta a l = \Delta \Phi_1$ — приращение магнитного потока, пересекающего плоскость рамки; $B_2 \Delta a l = \Delta \Phi_2$ — уменьшение магнитного потока, так как рамка перемещается слева направо. Следовательно, без учета направления ЭДС $e = \Delta \Phi / \Delta t$, где $\Delta \Phi = \Delta \Phi_1 - \Delta \Phi_2$ ($\Delta \Phi_1 > \Delta \Phi_2$). Общее изменение потока $\Delta \Phi$ положительно; индуцированный ток имеет такое направление, при котором созданное им магнитное поле направлено против основного поля. С учетом этого выражение для e можно записать в виде

$$e = -\Delta \Phi / \Delta t. \quad (3.15)$$

Таким образом, ЭДС, индуцируемая в контуре при изменении магнитного потока, проходящего сквозь поверхность, ограниченную этим контуром, равна скорости изменения потока, взятой с отрицательным знаком.

Эта формулировка закона электромагнитной индукции справедлива для контуров любой произвольной формы.

Если контур состоит из w последовательно соединенных витков и магнитный поток Φ для каждого витка один и тот же, то индуцированная ЭДС

$$e = -w \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (3.16)$$

Пример 3.6. Квадратная рамка с длиной сторон 15 см из медной проволоки, площадь сечения которой 10 мм², перемещается с постоянной скоростью 1 м/с в однородном магнитном поле с индукцией 1 Тл (рис. 3.21). Определить в каждом из трех положений (1, 2 и 3) рамки значение и направление индуцированных ЭДС и тока в рамке.

Решение. ЭДС для положений 1 и 3 рамки рассчитаем согласно (3.14):

$$E_1 = E_3 = Bvl = 1 \cdot 1 \cdot 0,15 = 0,15 \text{ В},$$

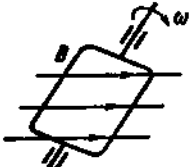
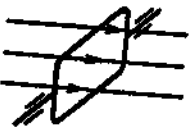
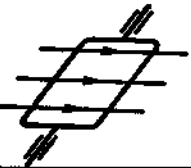
так как в магнитном поле находится только передняя или задняя сторона рамки.

Направление ЭДС определим по правилу правой руки. ЭДС для положения 2 рамки, по (3.15), $e = -\Delta \Phi / \Delta t$. Поскольку поле однородное, $\Delta \Phi / \Delta t = 0$.

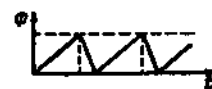
Ток для положений 1 и 3 рамки:

$$I_1 = I_3 = E_1 / R; \quad R = \rho l / S = 0,017 \cdot 4 \cdot 0,15 = 0,001 \text{ Ом}; \\ I_1 = 0,15 / 0,001 = 150 \text{ А}.$$

Направление тока зависит от направления ЭДС.

Две рамки перемещаются в однородном магнитном поле: одна с постоянной скоростью v_0, другая с переменной скоростью v. Какие из приведенных соотношений являются правильными? 	$\mathcal{E}_a = 0; \mathcal{E}_b \neq 0$	76
	$\mathcal{E}_a \neq 0; \mathcal{E}_b \neq 0$	98
	$\mathcal{E}_a \neq 0; \mathcal{E}_b = 0$	213
В однородном магнитном поле находится контур, который подвергается деформации. Будет ли при этом индуцироваться ЭДС в контуре? 	Будет	18
	Не будет	43
	Будет, если площадь, ограниченная контуром, изменяется	128
Магнитный поток, пронизывающий поверхность, ограниченную контуром, изменяется по закону $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$. По какому закону изменяется ЭДС?	$\mathcal{E} = \text{const}$	171
	$\mathcal{E} = -E_m \sin \omega t$	149
	$\mathcal{E} = -E_m \cos \omega t$	151
Рамка вращается в однородном магнитном поле, как показано на рисунке. Укажите положение рамки, при котором индуцируемая в ней ЭДС максимальна 		210
		161

Магнитный поток изменяется так, как показано на рисунке. Как изменяется ЭДС в контуре, который пронизывается таким потоком?



182



9



179



88

§ 3.12. ПРИНЦИП ЛЕНЦА

Отрицательный знак в выражении (3.15) свидетельствует о том, что ЭДС, индуцируемая в контуре, стремится вызвать токи, препятствующие изменению магнитного потока. Следовательно, индуцированная в контуре ЭДС и ток всегда имеют такое направление, при котором они препятствуют причине, их вызывающей.

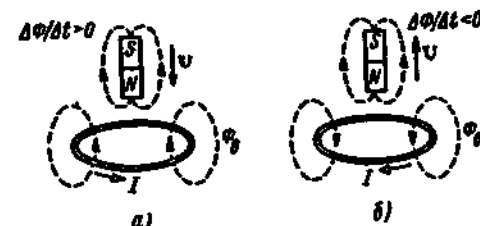


Рис. 3.22. К объяснению принципа Ленца

Это положение выражает сформулированный Ленцем закон о направлении индуцированного тока. На рис. 3.22, а показан виток, в который сначала

вводят постоянный магнит. При этом магнитное поле увеличивается, $\Delta\Phi/\Delta t > 0$. В витке индуцируемая ЭДС и ток такого напряжения, при котором магнитное поле витка препятствует нарастанию внешнего магнитного поля, т. е. магнитный поток витка Φ_v имеет направление, противоположное направлению магнитного поля постоянного магнита. Когда постоянный магнит выводят из витка (рис. 3.22, б), магнитное поле уменьшается, $\Delta\Phi/\Delta t < 0$. Ток, возникающий в витке, создает магнитный поток, препятствующий убыванию магнитного поля постоянного магнита.

На основании этих рассуждений можно сделать вывод о том, что виток стремится сохранить неизменным свое магнитное состояние, т. е. сохранить постоянный магнитный поток, сцепленный с ним. Это явление можно сравнить с инерцией, которая наблюдается, например, при движении свободной материальной точки. Принцип инерции заключается в том, что свободная материальная точка стремится сохранить свое количество движения mv . Если под действием внешних сил изменяется количество движения материальной точки, то возникает сила инерции, противоположная внешним силам: $F_{\text{ин}} = -\Delta(mv)/\Delta t$.

В приведенном случае магнитный поток можно рассматривать как аналог количества движения, а ЭДС индукции — как аналог некоторой инерционной силы.

Пример 3.7. Прямоугольная рамка перемещается в магнитном поле прямолинейного тока так, как показано на рис. 3.23. Пользуясь принципом Ленца, определить направление тока в рамке.

Решение. Магнитное поле, пронизывающее плоскость рамки, неоднородно: у ближней стороны, согласно (3.7), $H_{\text{бл}} = I/(2\pi r)$, у дальней $H_{\text{даль}} = I/(2\pi(r+a))$. Следовательно, при удалении рамки магнитный поток, пронизывающий ее плоскость, убывает. Тогда ток будет создавать магнитный поток $\Phi_{\text{р}}$, препятствующий убыванию, т. е. направленный в ту же сторону, что и магнитный поток проводника. Направление тока находим по правилу буравчика.

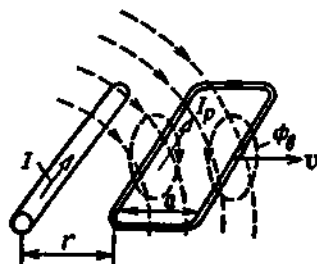
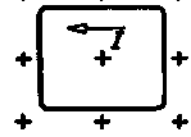
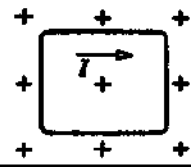


Рис. 3.23. Рамка в магнитном поле прямолинейного тока

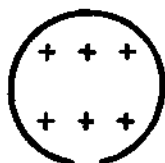
Карточка № 3.12 (173)

Принцип Ленца

Какое из приведенных утверждений является неверным? Индуцированный ток препятствует	увеличению магнитного потока	236
	изменению магнитного потока	167
	магнитному потоку	111
	уменьшению магнитного потока	122
В однородном магнитном поле находится раздвижная рамка. Определить направление тока при раздвижении рамки		140
		60
Относительно катушки перемещается постоянный магнит. Определить направление перемещения магнита при заданном направлении индуцированного тока		146
		176
Катушку подключают к источнику постоянного тока сначала с сердечником из меди, а затем без него. В каком случае магнитный поток катушки быстрее достигнет установившегося значения?	С сердечником	204
	Без сердечника	220
	В обоих случаях скорость одинакова	136



Проявляет ли себя принцип Ленца, если переменное магнитное поле пронизывает несплошное кольцо, изготовленное из проводящего материала, наводя в нем постоянную ЭДС?



Проявляет	240
Не проявляет	226

§ 3.13. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

Пусть в магнитном поле проводник длиной l скользит под действием груза по направляющим (рис. 3.24). Тогда в соответствии с законом электромагнитной индукции в этом проводнике наводится ЭДС индукции $E = Blv$. Под действием этой ЭДС в цепи начнет проходить ток I . Согласно закону Ома для всей цепи,

$$E = IR + IR_{\text{вт}},$$

где R — сопротивление нагрузки; $R_{\text{вт}}$ — сопротивление проводников.

Очевидно, что в резисторах R и $R_{\text{вт}}$ расходуется энергия и происходит процесс преобразования механической энергии в электрическую. При этом на проводник длиной l действует электромагнитная сила $F = BIl$, направление которой определяется по правилу левой руки. При установившейся скорости сила $G = F$. Найдем соотношения между механической и электрической мощностями для этого состояния. Умножим

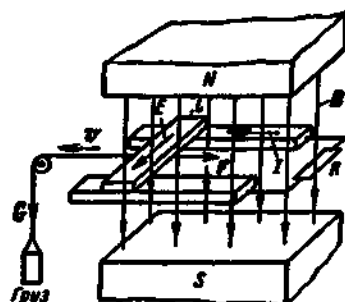


Рис. 3.24. Модель, иллюстрирующая преобразование механической энергии в электрическую

уравнение для E на ток I :

$$EI = I^2 R + I^2 R_{\text{вт}} \text{ или } Blv = I^2 R + I^2 R_{\text{вт}}.$$

Так как $Bil = F$, то

$$Fv = I^2 R + I^2 R_{\text{вт}}, \quad (3.17)$$

где Fv — механическая мощность, развиваемая при движении груза; $I^2 R$ — электрическая мощность, потребляемая в нагрузке; $I^2 R_{\text{вт}}$ — мощность потерь в проводнике.

Таким образом, механическая энергия при перемещении проводника в магнитном поле преобразуется в электрическую. Рассмотренная модель является моделью простейшего генератора электрической энергии.

Карточка № 3.13 (286)

Преобразование механической энергии в электрическую

Какое соотношение между силой G и электромагнитной силой F возможно (рис. 3.24)?	$G = F$	24
	$G > F$	5
	$G < F$	33
Каков характер движения груза в устройстве, изображенном на рис. 3.24, после того как электромагнитная сила сопротивления F уравновесит силу G ?	Равнозамедленный	239
	Равноускоренный	94
	Равномерный	96
Как будет двигаться груз в рассматриваемом устройстве, если разорвать цепь тока?	Равномерно	89
	Равнозамедленно	68
	Равноускоренно	81
Как зависит установившаяся скорость движения груза от сопротивления нагрузки R ?	Не зависит от R	14
	С увеличением R увеличивается	238
	С увеличением R уменьшается	129
Какое из приведенных уравнений достаточно полно характеризует режим работы генератора: $E = Blv$; $F = BIl$; $E = IR + IR_{\text{вт}}$?	$E = Blv$; $F = BIl$	72
	$E = Blv$	175
	$F = BIl$	58
	$E = IR + IR_{\text{вт}}$	138
	$E = Blv$; $F = BIl$	138

§ 3.14. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В МЕХАНИЧЕСКУЮ

К проводнику длиной l , помещенному в магнитное поле, приложено напряжение источника U , и в цепи существует ток I (рис. 3.25). На проводник действует электромагнитная сила $F = BIl$, направление которой определяется по правилу левой руки. Под действием

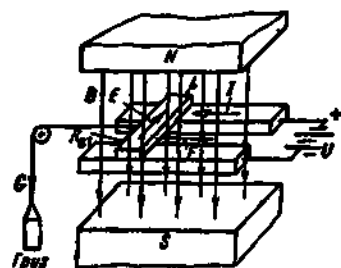


Рис. 3.25. Модель, иллюстрирующая преобразование электрической энергии в механическую

Согласно принципу Ленца, направление этой ЭДС противоположно направлению тока и, следовательно,

$$U = E + IR_{\text{ст}}, \quad (3.18)$$

где $R_{\text{ст}}$ — сопротивление проводника длиной l .

Отсюда ток в цепи

$$I = (U - E) / R_{\text{ст}}. \quad (3.19)$$

Умножив уравнение (3.18) на ток I и имея в виду, что $E = Blv$, получим

$$UI = EI + I^2 R_{\text{ст}} \quad Blvl + I^2 R_{\text{ст}} \quad Fv + I^2 R_{\text{ст}}$$

т. е.

$$P_s = P_{\text{эл}} + P_r, \quad (3.20)$$

где $P_s = UI$ — электрическая мощность; $P_{\text{эл}} = Fv$ — механическая мощность; $P_r = I^2 R_{\text{ст}}$ — тепловая мощность.

Таким образом, полученная проводником электрическая энергия источника преобразуется в механическую и тепловую энергию.

Эта модель является простейшим электрическим двигателем.

Пример 3.8. В устройстве, изображенном на рис. 3.25, $U = 2$ В; $R_{\text{ст}} = 0,01$ Ом; $B = 1$ Тл; $l = 40$ см. Определить: 1) максимальную силу тяги скользящего проводника длиной l ; 2) ток в цепи, силу тяги, КПД устройства, если проводник, поднимающий груз, имеет скорость 2 м/с; 3) скорость проводника, если сила, препятствующая его движению, равна нулю; 4) силу, создаваемую опускающимся грузом, которая необходима для достижения скорости 2 м/с при том же источнике питания.

Решение. 1. Максимальная сила тяги $F_{\text{max}} = BIl_{\text{max}}$. Согласно (3.19), ток $I_{\text{max}} = U / R_{\text{ст}}$, так как $E = Blv = 0$ в момент трогания провода. Отсюда $I_{\text{max}} = 2 / 0,01 = 200$ А; $F_{\text{max}} = 1 \cdot 200 \cdot 0,4 = 80$ Н.

2. Согласно (3.19), ток $I = (U - E) / R_{\text{ст}}$; $E = Blv = 1 \cdot 0,4 \cdot 2 = 0,8$ В. Следовательно, $I = (2 - 0,8) / 0,01 = 120$ А.

$$\text{Сила тяги } F = BIl = 1 \cdot 0,4 \cdot 120 = 48 \text{ Н; } \eta = \frac{P_{\text{мх}}}{P_s} \cdot 100\% = \frac{Fv}{UI} \times 100\% = \frac{18 \cdot 2}{2 \cdot 120} \cdot 100\% = 40\%.$$

3. Скорость движения проводника в общем случае находят с помощью формулы (3.18), поскольку $E = Blv$:

$$v = (U - IR_{\text{ст}}) / (Bl).$$

В нашем случае сила, препятствующая движению проводника, равна нулю, поэтому проводник длиной l будет разгоняться под действием силы F до тех пор, пока его скорость не станет такой, при которой противо-ЭДС E уравновесит напряжение источника U . Следовательно, ток в цепи окажется равным нулю и скорость $v = U / (Bl) = 2 / (1 \cdot 0,4) = 5$ м/с.

4. Опускание груза означает, что устройство перешло в режим генератора; следовательно, для цепи рис. 3.25 можно записать $E + U = IR_{\text{ст}}$, т. е. ЭДС, возникающая в проводнике длиной l при движении груза вниз со скоростью 2 м/с, действует согласно с напряжением источника и вместе с этим источником создает падение напряжения $IR_{\text{ст}}$ на этом проводнике. Следовательно, $I = (E + U) / R_{\text{ст}} = (Blv + U) / R_{\text{ст}} = (1 \cdot 0,4 \cdot 2 + 2) / 0,01 = 280$ А, откуда сила, которую развивает груз, $G = F = BIl = 1 \cdot 0,4 \cdot 280 = 112$ Н.

Карточка № 3.14 (413)
Преобразование электрической энергии в механическую

При каком соотношении между F и G проводник длиной l вместе с грузом (пуск двигателя) придет в движение (рис. 3.25)?	$G = F$	27
	$G < F$	69
	$G > F$	65
По какой формуле можно определить ток в цепи двигателя в момент пуска?	$I = (U - E) / R_{\text{ст}}$	37
	$I = U / R_{\text{ст}}$	92
	$I = (E - U) / R_{\text{ст}}$	228
Каков характер движения груза под действием электромагнитной силы после пуска двигателя?	Сначала равноускоренный, а затем равномерный	180

Как зависит скорость движения груза в рассматриваемом устройстве от его массы?	Все время равноускоренный	131
	Все время равномерный	141
	Не зависит от массы груза	184
	При увеличении массы уменьшается	187
Из какого уравнения можно определить скорость движения проводника, если груз отсутствует (холостой ход двигателя)?	При увеличении массы увеличивается	173
	$U = E + IR_{\text{ст}}$	242
	$E = Blv$	216
	$E = U$	189

§ 3.15. ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЕ И ИНДУКТИВНОСТЬ КАТУШКИ

Если через катушку проходит изменяющийся ток, то ее витки пересекаются переменным магнитным полем, вызываемым этим током, и на зажимах катушки возникает ЭДС индукции. Для количественной характеристики этого процесса введем понятия потоко-сцепления и индуктивности катушки. На рис. 3.26 показана катушка с током, витки которой пронизывают различное число силовых линий: центральные витки — все силовые линии, крайние — только часть силовых линий. Следовательно, магнитные потоки различных витков различны. Эти магнитные потоки называют потоками самоиндукции Φ_L , так как они создаются током катушки.

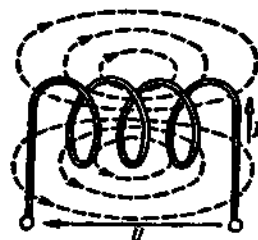


Рис. 3.26. К определению потоко-сцепления и индуктивности катушки

Сумму потоков самоиндукции всех витков катушки называют потоко-сцеплением самоиндукции:

$$\Psi_L = \Phi_{L1} + \Phi_{L2} + \dots + \Phi_{Ln} \quad (3.21)$$

В том случае, когда магнитная проницаемость среды по-

стоянна, между потоко-сцеплением Ψ_L и создающим его током I существует линейная зависимость

$$\Psi_L = L I, \quad (3.22)$$

где L — коэффициент пропорциональности, называемый индуктивностью катушки.

Единицей индуктивности является генри (Гн):

$$[L] = 1 \text{ Вб/1 А} = 1 \text{ Гн}.$$

На практике, как правило, пользуются более мелкими единицами: миллигенри ($1 \text{ мГн} = 10^{-3} \text{ Гн}$) и микрогенри ($1 \text{ мкГн} = 10^{-6} \text{ Гн}$).

Найдем индуктивность кольцевой катушки (см. рис. 3.6). Так как в этом случае все магнитное поле замыкается внутри катушки, то магнитные потоки Φ_L для всех витков одинаковы и, следовательно, $\Psi_L = w\Phi_L$. Но $\Phi_L = BS$ и $B = \mu_0 H$. Напряженность поля, согласно закону полного тока, $H = Iw/l$. В результате получим $\Psi_L = \mu_0 \frac{Iw^2}{l} S$.

Так как $L = \Psi_L/I$, то

$$L = \mu_0 \frac{w^2}{l} S. \quad (3.23)$$

Индуктивность цилиндрической катушки, у которой длина достаточно велика по сравнению с диаметром $D (l \geq 5D)$, также может быть определена по формуле (3.23).

Пример 3.9. Средний радиус кольцевой катушки с неферромагнитным сердечником $r = 10$ см, площадь поперечного сечения $S = 6 \text{ см}^2$, плотность намотки 8 вит/см. Определить: 1) индуктивность катушки; 2) как изменится индуктивность катушки, если при добавлении витков плотность намотки доведена до 12 вит/см.

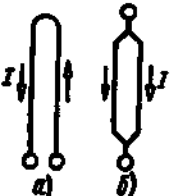
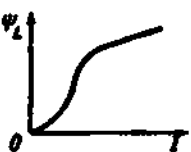
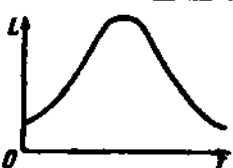
Решение. 1. Подставив в (3.23) $\mu_0 = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, $l = 2\pi r = 2\pi \cdot 10$; $S = 6 \text{ см}^2$; $w = 8 \cdot 2\pi = 8 \cdot 2\pi \cdot 10$, получим

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8^2 \cdot 2^2 \cdot \pi^2 \cdot 10^2 \cdot 6 / (2\pi \cdot 10) \approx 0,3 \text{ мГн}.$$

2. При изменении плотности намотки изменяется только число витков. Следовательно, новое значение индуктивности $L' = 12^2 L / 8^2 = 12^2 \cdot 0,3 / 8^2 = 0,675 \text{ мГн}$, т. е. индуктивность увеличится в 2,25 раза.

Карточка № 3.15 (318)
Потоко-сцепление и индуктивность катушки

Какое из приведенных утверждений является правильным применительно к катушке без ферромагнитного сердечника?	Индуктивность катушки не зависит ни от I , ни от Ψ_L	40
	Индуктивность катушки зависит и от I , и от Ψ_L	106

Какой из параметров сильнее всего влияет на ее индуктивность?	Индуктивность катушки зависит только от I	50
	Индуктивность катушки зависит только от Ψ_L	117
	Длина l	113
	Площадь сечения S	219
Два прямолинейных проводника расположены в непосредственной близости друг от друга. В одном случае одинаковые токи идут в противоположных направлениях, в другом — в одном направлении. Каково соотношение между L_a и L_b ?	Число витков w	174
	$L_a = L_b$	135
	$L_a > L_b$	31
	$L_a < L_b$	99
Укажите единицу потокоцепления в СИ		
	А/м	77
	Вб	52
	Вб/м ²	16
Для катушки с ферромагнитным сердечником связь между Φ и I задается кривой намагничивания. Как зависит L от I ?	Мкс	105
		241
	$L = \text{const}$	139
		153

§ 3.16. ЭДС САМОИНДУКЦИИ. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Рассмотрим процесс, происходящий в цепи (рис. 3.27) при замыкании ключа K . До замыкания ключа ток в цепи $I=0$. После замыкания ключа ток в цепи устанавливается не мгновенно и лишь через определенное время достигает значения $I=U/R_k$. Следовательно, ток, проходящий через катушку, изменяется, а значит, изменяется поток Φ_L каждого витка и потокоцепление катушки Ψ_L . Согласно (3.15), в каждом

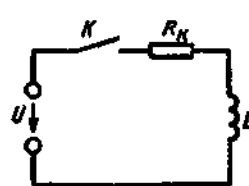


Рис. 3.27. Схема индуктирования ЭДС самоиндукции в катушке

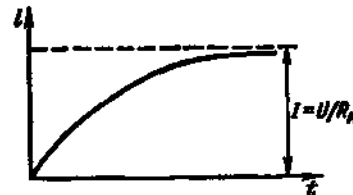


Рис. 3.28. Зависимость тока в катушке от времени при ее подключении к источнику постоянного напряжения

витке наводится ЭДС $e = -d\Phi_L/dt$, а во всей катушке ЭДС $e_L = -d\Phi_{L1}/dt - d\Phi_{L2}/dt - \dots - d\Phi_{Lw}/dt = -(d\Phi_{L1}/dt + d\Phi_{L2}/dt + \dots + d\Phi_{Lw}/dt)$. Выражение в скобках представляет собой сумму производных и может быть заменено производной суммы потоков Φ_L : $e_L = -\frac{d(\Phi_{L1} + \Phi_{L2} + \dots + \Phi_{Lw})}{dt}$. В соответствии с (3.21) $e_L = -d\Psi_L/dt$. Но $\Psi_L = Li$ и для катушки без ферромагнитного сердечника ($L = \text{const}$) окончательно получим

$$e_L = -L di/dt. \quad (3.24)$$

ЭДС e_L называют ЭДС самоиндукции, а рассмотренное явление возникновения ЭДС в катушке вследствие изменения тока в этой катушке — самоиндукцией.

ЭДС самоиндукции, согласно принципу Ленца, препятствует изменению тока в катушке, поэтому ток достигает установившегося значения $I=U/R_k$ постепенно (рис. 3.28). Если замкнуть катушку на резистор, то ток в цепи не исчезает мгновенно, так как ЭДС самоиндукции препятствует его уменьшению. Прохождение тока через R_k сопровождается выделением теп-

ловой энергии, что свидетельствует о накоплении энергии в магнитном поле катушки. Найдем значение этой энергии. Согласно второму закону Кирхгофа для цепи рис. 3.27, $U + e_L = iR_k$, откуда $U = iR_k - e_L = iR_k + L \frac{di}{dt}$, т. е. падение напряжения источника частично происходит на R_k и частично уравнивает ЭДС самоиндукции e_L .

Умножим последнее уравнение на idt :

$$U idt = i^2 R_k dt + L idt,$$

где $U idt$ — энергия, которую отдает источник в цепь за время dt ; $i^2 R_k dt$ — энергия, выделяемая в виде теплоты на резисторе R_k ; $L idt$ — энергия, накапливаемая в магнитном поле катушки за время dt .

Для нахождения всей энергии, которая накопится в магнитном поле катушки при изменении тока от 0 до $I = U/R_k$, проинтегрируем выражение для $L idt$:

$$W_L = \int_0^I L idt = LI^2/2. \quad (3.25)$$

Это выражение аналогично выражению для кинетической энергии тела массой M , движущегося со скоростью v : $W = (Mv)^2/2$.

Пример 3.10. Катушку, индуктивность которой $L = 0,1$ Гн и сопротивление $R_k = 10$ Ом, подключают к источнику постоянного напряжения $U = 100$ В. Определить ЭДС самоиндукции в первый момент подключения катушки к источнику. Какое количество энергии сосредоточено в магнитном поле катушки при установившемся токе?

Решение. Так как ток в катушке в первый момент равен нулю (рис. 3.28), все напряжение источника идет на уравнивание ЭДС самоиндукции; следовательно, $U = -e_L$, откуда $e_L = -U = -100$ В. При установившемся токе $I = U/R_k = 100/10 = 10$ А $W_L = LI^2/2 = 0,1 \cdot 100/2 = 5$ Дж.

Карточка № 3.16 (161)
ЭДС самоиндукции. Энергия магнитного поля

Как изменяется ЭДС самоиндукции при подключении катушки к источнику постоянного напряжения?	Увеличивается	49
	Остается неизменной	109
	Уменьшается	130

Продолжение

Найти правильное соотношение для ЭДС самоиндукции в цепи в момент времени t_1 в результате изменения токов i_1 и i_2	$e_1 > e_2$	119
	$e_1 < e_2$	82
	$e_1 = e_2$	53
Будет ли возникать ЭДС самоиндукции в катушке с постоянным током, если в нее вводить ферромагнитный сердечник?	Будет	227
	Не будет	124
Как изменится ток в катушке при введении сердечника?	Увеличится	152
	Останется неизменным	157
	Уменьшится	246
Каково соотношение между энергиями магнитного поля для двух катушек с одинаковыми значениями установившегося тока, если одна катушка со стальным сердечником, а другая без сердечника?	$W_c > W$	205
	$W_c = W$	211
	$W_c < W$	202

§ 3.17. ЭДС ВЗАИМОИНДУКЦИИ. ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

В том случае, когда переменное магнитное поле, созданное током одной катушки, пересекает витки другой катушки (рис. 3.29), и наоборот, на зажимах последней катушки возникает ЭДС, которую называют ЭДС взаимной индукции.

Найдем выражение для ЭДС взаимной индукции, которая индуцируется в катушках w_1 и w_2 .

Ток i_1 , проходящий через катушку w_2 , создает магнитное поле, часть которого сцеплена с витками ка-

тушки w_2 (рис. 3.29, а), и количественно определяется потокоцеплением взаимной индукции: $\Psi_{1,2} = w_2 \Phi_{1,2}$. Соответственно ток i_2 катушки w_2 (рис. 3.29, б) создает потокоцепление взаимной индукции $\Psi_{2,1} = w_1 \Phi_{2,1}$.

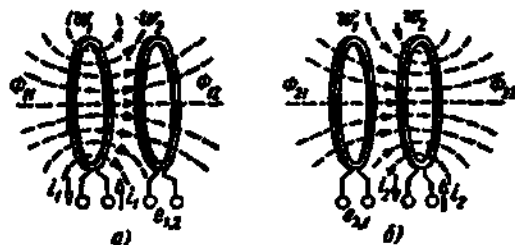


Рис. 3.29. Магнитосвязанные цепи

Здесь $\Phi_{1,2}$ и $\Phi_{2,1}$ — магнитные потоки взаимной индукции, пропорциональные токам, их создающим. Следовательно, и потокоцепление взаимной индукции пропорциональны этим токам:

$$\Psi_{1,2} = M_{1,2} i_1; \Psi_{2,1} = M_{2,1} i_2. \quad (3.26)$$

Коэффициенты пропорциональности $M_{1,2}$ и $M_{2,1}$ называют взаимными индуктивностями. В том случае, когда катушки не содержат ферромагнитных сердечников, $M_{1,2} = M_{2,1} = M$.

Взаимная индуктивность M зависит от числа витков катушек, их размеров и взаимного расположения, а также от магнитных свойств среды.

Единица взаимной индуктивности M — генри (Гн).

При изменении потокоцепления взаимной индукции первой катушки во второй катушке наводится ЭДС взаимной индукции:

$$e_{1,2} = -d\Psi_{1,2}/dt = -M di_1/dt. \quad (3.27)$$

Соответственно изменение потокоцепления взаимной индукции второй катушки вызывает ЭДС взаимной индукции в первой катушке:

$$e_{2,1} = -d\Psi_{2,1}/dt = -M di_2/dt.$$

Явление взаимной индукции находит широкое применение в различных электро- и радиотехнических устройствах. В частности, оно используется для трансформации электроэнергии в целях переменного тока.

Однако это явление может проявлять себя и как

вредное. Например, в сердечнике катушки (рис. 3.30) или трансформатора за счет явления взаимной индукции возникает кольцевой ток, который называют вихревым. Протекание вихревых токов в сердечнике вызывает большие тепловые потери. Для уменьшения этих потерь ферромагнитные сердечники набирают из тонких изолированных друг от друга листов электротехнической стали с повышенным удельным электрическим сопротивлением.

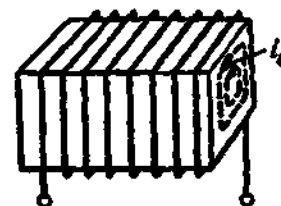
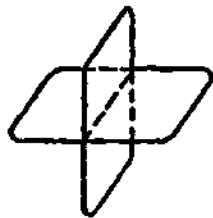
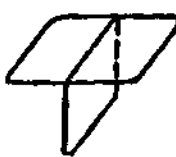


Рис. 3.30. Образование вихревых токов в магнитопроводе

Карточка № 3.17 (235)
ЭДС взаимной индукции. Вихревые токи

Каково соотношение между потоком самоиндукции $\Phi_{1,1}$ и потоком взаимной индукции $\Phi_{1,2}$ на рис. 3.29, а?	$\Phi_{1,1} = \Phi_{1,2}$	112
	$\Phi_{1,2} < \Phi_{1,1}$	127
	$\Phi_{1,2} > \Phi_{1,1}$	62
Возможно ли практически обеспечить $\Phi_{1,2} = \Phi_{1,1}$; $\Phi_{2,1} = \Phi_{2,2}$?	Нет	46
	Да	22
При каком взаимном расположении катушек ЭДС взаимной индукции максимальна?		54
		120

		185
Наводит ли вихревые токи ЭДС взаимной индукции в катушке (рис. 3.30)?	Да	197
	Нет	158
	Это зависит от характера изменения тока	207
От каких свойств сердечника зависят вихревые токи?	Только от электрических	232
	Только от магнитных	163
	И от электрических, и от магнитных	104

ГЛАВА 4

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 4.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ, ПОЛУЧЕНИЕ И ИЗОБРАЖЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Переменным называют ток, изменение которого по значению и направлению повторяется через равные промежутки времени.

Широкое применение переменного тока в различных областях техники объясняется легкостью его получения и преобразования, а также простотой устройства генераторов и двигателей переменного тока, надежностью их работы и удобством эксплуатации. Рассмотрим принцип действия простейшего генератора переменного тока.

Между полюсами электромагнита или постоянного магнита (рис. 4.1) расположен цилиндрический ротор (якорь), набранный из листов электротехнической стали. На якоре укреплен катушка, состоящая из опре-

деленного числа витков проволоки. Концы этой катушки соединены с контактными кольцами, которые вращаются вместе с якорем. С контактными кольцами связаны неподвижные контакты (щетki), с помощью которых катушка соединяется с внешней цепью. Воздушный зазор между полюсами и якорем профилируют

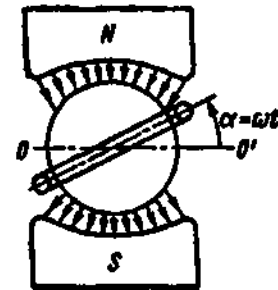


Рис. 4.1. Модель генератора переменного тока

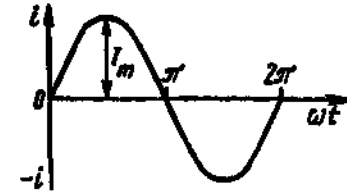


Рис. 4.2. График синусоидального тока

так, чтобы индукция магнитного поля в нем менялась по синусоидальному закону:

$$B = B_m \sin \alpha,$$

где α — угол между плоскостью катушки и нейтральной плоскостью OO' .

Когда якорь вращается в магнитном поле со скоростью ω , в активных сторонах катушки наводится ЭДС индукции (активными называют стороны, находящиеся в магнитном поле генератора)

$$e_1 = Blv \sin \beta,$$

где β — угол между направлениями векторов индукции магнитного поля B и скорости v ; l — длина активных сторон витков катушки.

Магнитное поле в зазоре расположено так, что угол $\beta = \pi/2$. Таким образом,

$$e_1 = Blv = B_m l v \sin \alpha = B_m \sin \omega t.$$

При числе витков w число активных сторон катушки равно $2w$. Тогда ЭДС катушки

$$e = e_1 2w = 2B_m w l v \sin \omega t = E_m \sin \omega t, \quad (4.1)$$

где $E_m = 2B_m w l v$ — максимальное значение ЭДС.

Таким образом, ЭДС генератора меняется по синусоидальному закону. Если к зажимам генератора подключить нагрузку, то через нее пойдет ток, который также будет изменяться по синусоидальному закону. График синусоидального тока $i = I_m \sin \omega t$ представлен на рис. 4.2. По оси ординат откладывают ток i , по оси абсцисс — угол $\alpha = \omega t$ или время t .

Карточка № 4.1 (301)
Определение, получение и изображение переменного тока

Каков характер движения электрических зарядов в проводнике при переменном токе?	Вращательный	20
	Колебательный	40
	Поступательный	51
По какой формуле можно определить ЭДС, индуцируемую в катушке генератора?	$\epsilon = -d\Phi/dt$	16
	$\epsilon = -\omega d\Phi/dt$	75
	$\epsilon = d\Psi/dt$	33
Для какой цели в генераторе переменного тока применяют стальную якорь?	Для требуемого профилирования воздушного зазора	52
	Для уменьшения магнитного сопротивления генератора	77
Из какой стали должен выполняться якорь генератора переменного тока?	Из магнитотвердой	27
	Из магнитомягкой	61
	Из любой	6
Что определяет ордината графика переменного тока для любого момента времени t ?	q/t	25
	dq/dt	48
	$\Delta q/\Delta t$	36

§ 4.2. ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Для количественной характеристики переменного тока служат следующие параметры.

1. Мгновенные значения тока i , напряжения u , ЭДС e — их значения в любой момент времени: $i = I_m \sin \omega t$; $u = U_m \sin \omega t$; $e = E_m \sin \omega t$.

2. Амплитудные значения тока I_m , напря-

жения U_m , ЭДС E_m — максимальные значения мгновенных величин i , u и e (рис. 4.3).

3. Период T — промежуток времени, в течение которого ток совершает полное колебание и принимает прежнее по величине и знаку мгновенное значение. Период выражают в секундах (с), миллисекундах (мс) и микросекундах (мкс).

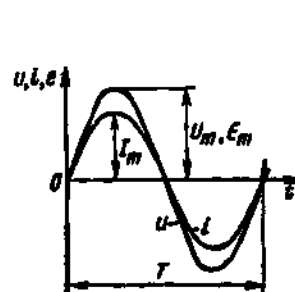


Рис. 4.3. К определению параметров переменного тока

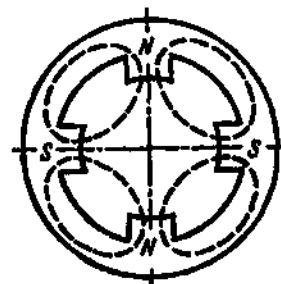


Рис. 4.4. Схема генератора с двумя парами полюсов

4. Угловая скорость ω характеризует скорость вращения катушки генератора в магнитном поле. На практике для получения нужной частоты при относительно малой угловой скорости генераторы имеют несколько пар полюсов p .

На рис. 4.4 показан генератор с двумя парами полюсов, в котором за один оборот катушки ЭДС изменяет направление 4 раза или $2p$ раз. Следовательно, одному обороту катушки соответствует p периодов переменного тока. Введем понятие электрического угла $\alpha_{эл} : \alpha_{мех} = p\alpha$. Тогда скорость ω определяет электрическую угловую скорость катушки:

$$\omega = \alpha_{эл}/(pT) = p2\pi/(pT) = 2\pi/T, \quad (4.2)$$

где $p2\pi$ — электрический угол, соответствующий одному обороту катушки в пространстве; pT — время, соответствующее p периодам тока.

Таким образом, формула (4.2) определяет электрическую частоту вращения.

5. Циклическая частота f — величина, обратная периоду T , т. е.

$$f = 1/T, \quad (4.3)$$

и характеризующая число полных колебаний тока за 1 с.

Единицей циклической частоты является герц (Гц):

$$[f] = 1/\text{с} = 1 \text{ Гц}.$$

Промышленной частотой в СССР считается частота 50 Гц. Распространены также производные единицы циклической частоты килогерц (кГц), мегагерц (МГц) и гигагерц (ГГц): 1 кГц = 10^3 Гц; 1 МГц = 10^6 Гц; 1 ГГц = 10^9 Гц.

Сопоставив формулы (4.2) и (4.3), получим

$$\omega = 2\pi f. \quad (4.4)$$

6. Действующие значения тока I , напряжения U и ЭДС E . Для измерения переменного тока, напряжения и ЭДС вводят понятие действующего значения. Переменный ток сравнивают с постоянным по тепловому действию (рис. 4.5). Если положение реостатов подобрано так, что количество теплоты, выделяемой в схемах рис. 4.5, а, б на резисторе R , оказывается одинаковым, то можно считать, что и токи в схемах одинаковы.

Таким образом, действующее значение переменного тока равно такому постоянному току, который за время, равное одному периоду, выделяет на данном резисторе одинаковое количество теплоты с переменным током.

Найдем соотношение между действующим и амплитудным значениями тока. Согласно определению, $Q_+ = Q_-$ (Q_+ — количество теплоты, выделяемое постоянным и переменным токами):

$$Q_+ = I^2 R T; \quad Q_- = \int_0^T i^2 R dt,$$

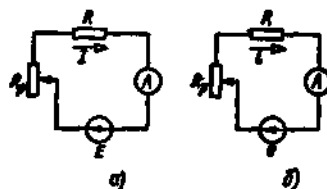


Рис. 4.5. К определению понятия действующего значения переменного тока

где $\int_0^T i^2 R dt$ — количество теплоты, выделяемое переменным током за время dt .

Приравняв эти выражения, получим

$$I^2 R T = \int_0^T i^2 R dt.$$

Сократив на общий

множитель R и учтя, что $i = I_m \sin \omega t$, найдем выражение для действующего значения тока:

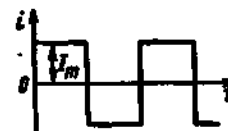
$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt},$$

или после интегрирования

$$I = I_m / \sqrt{2} \approx 0,707 I_m. \quad (4.5)$$

Карточка № 4.2 (214)
Параметры переменного тока

Являются ли параметры T , f и ω независимыми?	Являются	21
	Не являются	68
	Это зависит от числа пар полюсов генератора	12
Определить частоту тока генератора f , если частота вращения якоря генератора $n = 3000$ об/мин; число пар полюсов генератора $p = 2$	$f = 6000$ Гц	79
	$f = 100$ Гц	26
	$f = 50$ Гц	23
Какой электрический угол соответствует периоду переменного тока T ?	2π	5
	$2\pi p$	55
	$2\pi/p$	18
Каково соотношение между амплитудным и действующим значениями тока, представленного на графике?	$I = 0,707 I_m$	31
	$I = I_m/2$	80
	$I = I_m$	66



На приведенных графиках $I_{1m} = I_{2m}$. Каково соотношение между действующими значениями этих токов?	$I_1 > I_2$	39
	$I_1 < I_2$	29
	$I_1 = I_2$	34

§ 4.3. ФАЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. СДВИГ ФАЗ

Пусть на якоре генератора укреплены два одинаковых витка 1 и 2, сдвинутых в пространстве на угол φ , как показано на рис. 4.6, а. При вращении якоря в витках наводится ЭДС индукции одинаковой частоты ω и амплитуды E_m (рис. 4.6, б), так как витки вращаются с одинаковой частотой в одном и том же магнитном поле.

Положение витков задано углами ψ_1 и ψ_2 для произвольного момента времени, которое можно считать $t=0$. Плоскости витков не совпадают с нейтральной плоскостью OO' . Мгновенные значения ЭДС как функции времени определяются выражениями

$$e_1 = E_m \sin(\omega t + \psi_1); e_2 = E_m \sin(\omega t + \psi_2). \quad (4.6)$$

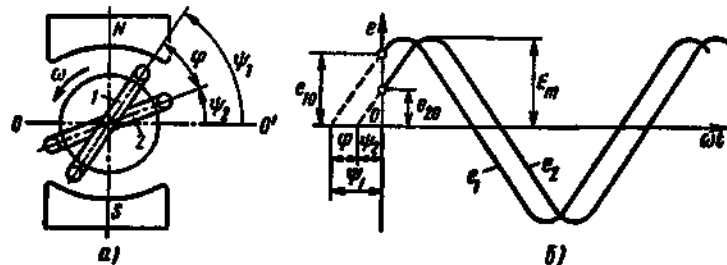


Рис. 4.6. К объяснению понятия фазы и сдвига фаз при переменном токе

Следовательно, в момент $t=0$ ЭДС отличны от нуля:

$$e_{10} = E_m \sin \psi_1; e_{20} = E_m \sin \psi_2.$$

Электрические углы ψ_1 и ψ_2 характеризуют значения ЭДС в начальный момент времени и называются начальными фазами.

Так как начальные фазы ЭДС различны, максимальные значения ЭДС в витках наступают не одновременно, а с фиксированным сдвигом во времени. Временной сдвиг определяется разностью начальных фаз и называется сдвигом фаз φ (рис. 4.6, б):

$$\varphi = \psi_1 - \psi_2. \quad (4.7)$$

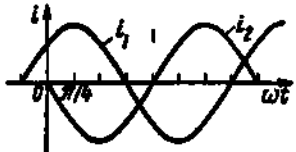
Временной сдвиг Δt рассчитывают в соответствии с равенством

$$\Delta t = \varphi / \omega = \varphi T / (2\pi). \quad (4.8)$$

В данном случае одна из ЭДС является опережающей, а другая — отстающей по фазе. Будем считать опережающей ту ЭДС, максимум которой расположен левее, при условии $\varphi < \pi$. Угол находят по расстоянию между ближайшими максимумами ЭДС одного знака или моментами прохождения нулевого значения.

Карточка № 4.3 (227)
Фаза переменного тока. Сдвиг фаз

Определить начальную фазу переменного тока, представленного на этом графике	$3\pi/4$	43
	$-3\pi/4$	49
	$\pi/4$	59
	$-\pi/4$	30
Определить начальную фазу в данном случае	$\pi/4$	1
	$3\pi/4$	60

Какой из токов является опережающим по фазе и на какой угол? 	i_1 на угол $\pi/4$	78
	i_2 на угол $\pi/4$	71
	i_2 на угол $3\pi/4$	10
Какой временной сдвиг отделяет моменты прохождения через максимум напряжений (частота $f=50$ Гц) $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + 15^\circ)$, $u_2 = U_{2m} \sin(\omega t - 30^\circ)$	0,143 с	24
	0,0025 с	74
В генераторе с двумя парами полюсов витки сдвинуты в пространстве на угол $\pi/4$. Определить сдвиг фаз между ЭДС в этих витках	$\pi/4$	17
	$\pi/2$	53
	$\pi/8$	83

§ 4.4. ИЗОБРАЖЕНИЕ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН С ПОМОЩЬЮ ВЕКТОРОВ

При расчете цепей переменного тока часто приходится производить операции сложения и вычитания токов и напряжений. Когда токи и напряжения заданы аналитически или временными диаграммами, эти операции оказываются весьма громоздкими. Существует метод построения векторных диаграмм, который позволяет значительно упростить действия над синусоидальными величинами. Покажем, что синусоидальная величина может быть изображена вращающимся вектором.

Пусть вектор I_m вращается с постоянной угловой частотой ω против часовой стрелки. Начальное положение вектора I_m задано углом ψ (рис. 4.7). Проекция вектора I_m на ось y определяется выражением $I_m \sin(\omega t + \psi)$, которое соответствует мгновенному значению переменного тока. Таким образом, временная диаграмма переменного тока является разверткой по времени вертикальной проекции вектора I_m , вращающегося со скоростью ω .

Изображение синусоидальных величин с помощью векторов дает возможность наглядно показать начальные фазы этих величин и сдвиг фаз между ними.

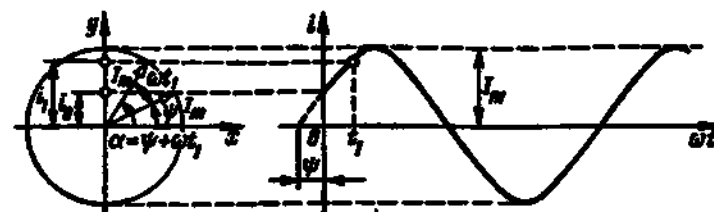


Рис. 4.7. Изображение синусоидального тока вращающимися векторами

На векторных диаграммах длины векторов соответствуют действующим значениям тока, напряжения и ЭДС, так как они пропорциональны амплитудам этих величин.

На рис. 4.8 показаны векторы E_1 и E_2 с начальными фазами ψ_1 и ψ_2 и сдвигом фаз φ .

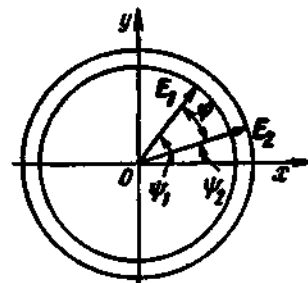


Рис. 4.8. Векторная диаграмма синусоидальных ЭДС e_1 и e_2

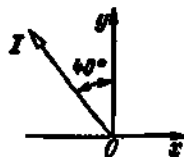
Совокупность нескольких векторов, соответствующих нулевому моменту времени, называют векторной диаграммой. Необходимо иметь в виду, что на векторной диаграмме векторы изображают токи (напряжения) одинаковой частоты.

Карточка № 4.4 (216)

Изображение синусоидальных величин с помощью векторов

Как связана частота вращения вектора, изображающего синусоидальную величину, с ее угловой скоростью ω ?	Они независимы	3
	Частота вращения вектора пропорциональна ω	57
	Частота вращения вектора равна ω	58

Будет ли временная развертка вектора, вращающегося с переменной частотой, иметь вид синусоиды?	Будет	8
	Не будет	67
Какой параметр переменного тока необходимо знать дополнительно, чтобы по векторной диаграмме получить полное представление о переменном токе?	Действующее значение	7
	Начальную фазу	62
	Частоту вращения	22
Будет ли временная развертка вектора, вращающегося с постоянной частотой, синусоидальной, если длина вектора при этом меняется?	Будет	47
	Не будет	65
	Это зависит от закона изменения длины вектора	44
Какая из приведенных формул не соответствует векторной диаграмме?	$i = I_m \sin(\omega t + 40^\circ)$	4
	$i = I_m \sin(\omega t + 130^\circ)$	76
	$i = I_m \cos(\omega t + 40^\circ)$	73



§ 4.5. СЛОЖЕНИЕ И ВЫЧИТАНИЕ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН

При сложении синусоидальных величин одинаковой частоты получают синусоидальную величину той же частоты. Операция сложения может производиться аналитически и графически — по временной и векторной диаграммам. Рассмотрим методы сложения и произведем их сравнительную оценку.

На рис. 4.9 (справа) показано сложение двух синусоид i_1 и i_2 по ординатам. Ордината результирующей кривой i для каждого момента времени равна сумме ординат слагаемых синусоид для того же момента времени. Из графика видно, что

$$i = i_1 + i_2 = I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + I_{2m} \sin(\omega t + \psi_2) = I_m \sin(\omega t + \psi).$$

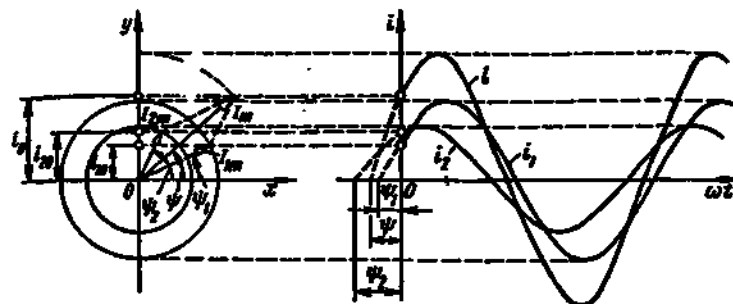


Рис. 4.9. Сложение синусоидальных величин по векторной и временной диаграммам

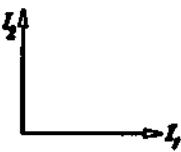
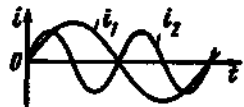
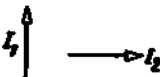
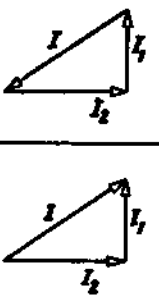
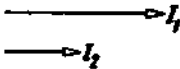
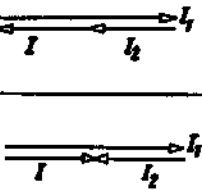
Очевидно, что эта операция громоздка и не дает возможности получить требуемую точность. Покажем, что сложение двух синусоид можно произвести с помощью векторной диаграммы. На рис. 4.9 (слева) вектор I_m представляет собой сумму векторов I_{1m} и I_{2m} . Сумма вертикальных проекций $i_{10} + i_{20}$ равна проекции i_0 для момента времени $t=0$. Это справедливо и для любого другого момента времени. Но вертикальная проекция вращающегося вектора является мгновенным значением синусоидальной величины. Следовательно, вектор I_m и является изображением суммы двух синусоидальных токов i_1 и i_2 . Из векторной диаграммы рис. 4.9 легко определить амплитуду I_m и фазу ψ тока i . Длина вектора I_m и его фаза ψ могут быть найдены аналитически по известным тригонометрическим формулам:

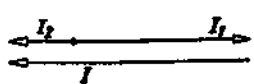
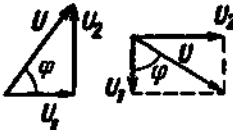
$$I_m = \sqrt{I_{1m}^2 + I_{2m}^2 + 2I_{1m}I_{2m} \cos \varphi}; \quad (4.9)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_{1m} \sin \psi_1 + I_{2m} \sin \psi_2}{I_{1m} \cos \psi_1 + I_{2m} \cos \psi_2}. \quad (4.10)$$

Использование этих формул связано с громоздкими вычислениями. Таким образом, наиболее простым и удобным методом является метод векторного сложения.

Вычитание одной синусоидальной величины из другой также сводится к операции сложения, так как $i_1 - i_2 = i_1 + (-i_2)$. Следовательно, на векторной диаграмме к вектору I_1 следует прибавить вектор $-I_2$.

Векторы I_1 и I_2 изображены в начальный момент времени, причем $i_1 = I_{1m} \sin \omega_1 t$, $i_2 = I_{2m} \sin (\omega_2 t + \pi/2)$; $\omega_1 \neq \omega_2$. Имеет ли смысл операция сложения этих векторов для начального момента времени? 	Имеет 2 Не имеет 45
Можно ли заменить сложение по ординатам токов i_1 и i_2 сложением вращающихся с разными частотами векторов I_1 и I_2? 	Можно 64 Нельзя 14
На какой диаграмме правильно определена сумма векторов $I_1 + I_2 = I$? 	32 37 
На какой диаграмме правильно найдена разность векторов $I_1 - I_2 = I$? 	54 69 

	 50
Эквивалентны ли приведенные здесь векторные диаграммы? 	Да 13 Нет 28

§ 4.6. ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ. АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

При изучении цепей переменного тока приходится сталкиваться с понятием активного и реактивного сопротивлений. Реактивными называют сопротивления, которые в среднем не потребляют энергии, а активными — сопротивления, непрерывно потребляющие энергию. Можно показать, что сопротивление проводника переменному току (активное сопротивление) больше, чем сопротивление того же проводника постоянному току. На рис. 4.10 изображен проводник с током, идущим в данный момент от нас. Пунктирными линиями показано магнитное поле, сцепленное с проводником. При изменении тока магнитное поле также изменяется, а силовые линии пересекают проводник. При этом области сечения проводника, расположенные ближе к поверхности, пересекаются меньшим числом линий в единицу времени, чем области, расположенные ближе к центру. В результате ЭДС самоиндукции оказывается больше в областях, расположенных ближе к центру. Это приводит к уменьшению плотности тока в указанных областях. Следовательно, ток, проходящий через все сечение, уменьшается, что эквивалентно увеличению сопротив-

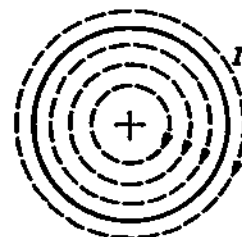


Рис. 4.10. К объяснению понятия поверхностного эффекта

ления проводника. На больших частотах неравномерность прохождения тока проявляется очень резко и плотность тока в центральных областях сечения проводника практически равна нулю, т. е. ток проходит только в поверхностном слое. Это явление называют поверхностным эффектом. Количественно поверхностный эффект характеризуется коэффициентом поверхностного эффекта ξ :

$$\xi = R/R_0, \quad (4.11)$$

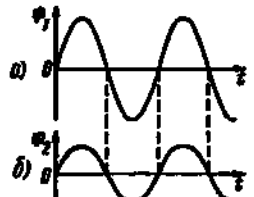
где R_0 , R — сопротивления проводника постоянному и переменному току.

Коэффициент ξ зависит от частоты переменного тока, диаметра проводника и магнитной проницаемости материала, из которого изготовлен проводник.

Продолжение

Как влияет диаметр проводника d на коэффициент поверхностного эффекта ξ ?	С увеличением d уменьшается ξ	46
	С увеличением d увеличивается ξ	72
Как влияет относительная магнитная проницаемость μ на коэффициент поверхностного эффекта ξ ?	С увеличением μ увеличивается ξ	19
	С увеличением μ уменьшается ξ	9
Известно, что сопротивление проводника $R = \rho l/S$. На какой из параметров влияет поверхностный эффект?	ρ	35
	l	15
	S	56

Карточка № 4.6 (309)
Поверхностный эффект. Активное сопротивление

Магнитный поток, сцепленный с проводником, сначала изменяется так, как показано на графике а), а затем так, как показано на графике б). В каком случае ЭДС индукции больше? 	В обоих случаях ЭДС одинаковы	41
	В случае а)	11
	В случае б)	81
На рисунке показано сечение проводника, по которому проходит переменный ток. Каково соотношение между максимумами магнитных потоков, сцепленных с областями А, Б, В? 	$\Phi_{Am} = \Phi_{Bm} = \Phi_{Vm}$	38
	$\Phi_{Am} > \Phi_{Bm} > \Phi_{Vm}$	42
	$\Phi_{Am} < \Phi_{Bm} < \Phi_{Vm}$	70

ГЛАВА 5

ОДНОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

§ 5.1. ОСОБЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

При изучении электрических цепей необходимо помнить, что электрический ток неразрывно связан с магнитным полем. Таким образом, при возникновении тока в электрической цепи и в окружающей среде имеются магнитное и электрическое поля. Кроме того, в электрической цепи происходит преобразование электромагнитной энергии в тепловую.

В реальных цепях электрическое и магнитное поля распределены вдоль всей цепи. Но такое равномерное распределение полей встречается редко, например в линиях передачи энергии. Как правило, магнитное и электрическое поля распределяются вдоль цепи неравномерно, причем на одних участках резко выражены магнитные поля (индуктивные катушки), на других — электрические (конденсаторы). Имеются также участки цепей, где происходит в основном преобразование электромагнитной энергии в тепловую (резисторы). Указанные цепи, называемые цепями с сосредоточенными параметрами, позволяют изучить свойства отдельных участков, а затем рассмотреть работу цепи в целом. Это и является задачей данной главы.

§ 5.2. ЦЕПЬ С АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

На зажимах цепи переменного тока действует напряжение $u = U_m \sin \omega t$. Так как цепь обладает только активным сопротивлением (рис. 5.1), то, согласно закону Ома для участка цепи,

$$i = u/R = U_m \sin \omega t / R = I_m \sin \omega t, \quad (5.1)$$

где $I_m = U_m/R$ представляет собой выражение закона Ома для амплитудных значений. Разделив левую и правую части этого выражения на $\sqrt{2}$, получим закон Ома для действующих значений:

$$I = U/R. \quad (5.2)$$

Сопоставляя выражения для мгновенных значений тока и напряжения, приходим к выводу, что токи и напряжения в цепи с активным сопротивлением совпадают по фазе (рис. 5.2 и 5.3).

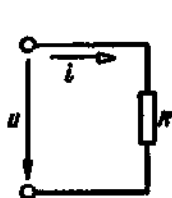


Рис. 5.1. Схема цепи переменного тока с активным сопротивлением

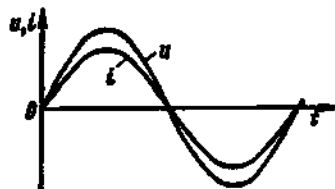


Рис. 5.2. Временные диаграммы тока и напряжения для цепи с активным сопротивлением

Мгновенная мощность. Как известно, мощность определяет скорость расхода энергии и, следовательно, для цепей переменного тока является переменной величиной. По определению, мощность

$$p = ui = U_m I_m \sin^2 \omega t.$$

Учитывая, что $\sin^2 \omega t = (1 - \cos 2\omega t)/2$ и $I_m U_m/2 = U_m I_m / \sqrt{2} \cdot \sqrt{2} = UI$, окончательно получим

$$p = UI - UI \cos 2\omega t. \quad (5.3)$$

Анализ формулы (5.3) и рис. 5.4, соответствующего этой формуле, показывает, что мгновенная мощность, оставаясь все время положительной, колеблется около уровня UI .



Рис. 5.3. Векторная диаграмма тока и напряжения для цепи с активным сопротивлением

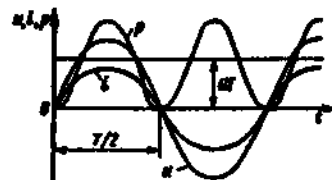


Рис. 5.4. Временные диаграммы напряжения, тока и мгновенной мощности для цепи с активным сопротивлением

Средняя мощность. Для определения расхода энергии за длительное время целесообразно пользоваться средним значением мощности. Для вывода выражения средней мощности найдем сначала расход энергии в цепи с активным сопротивлением R за время $T/2$:

$$W = \int_0^{T/2} p dt = \int_0^{T/2} (UI - UI \cos 2\omega t) dt = \int_0^{T/2} UI dt - \int_0^{T/2} UI \cos 2\omega t dt.$$

$$\text{Так как } \int_0^{T/2} UI \cos 2\omega t dt = 0, \text{ то } W = UI \frac{T}{2}.$$

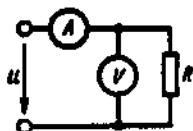
Разделив полученное выражение для W на $T/2$, получим среднюю скорость расхода энергии или среднюю (активную) мощность:

$$P = UI. \quad (5.4)$$

Единицами активной мощности являются ватт (Вт), киловатт (кВт) и мегаватт (МВт): $1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ Вт}$; $1 \text{ МВт} = 10^6 \text{ Вт}$.

Карточка № 5.1 (188)
Цепь с активным сопротивлением

В цепи с активным сопротивлением энергия источника преобразуется в энергию	магнитного поля	88
	электрического поля	135
	тепловую	9
	магнитного, электрического полей и тепловую	47
Возможно ли практически реализовать чисто активное сопротивление?	Возможно	57
	Невозможно	61
Напряжение на зажимах данной цепи $u = 100 \sin 314t$. Определить показания амперметра и вольтметра, если $R = 100 \text{ Ом}$	$I = 1 \text{ А}; U = 100 \text{ В}$	15
	$I = 0,7 \text{ А}; U = 70 \text{ В}$	52
	$I = 0,7 \text{ А}; U = 100 \text{ В}$	1
Напряжение на зажимах цепи с активным сопротивлением изменяется по закону $u = 220 \sin(314t + \pi/4)$. Определить закон изменения тока в цепи, если $R = 50 \text{ Ом}$	$i = 4,4 \sin 314t$	32
	$i = 4,4 \sin(314t + \pi/4)$	12
	$i = 3,1 \sin(314t + \pi/4)$	115
При каком соотношении между i и T (период переменного тока) нельзя воспользоваться формулой $W = Ri$ для определения расхода энергии за время?	$i \gg T$	21
	$i = kT$ (k — целое положительное число)	73
	$i < T$	54



§ 5.3. ЦЕПЬ С ИНДУКТИВНОСТЬЮ

Под действием синусоидального напряжения в цепи с индуктивной катушкой без ферромагнитного сердечника (рис. 5.5) проходит синусоидальный ток $i = I_m \sin \omega t$. В результате этого вокруг катушки возникает переменное магнитное поле и в катушке и наводится ЭДС самоиндукции. При $R = 0$ напряжение источника целиком идет на уравнивание этой ЭДС; следовательно, $u = -e_L$. Так как $e_L = -L \frac{di}{dt}$, то

$$u = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = I_m \omega L \cos \omega t, \quad (5.5)$$

или

$$u = U_m \sin(\omega t + \pi/2),$$

где

$$U_m = I_m \omega L. \quad (5.6)$$

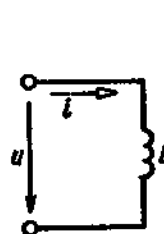


Рис. 5.5. Схема цепи переменного тока с индуктивностью

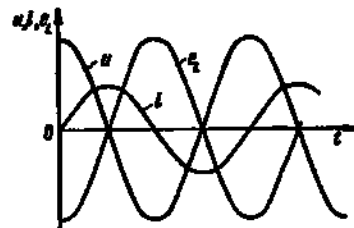


Рис. 5.6. Временные диаграммы напряжения, тока и ЭДС для цепи с индуктивностью

Сопоставляя выражения для мгновенных значения тока и напряжения, приходим к выводу, что ток в цепи с индуктивностью отстает по фазе от напряжения на угол $\pi/2$. Физически это объясняется тем, что индуктивная катушка реализует инерцию электромагнитных процессов. Индуктивность катушки L является количественной мерой этой инерции. Фазовые соотношения между током, напряжением и ЭДС для цепи с индуктивностью показаны на рис. 5.6 и 5.7.

Выведем закон Ома для этой цепи. Из выражения (5.6) следует, что $I_m = U_m/(\omega L)$. Пусть $\omega L = 2\pi fL = X_L$, где X_L — индуктивное сопротивление цепи. Тогда получим выражение

$$I_m = U_m/X_L, \quad (5.7)$$

которое является законом Ома для амплитудных значений. Разделив левую и правую части этого выражения на $\sqrt{2}$, получим закон Ома для действующих значений:

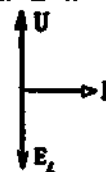


Рис. 5.7. Векторная диаграмма напряжения, тока и ЭДС для цепи с индуктивностью

$$I = U/X_L. \quad (5.8)$$

Проанализируем выражение для $X_L = 2\pi fL$. С увеличением частоты тока f индуктивное сопротивление X_L увеличивается (рис. 5.8). Физически это объясняется тем, что возрастает скорость изменения тока, а следовательно, и ЭДС самоиндукции.

Рассмотрим энергетические характеристики цепи с индуктивностью.

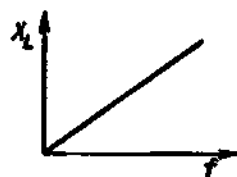


Рис. 5.8. Зависимость индуктивного сопротивления X_L от частоты f

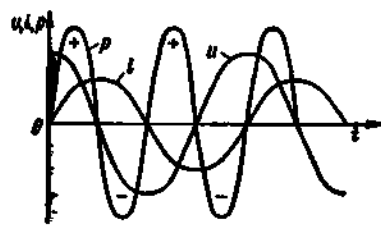


Рис. 5.9. Временные диаграммы напряжения, тока и мгновенной мощности для цепи с индуктивностью

Мгновенная мощность. Как и для цепи с R , мгновенное значение мощности определяется произведением мгновенных значений напряжения и тока: $p = ui = U_m I_m \sin(\omega t + \pi/2) \sin \omega t = U_m I_m \cos \omega t \sin \omega t$.

Так как $\sin \omega t \cos \omega t = \sin 2\omega t/2$ и $U_m I_m/2 = UI$, то окончательно имеем

$$p = UI \sin 2\omega t. \quad (5.9)$$

Из графика рис. 5.9 видно, что при одинаковых знаках напряжения и тока мгновенная мощность положительна, а при разных знаках — отрицательна. Физически это означает, что в первую четверть периода переменного тока энергия источника преобразуется в энергию магнитного поля катушки. Во вторую четверть периода, когда ток убывает, катушка возвращает накопленную энергию источнику. В следующую четверть периода процесс передачи энергии источником повторяется и т. д.

Таким образом, в среднем катушка не потребляет энергии и, следовательно, активная мощность $P = 0$.

Реактивная мощность. Для количественной характеристики интенсивности обмена энергией между ис-

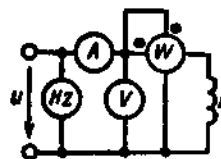
точником и катушкой служит реактивная мощность:

$$Q = UI. \quad (5.10)$$

Единицей реактивной мощности является вольт-ампер реактивный (ВАр).

Карточка № 5.2 (189)
Цепь с индуктивностью

ЭДС индукции в катушке достигает максимума, когда ток проходит через	максимум	50
	нулевое значение	6
Ток в цепи с L изменяется по закону $i = I_m \sin(\omega t - \pi/2)$. Как изменится напряжение и ЭДС самоиндукции в цепи?	$u = U_m \sin \omega t$; $e_L = E_m \sin(\omega t - \pi)$	2
	$u = U_m \sin(\omega t - \pi/2)$; $e_L = E_m \sin(\omega t + \pi/2)$	16
	$u = U_m \sin(\omega t + \pi/2)$; $e_L = E_m \sin(\omega t - \pi/2)$	7
Укажите параметр переменного тока, от которого зависит индуктивное сопротивление катушки	Действующее значение напряжения U	3
	Фаза напряжения φ	137
	Период переменного тока T	98
Оказывает ли индуктивная катушка сопротивление постоянному току, если $R_k = 0$?	Оказывает	123
	Не оказывает	42
К источнику переменного тока подключена катушка с $R = 0$. В схему кроме амперметра и вольтметра включены частотомер H_z и ваттметр W , измеряющий среднее значение мощности. Показания каких приборов дают возможность рассчитать индуктивность L катушки?	Амперметра и вольтметра	125
	Амперметра, вольтметра и ваттметра	82
	Амперметра, вольтметра и частотомера	41



§ 5.4. ЦЕПЬ С АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ И ИНДУКТИВНОСТЬЮ

Цепь (рис. 5.10) состоит из участков, свойства которых известны. Проанализируем работу данной цепи. Пусть ток в цепи изменяется по закону $i = I_m \sin \omega t$. Тогда напряжение на активном сопротивлении $u_R = U_{Rm} \sin \omega t$, так как на этом участке напряжение и ток совпадают по фазе. Напряжение на катушке $u_L = U_{Lm} \sin(\omega t + \pi/2)$, поскольку на индуктивности напряжение опережает по фазе ток на угол $\pi/2$. Построим векторную диаграмму для рассматриваемой цепи (рис. 5.11). Сначала откладываем вектор тока I ,

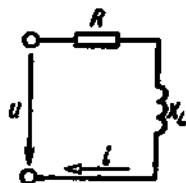


Рис. 5.10. Схема цепи переменного тока с R и L

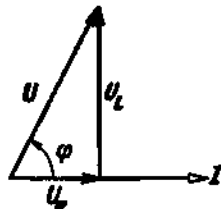


Рис. 5.11. Векторная диаграмма для цепи с R и L

затем вектор напряжения U_R , совпадающий по фазе с вектором тока. Начало вектора U_L , опережающего вектор тока на угол $\pi/2$, соединим с концом вектора U_R для удобства их сложения. Суммарное напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ изображается вектором U , сдвинутым по фазе относительно вектора тока на угол φ . Векторы U_R , U_L и U образуют треугольник напряжений. Выведем закон Ома для этой цепи. На основании теоремы Пифагора для треугольника напряжений имеем $U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$. Но $U_R = IR$, а $U_L = IX_L$; следовательно, $U = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 X_L^2} = I \sqrt{R^2 + X_L^2}$, откуда

$$I = U / \sqrt{R^2 + X_L^2}. \quad (5.11)$$

Введем обозначение $\sqrt{R^2 + X_L^2} = Z$, где Z — полное сопротивление цепи. Тогда выражение закона Ома примет вид

$$I = U / Z. \quad (5.12)$$

Так как полное сопротивление цепи Z определяется по теореме Пифагора, ему соответствует треугольник сопротивлений (рис. 5.12). Поскольку при последовательном соединении напряжения на участках прямо пропорциональны сопротивлениям, треугольник сопротивлений подобен треугольнику напряжений. Сдвиг фаз φ между током и напряжением определяется из треугольника сопротивлений:

$$\operatorname{tg} \varphi = X_L / R; \quad (5.13)$$

$$\cos \varphi = R / Z. \quad (5.14)$$

Для последовательной цепи условимся отсчитывать угол φ от вектора тока I . Поскольку вектор U сдвинут по фазе относительно вектора I на угол φ против часовой стрелки, этот угол имеет положительное значение. В дальнейшем покажем, что знак угла φ определяется по формальному признаку.

Выведем энергетические соотношения для цепи с активным сопротивлением и индуктивностью.

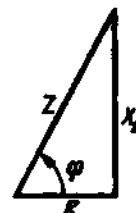


Рис. 5.12. Треугольник сопротивлений для цепи с R и L

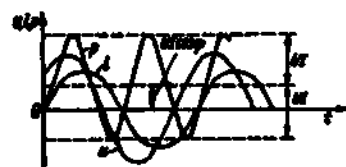


Рис. 5.13. Временные диаграммы напряжения, тока и мгновенной мощности для цепи с R и L

Мгновенная мощность. Мгновенная мощность выражается соотношениями

$$\begin{aligned} p &= ui = U_m I_m \sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t = U_m I_m (\sin \omega t \cos \varphi + \\ &+ \cos \omega t \sin \varphi) \sin \omega t = U_m I_m (\sin^2 \omega t \cos \varphi + \\ &+ \sin \omega t \cos \omega t \sin \varphi) = U_m I_m \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \cos \varphi + \right. \\ &\left. + \frac{\sin 2\omega t}{2} \sin \varphi \right) = \frac{U_m I_m}{2} [\cos \varphi - (\cos 2\omega t \cos \varphi - \\ &- \sin 2\omega t \sin \varphi)] \end{aligned}$$

или

$$p = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi). \quad (5.15)$$

Анализ выражения (5.15) и рис. 5.13, построенного на его основе, показывает, что мгновенное значение мощности колеблется около постоянного уровня $UI \cos \varphi$, который характеризует среднюю мощность. Отрицательная часть графика определяет энергию, которая переходит от источника к индуктивной катушке и обратно.

Средняя мощность. Средняя, или активная, мощность для данной цепи характеризует расход энергии на активном сопротивлении n , следовательно, $P = U_R I$. Из векторной диаграммы (см. рис. 5.11) видно, что $U_R = U \cos \varphi$. Тогда

$$P = UI \cos \varphi. \quad (5.16)$$

Реактивная мощность. Реактивная мощность характеризует интенсивность обмена энергией между индуктивной катушкой и источником:

$$Q = U_L I = UI \sin \varphi. \quad (5.17)$$

Полная мощность. Понятие полной мощности применяют для оценки предельной мощности электрических машин:

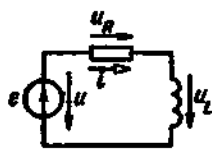
$$S = UI. \quad (5.18)$$

Так как $\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1$, то

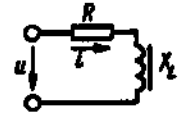
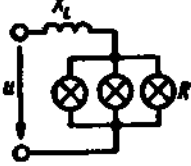
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (5.19)$$

Единицей полной мощности является вольт-ампер (В·А).

Карточка № 5.3 (201)
Цепь с активным сопротивлением и индуктивностью

Какое уравнение, характеризующее работу данной цепи, составлено неверно? 	$u = u_R + u_L$	49
	$U = U_R + U_L$	132
	$U = U_R + U_L$	126
Как изменится сдвиг фаз φ между напряжением и током, если R и X_L цепи увеличатся в 2 раза?	Уменьшится в 2 раза	8
	Останется неизменным	103
	Увеличится в 2 раза	33

Продолжение

Напряжение на зажимах цепи с R и L $U = 141$ В. Определить U_R и U_L при нулевой частоте источника	$U_R = 70,5$ В; $U_L = 70,5$ В	86
	$U_R = 100$ В; $U_L = 100$ В	45
	$U_R = 141$ В; $U_L = 0$	150
	$U_R = 0$; $U_L = 141$ В	51
Как изменятся напряжения на участках цепи, если в катушку ввести ферромагнитный сердечник при условии, что $U = \text{const}$? 	Напряжения не изменятся	80
	Напряжение U_L увеличится, напряжение U_R уменьшится	46
	Напряжение U_L уменьшится, напряжение U_R увеличится	22
Как изменятся напряжения на участках цепи при включении одной из ламп? 	Напряжения не изменятся	83
	Напряжение U_R уменьшится, напряжение U_L увеличится	35
	Напряжение U_R увеличится, напряжение U_L уменьшится	70

§ 5.5. ЦЕПЬ С ЕМКОСТЬЮ

Проанализируем процессы в цепи, представленной на рис. 5.14.

Зададимся напряжением на зажимах источника $u = U_m \sin \omega t$, тогда ток в цепи также будет меняться по синусоидальному закону. Ток определяют по формуле $i = dQ/dt$. Количество электричества Q на обкладках конденсатора связано с напряжением на емкости и его емкостью: $Q = Cu$. Следовательно,

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{du}{dt} = C \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = U_m \omega C \cos \omega t = U_m \omega C \sin (\omega t + \pi/2). \quad (5.20)$$

Таким образом, ток в цепи с емкостью опережает по фазе напряжение на угол $\pi/2$ (рис. 5.15 и 5.16).

Физически это объясняется тем, что напряжение на емкости возникает за счет разделения зарядов на его обкладках в результате прохождения тока. Следовательно, напряжение появляется только после

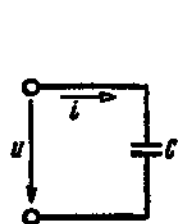


Рис. 5.14. Схема цепи переменного тока с емкостью

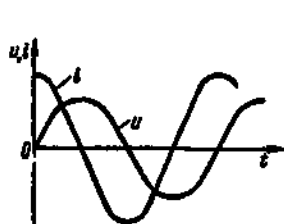


Рис. 5.15. Временные диаграммы напряжения и тока для цепи с емкостью



Рис. 5.16. Векторная диаграмма напряжения и тока для цепи с емкостью

возникновения тока (сравните процесс появления напряжения на емкости с процессом увеличения уровня жидкости при заполнении бака). Выведем закон Ома для цепи с емкостью. Из выражения (5.20) следует, что $I_m = U_m \omega C$, или

$$I_m = \frac{U_m}{1/(\omega C)}. \quad (5.21)$$

Введем обозначение:

$$1/(\omega C) = 1/(2\pi f C) = X_C, \quad (5.21a)$$

где X_C — емкостное сопротивление цепи.

Тогда выражение закона Ома можно представить в следующем виде:

для амплитудных значений

$$I_m = U_m / X_C; \quad (5.22)$$

для действующих значений

$$I = U / X_C. \quad (5.22a)$$

Из формулы (5.21a) и рис. 5.17 следует, что емкостное сопротивление X_C уменьшается с ростом частоты f . Это объясняется тем, что при большей частоте

те через поперечное сечение диэлектрика в единицу времени протекает большее количество электричества при том же напряжении, что эквивалентно уменьшению сопротивления цепи.

Рассмотрим энергетические характеристики в цепи с емкостью.

Мгновенная мощность. Пусть начальная фаза тока в цепи равна нулю, тогда $i = I_m \sin \omega t$. Так как напряжение на емкости отстает от тока на угол $\pi/2$, то $u = U_m \sin (\omega t - \pi/2)$ или $u = -U_m \cos \omega t$. Выражение для мгновенной мощности примет вид

$$p = ui = -U_m I_m \sin \omega t \cos \omega t = -UI \sin 2\omega t. \quad (5.23)$$

Анализ формулы (5.23) и рис. 5.18 показывает, что в цепи с емкостью, так же как и в цепи с индуктивностью, происходит переход энергии от источника к нагрузке, и наоборот. В данном случае энергия источника преобразуется в энергию электрического поля конденсатора. Из сравнения выражений (5.23) и (5.9) и соответствующих им графиков (рис. 5.18 и 5.9) следует, что если бы индуктивная катушка и конденсатор были включены последовательно, то между ними происходил обмен энергией. Средняя мощность в цепи с емкостью также равна нулю: $P = 0$.



Рис. 5.17. Зависимость емкостного сопротивления X_C от частоты f

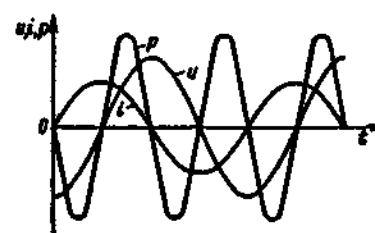
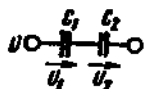


Рис. 5.18. Временные диаграммы напряжения, тока и мгновенной мощности для цепи с емкостью

Реактивная мощность. Для количественной характеристики интенсивности обмена энергией между источником и конденсатором служит реактивная мощность $Q = UI$.

Карточка № 5.4 (323)
Цепь с емкостью

Какова природа тока, проходящего через диэлектрик конденсатора?	Электронный ток проводимости	5
	Ток смещения	91
	Ионный ток проводимости	85
Каким будет мгновенное значение напряжения на конденсаторе при максимальном значении тока?	Максимальным	145
	Равным нулю	78
	Напряжение u_c зависит от X_c	59
Чему равно сопротивление конденсатора без потерь постоянному току?	0	151
	∞	63
	Это зависит от емкости конденсатора	10
Какая из приведенных схем обладает минимальным сопротивлением переменному току?	Схема а)	110
	Схема б)	18
	Схема в)	154
Каково соотношение между U_1 и U_2 , если $C_1 > C_2$?	$U_1 > U_2$	130
	$U_1 < U_2$	37
	$U_1 = U_2$	136



§ 5.6. ЦЕПЬ С АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ И ЕМКОСТЬЮ

Методика изучения цепи с R и C (рис. 5.19) аналогична методике изучения цепи с R и L . Задаемся током $i = I_m \sin \omega t$. Тогда напряжение на активном сопротивлении $u_R = U_{Rm} \sin \omega t$. Напряжение на емкости отстает по фазе от тока на угол $\pi/2$: $u = U_{cm} \sin(\omega t - \pi/2)$. На основании приведенных выражений построим векторную диаграмму для этой цепи (рис. 5.20).

Из векторной диаграммы следует, что $U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$. Но $U_R = IR$, а $U_C = IX_C$. Таким образом,

$$U = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 X_C^2} = I \sqrt{R^2 + X_C^2},$$

откуда

$$I = U / \sqrt{R^2 + X_C^2} \quad (5.24)$$

[сравните выражение (5.24) с (5.11)]. Введя обозначение $\sqrt{R^2 + X_C^2} = Z$, выражение (5.24) можно записать в виде $I = U/Z$.

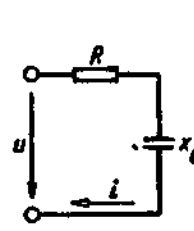


Рис. 5.19. Схема цепи переменного тока с R и C

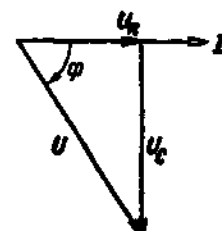


Рис. 5.20. Векторная диаграмма тока и напряжения для цепи с R и C

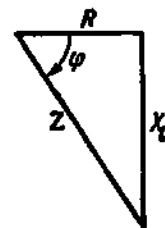


Рис. 5.21. Треугольник сопротивлений для цепи с R и C

Треугольник сопротивлений для рассматриваемой цепи показан на рис. 5.21. Расположение его сторон соответствует расположению сторон треугольника напряжений на векторной диаграмме рис. 5.20. Сдвиг фаз φ в этом случае отрицателен, так как напряжение отстает по фазе от тока:

$$\operatorname{tg} \varphi = -X_C/R, \quad (5.25)$$

$$\cos \varphi = R/Z. \quad (5.25a)$$

В энергетическом отношении цепь с R и C формально не отличается от цепи с R и L . Покажем это.

Мгновенная мощность. Так как фаза тока принята нулевой, то $i = I_m \sin \omega t$, напряжение отстает по фазе от тока на угол $|\varphi|$ и, следовательно, $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$. Тогда $p = ui = U_m I_m \sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t$.

Опустив промежуточные преобразования, получим

$$p = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi). \quad (5.26)$$

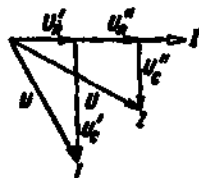
Средняя мощность. Средняя мощность определяется постоянной составляющей мгновенной мощности: $P = UI \cos \varphi$.

Реактивная мощность. Реактивная мощность характеризует интенсивность обмена энергией между источником и емкостью: $Q = UI \sin \varphi$.

Так как $\varphi < 0$, то реактивная мощность $Q < 0$. Физически это означает, что когда емкость отдает энергию, то индуктивность ее потребляет, если они находятся в одной цепи.

Карточка № 5.5 (238)
Цепь с активным сопротивлением и емкостью

При частоте источника $f_1 = 50$ Гц $R = X_C$. Затем частота источника изменилась: $f_2 = 100$ Гц. Как изменится сдвиг фаз φ между током и напряжением?	Увеличится в 2 раза	147
	Уменьшится в 2 раза	96
	Окажется равным 64°	101
	Окажется равным 26°	90
Цепь с последовательно соединенными R и C подключают к источнику постоянного напряжения 100 В. Как распределится напряжение на участках цепи?	$U_R = 50$ В; $U_C = 50$ В	79
	$U_R = 100$ В; $U_C = 0$	142
	$U_R = 0$; $U_C = 100$ В	
Как изменится напряжение на участках RC -цепи, если воздушный конденсатор поместить в масло?	Напряжение U_R увеличится, напряжение U_C уменьшится	17
	Напряжение U_R уменьшится, напряжение U_C увеличится	60
	Напряжения не изменятся	118
По какой причине векторная диаграмма RC -цепи переходит из состояния I в состояние 2?	Уменьшается R	109
	Уменьшается f	34
	Уменьшается C	114
	Увеличивается f	72



Укажите формулу, расчет по которой дает возможность отличить RC -цепь от RL -цепи	$Z_{RL} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$; $Z_{RC} = \sqrt{R^2 + X_C^2}$	81
	$P = UI \cos \varphi$	67
	$Q = UI \sin \varphi$	140

§ 5.7. ЦЕПЬ С АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ, ИНДУКТИВНОСТЬЮ И ЕМКОСТЬЮ

Цепь с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью представляет собой общий случай последовательного соединения активных и реактивных сопротивлений и является последовательным колебательным контуром (рис. 5.22).

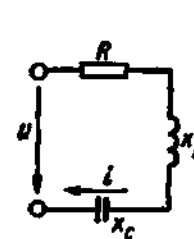


Рис. 5.22. Схема цепи переменного тока с R , L и C

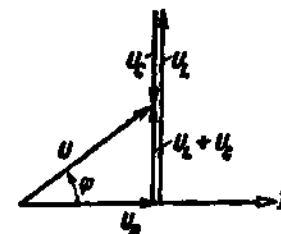


Рис. 5.23. Векторная диаграмма для цепи с R , L и C

Принимаем фазу тока нулевой: $i = I_m \sin \omega t$.

Тогда напряжение на активном сопротивлении $u_R = U_{Rm} \sin \omega t$, напряжение на индуктивности $u_L = U_{Lm} \sin (\omega t + \pi/2)$, напряжение на емкости $u_C = U_{Cm} \sin (\omega t - \pi/2)$. Построим векторную диаграмму при условии $X_L > X_C$, т. е. $U_L = IX_L > U_C = IX_C$.

Вектор результирующего напряжения U замыкает многоугольник векторов U_R , U_L и U_C (рис. 5.23). Вектор $U_L + U_C$ определяет напряжение на индуктивности и емкости. Как видно из диаграммы, это напряжение может быть меньше напряжения на каждом из участков в отдельности. Это объясняется процессом обмена энергией между индуктивностью и емкостью.

костью. Выведем закон Ома для рассматриваемой цепи. Так как модуль вектора $U_L + U_C$ рассчитывают как разность действующих значений $U_L - U_C$, то из диаграммы рис. 5.23 следует, что $U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$. Но $U_R = IR$; $U_L = IX_L$, $U_C = IX_C$; следовательно, $U = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$, откуда

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}. \quad (5.27)$$

Введя обозначение $\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = Z$, где Z — полное сопротивление цепи, найдем

$$I = U/Z. \quad (5.28)$$

Разность между индуктивным и емкостным сопротивлениями $X_L - X_C = X$ называют реактивным сопротивлением цепи. Учитывая это, получим треугольник сопротивлений для цепи с R , L и C (рис. 5.24). При $X_L > X_C$ реактивное сопротивление положительно и сопротивление цепи носит активно-индуктивный характер. При

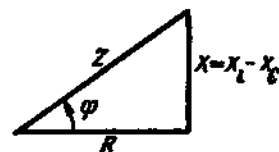


Рис. 5.24. Треугольник сопротивлений для цепи с R , L и C

$X_L < X_C$ реактивное сопротивление отрицательно и сопротивление цепи носит активно-емкостный характер. Знак сдвига фаз между током и напряжением получим автоматически, так как реактивное сопротивление — величина алгебраическая:

$$\operatorname{tg} \varphi = X/R. \quad (5.29)$$

Таким образом, при $X_L \neq X_C$ преобладает или индуктивное, или емкостное сопротивление, т. е. с энергетической точки зрения цепь с R , L и C сводится к цепи с R , L или с R , C . Тогда мгновенная мощность

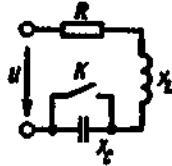
$$p = UI \cos \varphi - UI \cos (2\omega t + \varphi),$$

причем знак φ определяется по формуле (5.29). Соответственно активная, реактивная и полная мощности характеризуются выражениями $P = UI \cos \varphi$; $Q = UI \sin \varphi$; $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI$.

Карточка № 5.8 (356)
Цепь с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью

Назовите цепь, которой не соответствует эта диаграмма	Цепь с R , L и C ($X_L > X_C$)	133
	Цепь с R , L и C ($X_L < X_C$)	26
	Цепь R и L	112
При каком соотношении между X_L и X_C показание ваттметра будет максимальным?	$X_L > X_C$	58
	$X_L < X_C$	71
	$X_L = X_C$	75
В схемах а) и б) $U = 100$ В; $R_1 = R_2 = 3$ Ом; $X_{L1} = 10$ Ом; $X_{C1} = 6$ Ом; $X_{L2} = 100$ Ом; $X_{C2} = 96$ Ом. Что можно сказать о соотношении между точками в этих схемах?	$I_1 > I_2$	13
	$I_1 < I_2$	100
	$I_1 = I_2$	87
Каково соотношение между показаниями вольтметра, включенного между точками А и В в приведенных выше схемах?	$U_{ABa} > U_{ABб}$	117
	$U_{ABa} = U_{ABб}$	76
	$U_{ABa} < U_{ABб}$	65

В приведенной схеме $U = 100$ В;
 $R = 4$ Ом; $X_L = 3$ Ом; $X_C = 6$ Ом.
 Как изменится активная и реак-
 тивная мощности при замыка-
 нии ключа K ?



Активная мощность увели- чится, реактивная уменьшит- ся	144
Активная мощность умень- шится, реактивная увеличит- ся	84
Активная и реактивная мощ- ности не изменятся	92

§ 5.8. РЕЗОНАНСНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЦЕПИ

Пусть электрическая цепь содержит одну или не-
 сколько индуктивностей и емкостей (рис. 5.25). Под
 резонансным режимом работы цепи понимают
 режим, при котором сопротивление является чисто

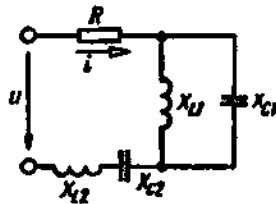


Рис. 5.25. Резонансный
режим работы цепи

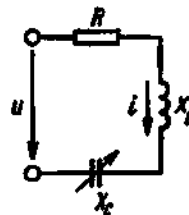


Рис. 5.26. Схе-
ма последова-
тельного коле-
бательного кон-
тура

активным. По отношению к источнику питания эле-
 менты цепи ведут себя в резонансном режиме как ак-
 тивное сопротивление, поэтому ток и напряжение в
 неразветвленной части совпадают по фазе. Реактивная
 мощность цепи при этом равна нулю.

Различают два основных режима: резонанс напря-
 жений и резонанс токов.

§ 5.9. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

Резонансом напряжений называют явление
 в цепи с последовательным контуром, когда ток в

цепи совпадает по фазе с напряжением источника.

На рис. 5.26 показана схема последовательного
 колебательного контура.

Найдем условие резонанса напряжений. Для того
 чтобы ток цепи совпадал по фазе с напряжением,
 реактивное сопротивление должно быть равно нулю,
 так как $\operatorname{tg} \varphi = X/R$.

Таким образом, условием резонанса напряжений
 является $X=0$ или $X_L=X_C$. Но $X_L=2\pi fL$, а $X_C=$
 $=1/(2\pi fC)$, где f — частота источника питания. В ре-
 зультате можно записать

$$2\pi fL = 1/(2\pi fC).$$

Решив это уравнение относительно f , получим

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_0. \quad (5.30)$$

При резонансе напряжений частота источника
 равна собственной частоте колебаний контура.

Выражение (5.30) является формулой Томсона,
 определяющей зависимость собственной частоты ко-
 лебаний контура f_0 от параметров L и C . Следует
 вспомнить, что если конденсатор контура зарядить
 от источника постоянного тока, а затем замкнуть его
 на индуктивную катушку, то в контуре возникнет
 переменный ток частоты f_0 . Вследствие потерь коле-
 бания в контуре будут затухать, причем время затуха-
 ния зависит от значения возникших потерь.

Резонансу напряжений соответствует векторная
 диаграмма, приведенная на рис. 5.27.

На основании этой диаграммы и закона Ома для
 цепи с R , L и C сформулируем признаки резонанса
 напряжений:

а) сопротивление цепи $Z=R$ минимальное и чисто
 активное;

б) ток цепи совпадает по фазе с напряжением
 источника и достигает максимального значения;

в) напряжение на индуктивной катушке равно
 напряжению на конденсаторе и каждое в отдельности
 может во много раз превышать напряжение на зажи-
 мах цепи.

Физически это объясняется тем, что напряжение
 источника при резонансе идет только на покрытие по-
 терь в контуре. Напряжение на катушке и конденса-
 торе обусловлено накопленной в них энергией, значе-

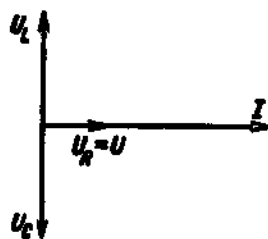


Рис. 5.27. Векторная диаграмма при резонансе напряжений

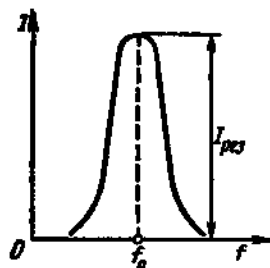


Рис. 5.28. Резонансная кривая последовательного контура

ние которой тем больше, чем меньше потери в цепи. Количественно указанное явление характеризуется добротностью контура Q , которая представляет собой отношение напряжения на катушке или конденсаторе к напряжению на зажимах цепи при резонансе:

$$Q = U_L / U = U_L / U_R = IX_L / (IR) = X_L / R = X_C / R. \quad (5.31)$$

При резонансе $X_L = 2\pi fL = 2\pi \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} L = \sqrt{LC}$. Ве-

личину $\sqrt{L/C} = Z$, называют волновым сопротивлением контура. Таким образом,

$$Q = Z / R. \quad (5.32)$$

Способность колебательного контура выделять токи резонансных частот и ослаблять токи других частот характеризуется резонансной кривой (рис. 5.28).

Резонансная кривая показывает зависимость действующего значения тока в контуре от частоты источника при неизменной собственной частоте контура.

Эта зависимость определяется законом Ома для цепи с R , L и C . Действительно, $I = U/Z$, где

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + [(2\pi fL - 1)/(2\pi fC)]^2}. \quad (5.33)$$

На рис. 5.29 показана зависимость реактивного сопротивления $X = X_L - X_C$ от частоты источника f . Анализ этого графика и выражения (5.33) показы-

вает, что при низких и высоких частотах реактивное сопротивление велико и ток в контуре мал. При частотах, близких к f_0 , реактивное сопротивление мало и ток контура велик. При этом чем больше добротность контура Q , тем острее резонансная кривая контура.

Резонанс напряжений широко используется в радиотехнике и электронике для выделения сигналов заданной частоты.

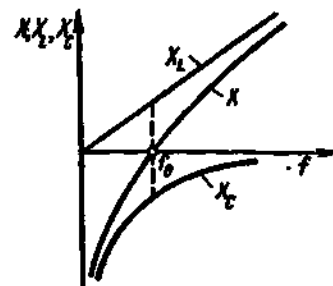
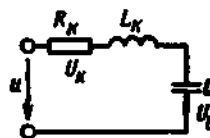
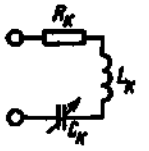


Рис. 5.29. Зависимость реактивного сопротивления X от частоты источника

Карточка № 5.7 (221)
Резонанс напряжений

Как изменится резонансная частота колебательного контура, если емкость увеличится в 4 раза?	Увеличится в 4 раза	40
	Уменьшится в 4 раза	20
	Уменьшится в 2 раза	146
	Увеличится в 2 раза	106
Как влияет реактивное сопротивление на ток в режиме резонанса?	Сильно	122
	Слабо	141
	Совсем не влияет	138
Контур состоит из катушки L , R_k и конденсатора C , причем активное сопротивление катушки $R_k \neq 0$. Каково соотношение между напряжениями на катушке и конденсаторе в режиме резонанса?	$U_k = U_C$	28
	$U_k > U_C$	36
	$U_k < U_C$	153



Каким должно быть сопротивление вольметра, чтобы он, будучи подключенным к катушке или конденсатору, не влиял на ток в контуре в режиме резонанса? 	$R_V > R_K$	38
	$R_V < R_K$	53
	$R_V = \infty$	27
Какие приборы дают возможность точно зафиксировать режим резонанса?	Вольтметр	24
	Амперметр	74
	Вольтметр и амперметр	120

§ 5.10. РАЗВЕТВЛЕННАЯ ЦЕПЬ. МЕТОД ПРОВОДИМОСТЕЙ

Рассмотрим расчет разветвленной цепи (рис. 5.30). Токи I_1 и I_2 определяют аналитически, а ток I — с помощью векторной диаграммы. Метод векторных диаграмм, как всякий графический метод, не дает возможности получить высокую точность. Введем метод проводимостей, который позволяет определять все токи в разветвленных цепях аналитически. Построим для этой цепи векторную диаграмму (рис. 5.31). Так как ветви включены параллельно, общим для рассматриваемой цепи является напряжение U . Поэтому сначала строим вектор напряжения U , а затем векторы токов I_1 и I_2 . Разложим эти токи на активные

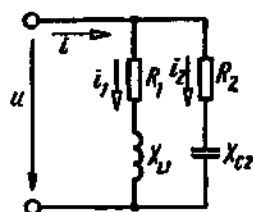


Рис. 5.30. Схема разветвленной цепи

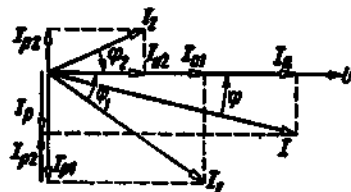


Рис. 5.31. Векторная диаграмма для цепи рис. 5.30

и реактивные составляющие I_{a1} , I_{a2} , I_{p1} и I_{p2} и выразим их через известное напряжение U и параметры ветвей:

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \frac{R_1}{Z_1} = U \frac{R_1}{Z_1^2};$$

$$I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2 = \frac{U}{Z_2} \frac{R_2}{Z_2} = U \frac{R_2}{Z_2^2};$$

$$I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \frac{X_1}{Z_1} = U \frac{X_1}{Z_1^2};$$

$$I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2 = \frac{U}{Z_2} \frac{X_2}{Z_2} = U \frac{X_2}{Z_2^2}.$$

Введем следующие обозначения:

$$R_1/Z_1^2 = g_1 \quad (5.34)$$

— активная проводимость первой ветви;

$$R_2/Z_2^2 = g_2 \quad (5.35)$$

— активная проводимость второй ветви;

$$X_1/Z_1^2 = b_1 \quad (5.36)$$

— реактивная проводимость первой ветви;

$$X_2/Z_2^2 = b_2 \quad (5.37)$$

— реактивная проводимость второй ветви.

Тогда $I_{a1} = Ug_1$; $I_{a2} = Ug_2$; $I_{p1} = Ub_1$; $I_{p2} = Ub_2$.

Необходимо отметить, что знак реактивных проводимостей получается автоматически, так как $X_1 = X_{L1} - X_{C1}$; $X_2 = X_{L2} - X_{C2}$.

В нашем случае $X_{C1} = 0$, $X_{L2} = 0$ и, следовательно, $b_1 > 0$, а $b_2 < 0$. Из векторной диаграммы находим общий ток:

$$I = \sqrt{(I_{a1} + I_{a2})^2 + (I_{p1} - I_{p2})^2} = U \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_1 + b_2)^2}, \quad (5.38)$$

где

$$\sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_1 + b_2)^2} = Y \quad (5.39)$$

— полная проводимость цепи.

Отсюда $I = UY = U/Z$ ($Z = 1/Y$ — полное сопротивление цепи).

Токи I_1 и I_2 могут быть выражены аналогично:

$$I_1 = U \sqrt{g_1^2 + b_1^2} = U Y_1; \quad I_2 = U \sqrt{g_2^2 + b_2^2} = U Y_2,$$

где

$$Y_1 = \sqrt{g_1^2 + b_1^2} \quad (5.40)$$

— полная проводимость первой ветви;

$$Y_2 = \sqrt{g_2^2 + b_2^2} \quad (5.41)$$

— полная проводимость второй ветви.

Выражениям (5.39) — (5.41) соответствуют треугольники проводимостей, представленные на рис. 5.32.

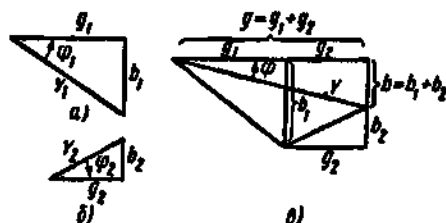


Рис. 5.32. Треугольники проводимостей: а — для ветви с R_1 и X_{L1} ; б — для ветви с R_2 и X_{L2} ; в — для всей цепи

Функции угла φ определяют так:

$$\operatorname{tg} \varphi = b/g; \quad (5.42)$$

$$\cos \varphi = g/Y. \quad (5.43)$$

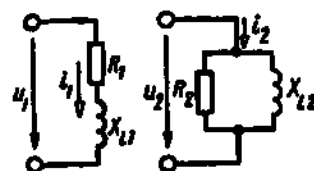
Выражения для мощностей принимают такой вид:
активная мощность

$$P = UI_a = Ug^2; \quad (5.44)$$

реактивная мощность

$$Q = UI_p = Ub. \quad (5.45)$$

При каком условии цепи будут эквивалентны, т. е. когда $I_1 = I_2$ при $U_1 = U_2$?



$$R_1 = R_2; \quad X_{L1} = X_{L2}$$

66

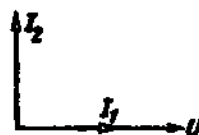
$$R_2 = (R_1^2 + X_{L1}^2) / R_1; \quad X_{L2} = -(R_1^2 + X_{L1}^2) / X_{L1}$$

148

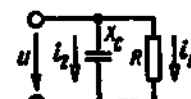
$$\sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2} = \sqrt{R_2^2 + X_{L2}^2}$$

104

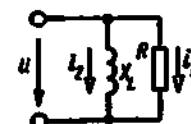
Какой цепи соответствует данная векторная диаграмма?



97

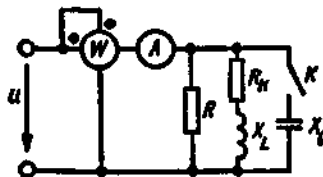


105



119

Как изменятся показания ваттметра и амперметра при размыкании ключа K , если $X_C \approx X_L$?



Показания обоих приборов увеличатся

107

Показания обоих приборов уменьшатся

11

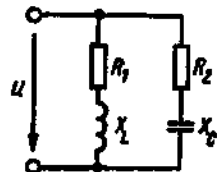
Показание амперметра уменьшится, показание ваттметра не изменится

44

Показание амперметра увеличится, показание ваттметра не изменится

64

Как изменится эквивалентная активная проводимость приведенной цепи при увеличении частоты источника?	Увеличится	149
	Уменьшится	108
	Не изменится	152
При частоте источника $f_1 = 50$ Гц $R_1 = R_2 = 2$ Ом; $X_L = X_C = 2$ Ом. Как изменится активная проводимость $g_1 + g_2$ цепи при увеличении частоты источника до значения $f_2 = 100$ Гц?	Увеличится в 2 раза	139
	Не изменится	127
	Уменьшится в 2 раза	116



§ 5.11. РЕЗОНАНС ТОКОВ

Резонансом токов называют такое явление в цепи с параллельным колебательным контуром, когда ток в неразветвленной части цепи совпадает по фазе с напряжением источника.

На рис. 5.33 представлена схема параллельного колебательного контура. Сопротивление R в индуктивной ветви обусловлено тепловыми потерями на активном сопротивлении катушки. Потери в емкостной ветви можно пренебречь.

Найдем условие резонанса токов. Согласно определению, ток совпадает по фазе с напряжением U . Следовательно, проводимость контура должна быть чисто активной, а реактивная проводимость равна нулю:

$$b = b_1 + b_2 = 0, \quad (5.46)$$

где $b_1 = b_L = X_L / (R^2 + X_L^2)$; $b_2 = -b_C = -1/X_C$.

Условием резонанса токов является равенство нулю реактивной проводимости контура.

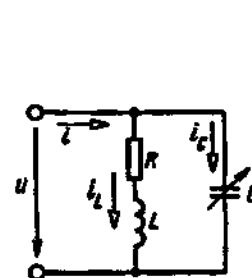


Рис. 5.33. Схема параллельного колебательного контура

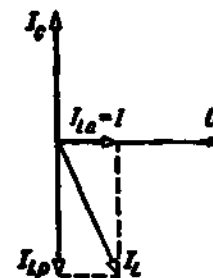


Рис. 5.34. Векторная диаграмма при резонансе токов

Для выяснения признаков резонанса токов построим векторную диаграмму.

Для того чтобы ток I в неразветвленной части цепи совпадал по фазе с напряжением, реактивная составляющая тока индуктивной ветви I_L должна быть равна по модулю току емкостной ветви I_C (рис. 5.34). Активная составляющая тока индуктивной ветви I_L оказывается равной току источника I . Определим сопротивление контура в предположении $R \ll X_L$.

Так как сопротивление контура $Z_k = 1/Y_k$, найдем сначала Y_k . Согласно выражению (5.39), $Y_k = g_1 + g_2$, поскольку $b_1 + b_2 = 0$, но $g_2 = 0$ ввиду того, что потери в емкостной ветви пренебрежимо малы. Таким образом,

$$Y_k = g_1 = \frac{R}{R^2 + X_L^2} \approx \frac{R}{X_L^2}.$$

В этом случае частота, при которой наступает резонанс токов, практически совпадает с собственной частотой контура и, следовательно,

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = Z_0.$$

Окончательно имеем

$$Z_k = Z_0^2 / R. \quad (5.47)$$

Сформулируем признаки резонанса токов:

а) сопротивление контура Z_k максимальное и чисто активное;

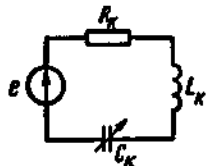
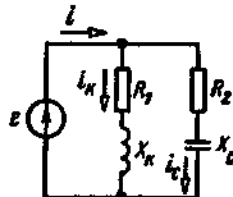
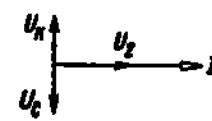
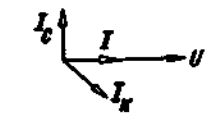
б) ток в неразветвленной части цепи совпадает по фазе с напряжением источника и достигает практически минимального значения;

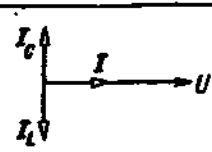
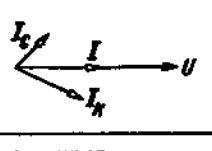
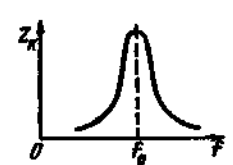
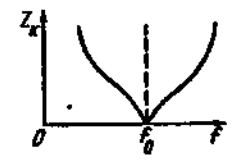
в) реактивная составляющая тока в катушке равна емкостному току, причем эти токи могут во много раз превышать ток источника.

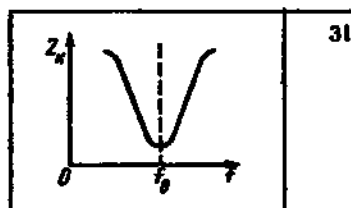
Физически это объясняется тем, что при малых потерях в контуре (при малом R) ток источника требуется только для покрытия этих потерь. Ток в контуре обусловлен обменом энергией между катушкой и конденсатором. В идеальном случае (контур без потерь) ток источника отсутствует.

В заключение необходимо отметить, что явление резонанса токов сложнее и многообразнее явления резонанса напряжений. Фактически был рассмотрен только частный случай радиотехнического резонанса.

Карточка № 5.9 (132)
Резонанс токов

Катушка R_K, L_K и конденсатор C_K образуют последовательный контур, настроенный в резонанс с частотой источника. Будет ли иметь место резонанс токов, если, не меняя параметров цепи и частоту источника, катушку и конденсатор включить параллельно? 	Будет	124
	Не будет	4
	Это зависит от соотношения между R_K и X_{LK}	94
Выберите векторную диаграмму, соответствующую данной цепи при резонансе токов 		134
		30

Как изменяется сопротивление контура Z_K при уменьшении сопротивления катушки R_K в режиме резонанса?		102
		111
	Уменьшится	14
Потребляется ли энергия контуром при резонансе токов, если $R_K=0$?	Практически не изменяется	128
	Увеличивается	131
	Да	69
Выберите кривую, соответствующую зависимости $Z_K(f)$, если $R_K=0$ при параллельном включении L и C	Нет	143
	Зависит от соотношения между L и C	48
		77
		25
		43



§ 5.12. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ

Коэффициент мощности $\cos \varphi = P/S$. Техничко-экономическое значение коэффициента мощности $\cos \varphi$ заключается в том, что от его значения зависят эффективность использования электрических установок и, следовательно, капитальные и эксплуатационные расходы.

Активная мощность, развиваемая генератором при номинальном режиме,

$$P = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} \cos \varphi, \quad (5.48)$$

где $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение генератора; $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток, который при длительном прохождении вызывает предельно допустимое нагревание генератора.

Полное использование мощности генератора происходит, когда $\cos \varphi = 1$. В этом случае активная мощность P максимальна и равна номинальной полной мощности $S_{\text{ном}}$:

$$S_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}. \quad (5.49)$$

Таким образом, уменьшение $\cos \varphi$, значение которого определяется характером нагрузки, приводит к неполному использованию генератора. Если приемник энергии (нагрузка) работает при неизменных напряжении и мощности, то ток нагрузки генератора будет тем больше, чем меньше $\cos \varphi$. Покажем это. Обозначим через I_0 ток, соответствующий значению $\cos \varphi_0 = 1$. Так как мощность, согласно условию, не меняется, то $UI_0 = UI \cos \varphi$, откуда

$$I = I_0 / \cos \varphi. \quad (5.50)$$

Увеличение тока генератора приводит к возрастанию тепловых потерь в линиях передачи энергии.

Действительно, мощность тепловых потерь в линии $\Delta P = I^2 R$, где R — сопротивление проводов линии передачи. Подставив в это выражение значение I из (5.50), получим

$$\Delta P = I_0^2 R / \cos^2 \varphi = P_0 / \cos^2 \varphi, \quad (5.51)$$

где P_0 — потери в линии при $\cos \varphi_0 = 1$.

Следовательно, при постоянной мощности потребителя P уменьшение $\cos \varphi$ приводит к увеличению тепловых потерь в линии передачи, которые растут обратно пропорционально квадрату коэффициента мощности. Для полного использования номинальной мощности генераторов и уменьшения тепловых потерь необходимо повышать $\cos \varphi$ приемников энергии до значений, близких к единице (0,95—1,0).

Для повышения $\cos \varphi$ параллельно приемнику энергии включают батареи конденсаторов. Благодаря этому источником реактивной энергии для приемника становится емкость и линия передачи разгружается от реактивного тока.

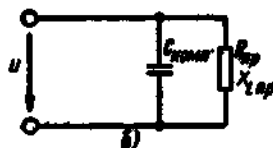
На практике к приемникам с удовлетворительным $\cos \varphi$ относятся наиболее распространенные в качестве промышленного привода асинхронные двигатели. Значение $\cos \varphi$ у них колеблется в пределах 0,1—0,3 при холостом ходе и 0,8—0,85 при номинальной нагрузке.

Карточка № 5.10 (261)

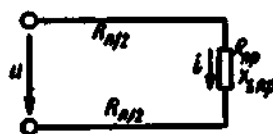
Коэффициент мощности

Какое из приведенных выражений неправильно определяет $\cos \varphi$ приемника энергии?	g/Y	62
	R/Z	29
	P/S	99
	Q/S	56
Какая из приведенных схем увеличения $\cos \varphi$ является рациональной? Обозначения на схеме: $C_{\text{комп}}$ — компенсирующая емкость; $R_{\text{пр}}$ — активное сопротивление приемника; $X_{\text{Лпр}}$ — индуктивное сопротивление приемника	Схема а)	55
	Схема б)	95
	Обе схемы	23



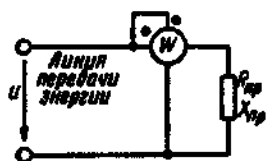


У приемника энергии $U_{лр} = 220$ В;
 $I = 100$ А; $\cos \varphi = \sqrt{3}/2$, $R_{лр} = 0,1$ Ом.
 Определить потери мощности в линии,
 обусловленные реактивным током при-
 емника



Рассчитать емкость конденсатора,
 обуславливающую полную компенса-
 цию реактивной энергии для случая,
 рассмотренного в предыдущем вопросе

Будет ли ваттметр, включенный так,
 как показано на схеме, регистрировать
 потерю активной мощности в линии?



1000 Вт	39
750 Вт	121
250 Вт	113

1600 мкФ	93
1200 мкФ	129

Будет	89
Не будет	68

ГЛАВА 6

ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

§ 6.1. ПРИНЦИП ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ ЭДС. ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ

Три синусоидальные ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутые по фазе на 120° , образуют трехфазную симметричную систему. Аналогично получают трехфазные системы напряжений и токов.

В настоящее время трехфазные системы получили широкое распространение, что объясняется главным образом следующими причинами: 1) при одинаковых условиях питание трехфазным током позволяет получить значительную экономию материала проводов по сравнению с тремя однофазными линиями; 2) при прочих равных условиях трехфазный генератор дешевле, легче и экономичнее, чем три однофазных генератора такой же общей мощности; то же относится к трехфазным двигателям и трансформаторам; 3) трехфазная система токов позволяет получить вращающееся магнитное поле с помощью трех неподвижных катушек, что существенно упрощает производство и эксплуатацию трехфазных двигателей; 4) при равномерной нагрузке трехфазный генератор создает на валу приводного двигателя постоянный момент в отличие от однофазного генератора, у которого мощность и момент на валу пульсируют с двойной частотой тока.

На рис. 6.1 изображена схема простейшего трехфазного генератора, с помощью которой легко пояснить принцип получения трехфазной ЭДС. В однородном магнитном поле постоянного магнита вращаются с постоянной угловой скоростью ω три рамки, сдвинутые в пространстве одна относительно другой на угол 120° .

В момент времени $t=0$ рамка AX расположена горизонтально и в ней индуцируется ЭДС $e_A = E_m \sin \omega t$. Точно такая же ЭДС будет индуцироваться и в рамке BY , когда она повернется на 120° и займет положение рамки AX . Следовательно, при $t=0$ $e_B = E_m \sin (\omega t - 120^\circ)$.

Рассуждая аналогичным образом, находим ЭДС в рамке CZ :

$$e_C = E_m \sin (\omega t - 240^\circ) = E_m \sin (\omega t + 120^\circ).$$

На рис. 6.2 представлен график мгновенных значений ЭДС e_A , e_B , e_C и векторная диаграмма трехфазной системы ЭДС.

Если к каждой из рамок AX , BY и CZ подсоединить

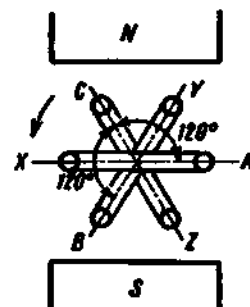


Рис. 6.1. Принципиальная схема генератора

нагрузку (посредством щеток и контактных колец), то в образовавшихся цепях появятся токи.

При симметричной нагрузке, когда все три нагрузочных сопротивления равны по значению и имеют одинаковый характер, синусоиды напряжений и токов изображаются графиками, аналогичными графику ЭДС. При этом начальные фазы токов определяются характером нагрузки, токи I_A , I_B , I_C равны по амплитуде и сдвинуты по фазе на 120° один относительно

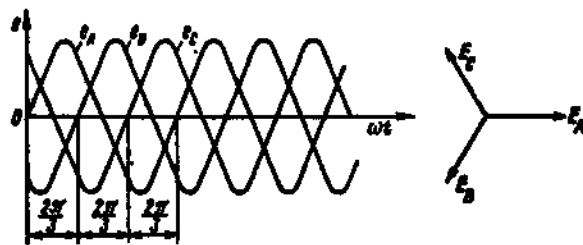


Рис. 6.2. К принципу получения трехфазной системы ЭДС

другого. Векторная диаграмма трехфазных напряжений и токов при симметричной нагрузке изображена на рис. 6.3.

Следует отметить, что в реальном трехфазном генераторе три неподвижные обмотки размещаются на статоре, а магнитное поле, индукция которого распределена по синусоидальному закону, создается вращающимся ротором.

Трехфазный генератор, соединенный проводами с трехфазным потребителем, образует трехфазную цепь.

В трехфазной цепи протекает трехфазная система токов, т. е. синусоидальные токи с тремя различными фазами. Участок цепи, по которому протекает один из токов, называют фазой трехфазной цепи.

Возможны различные способы соединения обмоток генератора с нагрузкой. На рис. 6.4 показана несвязанная трехфазная цепь, в которой каждая

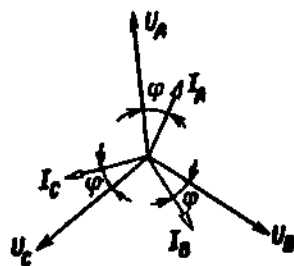


Рис. 6.3. Векторная диаграмма трехфазных напряжений и токов при симметричной нагрузке

обмотка генератора питает свою фазную нагрузку. Такую цепь, требующую шести соединительных проводов, практически не применяют.

В целях экономии обмотки трехфазного генератора соединяют звездой или треугольником. При этом число соединительных проводов от генератора к нагрузке уменьшается до трех или четырех.

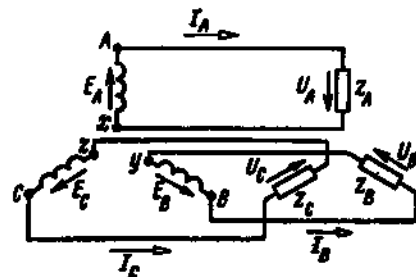


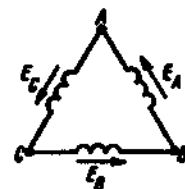
Рис. 6.4. Схема несвязанной трехфазной цепи



Рис. 6.5. Схема обмоток генератора, соединенных звездой

На электрических схемах трехфазный генератор принято изображать в виде трех обмоток, расположенных под углом 120° друг к другу. При соединении звездой (рис. 6.5) концы этих обмоток объединяют в одну точку, которую называют нулевой точкой генератора и обозначают O . Начала обмоток обозначают буквами A , B , C .

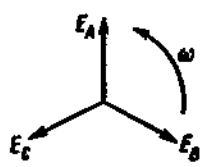
Рис. 6.6. Схема обмоток генератора, соединенных треугольником



При соединении треугольником (рис. 6.6) конец первой обмотки генератора соединяют с началом второй, конец второй — с началом третьей, конец третьей — с началом первой. К точкам A , B , C подсоединяют провода соединительной линии.

Отметим, что при отсутствии нагрузки ток в обмотках такого соединения отсутствует, так как геометрическая сумма ЭДС E_A , E_B и E_C равна нулю.

Карточка № 6.1 (195)
 Принцип получения трехфазной ЭДС.
 Основные схемы соединения трехфазных цепей

При вращении рамок против часовой стрелки в них индуцируются ЭДС, изображенные на рис. 6.2. Какие ЭДС индуцируются при вращении рамок по часовой стрелке?	Те же самые	73
	Знаки начальных фаз изменятся на противоположные	43
	Направления векторов ЭДС в рамках изменятся на противоположные	84
Изменится ли действующее значение трехфазной ЭДС при изменении направления вращений рамок?	Не изменится	8
	Изменится	59
	Частота и начальные фазы	31
	Частота и амплитуды	98
	Амплитуды и начальные фазы	17
Сколько соединительных проводов подводят к генератору, обмотки которого образуют звезду?	6	28
	3 или 4	104
	3	14
	4	77
С какой точкой соединяется начало первой обмотки при включении обмоток генератора треугольником?	С началом второй	50
	С концом второй	88
	С концом третьей	1

§ 6.2. СОЕДИНЕНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ЗВЕЗДОЙ.
 ЧЕТЫРЕХ- И ТРЕХПРОВОДНАЯ ЦЕПИ

Рассмотрим соединение генератора с нагрузкой, включенной звездой (рис. 6.7).

Провод OO' называют нулевым (четырепроводная цепь). В соответствии с первым законом Кирхгофа вектор тока в нулевом проводе

$$I_0 = I_A + I_B + I_C.$$

Как отмечалось, при симметричной нагрузке, когда сопротивления Z_A , Z_B и Z_C равны между собой и имеют одинаковый характер, векторы токов I_A , I_B , I_C равны по абсолютному значению и образуют трехлучевую звезду, у которой углы между лучами равны 120° .

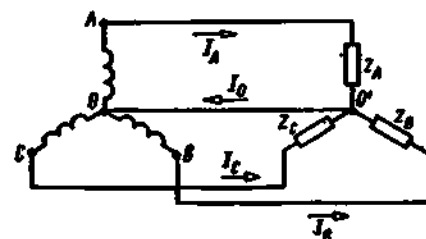


Рис. 6.7 Схема трехфазной электрической цепи с нулевым проводом

Из геометрического построения, показанного на рис. 6.8, следует, что в этом случае векторная сумма токов равна нулю:

$$I_A + I_B + I_C = 0.$$

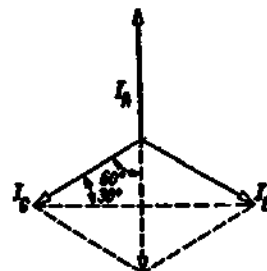


Рис. 6.8. Векторная диаграмма токов в трехфазной цепи при симметричной нагрузке

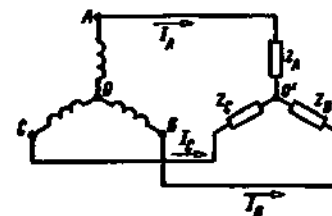


Рис. 6.9. Схема трехфазной трехпроводной цепи

Таким образом, при симметричной нагрузке нулевой провод не нужен. Получается схема трехфазной трехпроводной цепи, изображенная на рис. 6.9. Соединение звездой с нулевым проводом принято условно обозначать значком $\star$, а соединение звездой без

нулевого провода — значком $\star$.

Площадь поперечного сечения нулевого провода принимают равной половине площади поперечного сечения каждого из остальных трех проводов (их сечения равны между собой).

Карточка № 6.2 (294)
Соединение трехфазной цепи звездой.
Четырех- и трехпроводная цепи

Укажите правильное определение фазы	Фазой называют аргумент синуса	95
	Фазой называют часть многофазной цепи	25
	Оба определения правильны	68
Чему равно действующее значение векторной суммы фазных токов?	Сумме действующих значений фазных токов	47
	Меньше суммы действующих значений фазных токов и только в предельном случае равной ей	80
	Всегда меньше суммы действующих значений фазных токов	12
Чему равен ток в нулевом проводе при симметричной трехфазной системе токов?	Нулю	55
	Значению, меньшему суммы действующих значений фазных токов	34
Всегда ли векторная сумма токов фаз равняется нулю при отсутствии нулевого провода?	Всегда	93
	Не всегда	20
Может ли ток в нулевом проводе четырехпроводной цепи быть равен нулю?	Может	66
	Не может	41
	Всегда равен нулю	91

§ 6.3. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ФАЗНЫМИ И ЛИНЕЙНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ТОКАМИ ПРИ СИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ В ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ, СОЕДИНЕННОЙ ЗВЕЗДОЙ

Система ЭДС обмоток трехфазного генератора, работающего в энергосистеме, всегда симметрична: ЭДС поддерживаются строго постоянными по амплитуде и сдвинутыми по фазе на 120° .

Рассмотрим симметричную нагрузку (рис. 6.10), для которой

$$Z_A = Z_B = Z_C = Z, \quad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi.$$

К зажимам A, B, C подходят провода линии электропередачи — линейные провода.

Введем обозначения: I_Δ — линейный ток в проводах линии электропередачи; I_ϕ — ток в сопротивлениях (фазах) нагрузки; U_Δ — линейное напряжение между линейными проводами; U_ϕ — фазное напряжение на фазах нагрузки.

В рассматриваемой схеме фазные и линейные токи совпадают: $I_\Delta = I_\phi$, напряжения U_{AB}, U_{BC} и U_{CA} являются линейными, а напряжения U_A, U_B, U_C — фазными. Складывая напряжения, находим (рис. 6.10):

$$U_{AB} = U_A - U_B; \quad U_{BC} = U_B - U_C; \quad U_{CA} = U_C - U_A.$$

Векторную диаграмму, удовлетворяющую этим уравнениям (рис. 6.11), начинаем строить с изображения звезды фазных напряжений U_A, U_B, U_C . Затем строим вектор U_{AB} — как геометрическую сумму векторов U_A и $-U_B$, вектор U_{BC} — как геометрическую

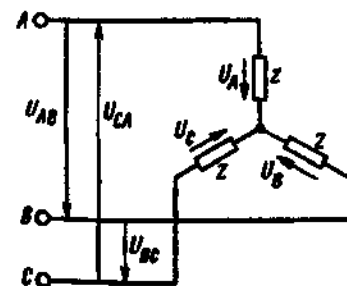


Рис. 6.10. Соединение нагрузки звездой

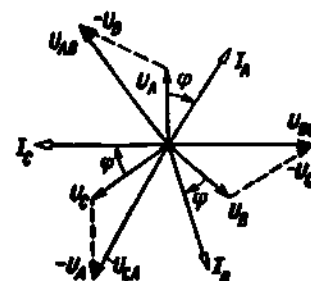


Рис. 6.11. Полярная векторная диаграмма напряжений

сумму векторов U_B и $-U_C$, вектор U_{CA} — как геометрическую сумму векторов U_C и $-U_A$.

Для полноты картины на векторной диаграмме изображены также векторы токов, отстающих на угол φ от векторов соответствующих фазных напряжений (нагрузку считаем индуктивной).

На построенной векторной диаграмме начала всех векторов совмещены в одной точке (полюсе), поэтому ее называют полярной. Основное достоинство полярной векторной диаграммы — ее наглядность.

Уравнениям, связывающим векторы линейных и фазных напряжений, удовлетворяет также векторная диаграмма рис. 6.12, которую называют топогра-

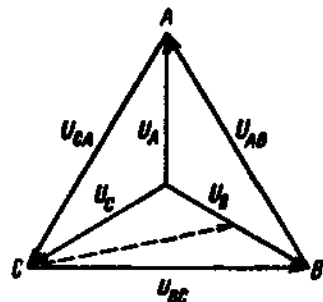


Рис. 6.12. Топографическая векторная диаграмма напряжений

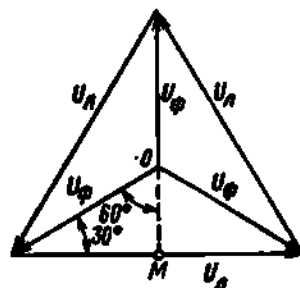


Рис. 6.13. Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений при симметричной нагрузке

фической. Она позволяет графически найти напряжение между любыми точками схемы, изображенной на рис. 6.10. Например, для определения напряжения между точкой C и точкой, которая делит пополам сопротивление, включенное в фазу B, достаточно соединить на векторной диаграмме точку C с серединой вектора U_B . На диаграмме вектор искомого напряжения показан пунктиром.

При симметричной нагрузке модули векторов фазных (и линейных) напряжений равны между собой. Тогда топографическую диаграмму можно изобразить так, как показано на рис. 6.13.

Опустив перпендикуляр OM , из прямоугольного треугольника находим $U_A/2 = \sqrt{U_\phi^2 - U_\phi^2/4} = \sqrt{3} U_\phi/2$.

В симметричной звезде фазные и линейные токи и напряжения связаны соотношениями $I_A = I_\phi$; $U_A = \sqrt{3} U_\phi$.

Карточка № 6.3 (189)

Соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами при симметричной нагрузке в трехфазной цепи, соединенной звездой

Какой из токов в схеме линейный, какой — фазный?	Оба тока линейные	6
	Оба тока фазные	64
	Ток I_1 — линейный, ток I_2 — фазный	29
	Ток I_2 — линейный, ток I_1 — фазный	105
Между различными точками схемы, изображенной выше, включены вольтметры. Какой из них показывает линейное напряжение, какой — фазное?	Напряжение U_{AO} — линейное, напряжение U_{BO} — фазное	15
	Напряжение U_{AB} — линейное, напряжение U_{BC} — фазное	78
	Напряжение U_{CA} — линейное, напряжение U_{CO} — фазное	51
Чему равен вектор U_{AC}, если $U_{CA} = U_C - U_A$?	$U_{AC} = -U_C - U_A$	89
	$U_{AC} = U_A - U_C$	2
	$U_{AC} = U_C + U_A$	62
Укажите причину того, что полярная и топографическая векторные диаграммы трехфазной цепи удовлетворяют одной и той же системе векторных уравнений	Уравнения имеют векторную форму	36
	Уравнения написаны для симметричной нагрузки	101
	Векторы можно переносить параллельно их начальному положению	22
Симметричная нагрузка соединена звездой. Линейное напряжение 380 В. Определить фазное напряжение	380 В	74
	250 В	44
	220 В	85
	127 В	9

§ 6.4. НАЗНАЧЕНИЕ НУЛЕВОГО ПРОВОДА В ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ ЦЕПИ

Ток в нулевом проводе равен нулю при строго симметричной нагрузке. Если нагрузка несимметричная, т. е. $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$, то неравными будут и токи: $I_A \neq I_B \neq I_C$. Тогда на основе построения, аналогичного приведенному на рис. 6.8, нетрудно убедиться, что при симметрии фазных напряжений ток в нулевом проводе не равен нулю: $I_0 \neq 0$ (за исключением некоторых частных случаев). Таким образом, при симметрии фазных напряжений и несимметрии нагрузки в нулевом проводе есть ток. Представим себе, что нулевой провод оборвался: $I_0 = 0$. При этом токи I_A , I_B , I_C должны измениться так, чтобы их векторная сумма оказалась равной нулю: $I_A + I_B + I_C = 0$.

Но при заданных сопротивлениях нагрузки Z_A , Z_B , Z_C токи могут измениться только за счет изменения фазных напряжений. Следовательно, обрыв нулевого провода в общем случае приводит к изменению фазных напряжений; симметричные фазные напряжения становятся несимметричными.

Рассмотрим топографическую векторную диаграмму, представленную на рис. 6.14.

Для простоты пренебрежем падением напряжений внутри обмоток генератора и проводах линии и будем считать, что напряжения на нагрузке равны ЭДС генератора.

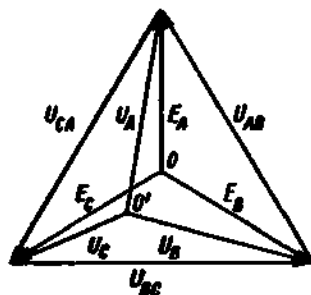


Рис. 6.14. Топографическая векторная диаграмма ЭДС и напряжений трехфазной цепи при отсутствии нулевого провода

При несимметрии нагрузки и отсутствии нулевого провода фазные напряжения U_A , U_B , U_C будут различными и точка O' займет на векторной диаграмме положение, отличное от точки O .

Введем нулевой провод с пренебрежимо малым сопротивлением, как показано на рис. 6.7. При этом потенциалы точек O и O' окажутся одинаковыми. Это означает, что точки O и O' на топографической диаграмме рис. 6.14 должны быть совмещены.

Точка O на топографической диаграмме не может изменить своего положения, так как симметрия ЭДС E_A , E_B , E_C обеспечивается конструкцией генератора. Следовательно, точка O' перейдет в точку O , т. е. фазные напряжения на нагрузке станут симметричными.

Таким образом, нулевой провод в четырехпроводной цепи предназначен для обеспечения симметрии фазных напряжений при несимметричной нагрузке.

Несимметрия фазных напряжений недопустима, так как приводит к нарушению нормальной работы потребителей, рассчитанных на определенное рабочее напряжение.

Карточка № 6.4 (233)
Назначение нулевого провода в четырехпроводной цепи

Может ли геометрическая сумма линейных токов быть отличной от нуля при отсутствии нулевого провода?	Может	60
	Не может	32
Будут ли меняться линейные токи при обрыве нулевого провода в случае: а) симметричной нагрузки; б) несимметричной нагрузки?	а) Будут; б) не будут	99
	Будут	18
	а) Не будут; б) будут	53
	Не будут	71
За счет чего могут измениться линейные токи при постоянной ЭДС генератора и неизменных сопротивлениях нагрузки?	Изменения линейных напряжений	82
	Изменения фазных напряжений	4
	Изменения фазных и линейных напряжений	57
Чему равна разность потенциалов точек O и O' при наличии нулевого провода с активным сопротивлением R_0 ?	0	39
	$I_0 R_0$	96
	U_0	26
Может ли нулевой провод, обладающий большим активным сопротивлением, обеспечить симметрию фазных напряжений при несимметричной нагрузке?	Может	69
	Не может	48

§ 6.5. СОЕДИНЕНИЕ НАГРУЗКИ ТРЕУГОЛЬНИКОМ. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ, СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ФАЗНЫМИ И ЛИНЕЙНЫМИ ТОКАМИ И НАПРЯЖЕНИЯМИ

Треугольником могут быть соединены как обмотки генератора, так и фазы нагрузки. При соединении треугольником фазные и линейные напряжения равны: $U_\Delta = U_\phi$ (рис. 6.15). Применяя первый закон Кирхгофа

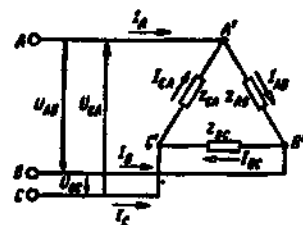


Рис. 6.15. Соединение нагрузки треугольником

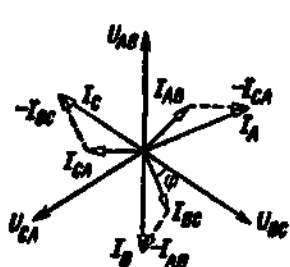


Рис. 6.16. Векторные диаграммы напряжений и токов трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником

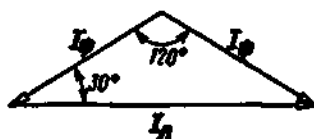


Рис. 6.17. К определению соотношения между фазными и линейными токами при соединении нагрузки треугольником

к узлам А, В и С, найдем связь между линейными I_A, I_B, I_C и фазными I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} токами. Для векторов токов справедливы соотношения

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}; I_B = I_{BC} - I_{AB}; I_C = I_{CA} - I_{BC}.$$

Этим уравнениям удовлетворяют векторные диаграммы, представленные на рис. 6.16.

При симметричной нагрузке

$$I_A = I_B = I_C = I_\Delta; I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_\phi.$$

Из треугольника фазных и линейных токов (рис. 6.17) находим

$$I_\Delta = 2I_\phi \cos 30^\circ = 2I_\phi \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} I_\phi.$$

Таким образом, при соединении треугольником

$$U_\Delta = U_\phi; I_\Delta = \sqrt{3} I_\phi.$$

Карточка № 6.5 (118)

Соединение нагрузки треугольником. Векторные диаграммы, соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями

Написать уравнения, связывающие векторы линейных и фазных токов	$I_A = I_{AB} - I_{CA}; I_B = I_{BC} - I_{AB}; I_C = I_{CA} - I_{BC}$	37
	$I_A = I_{CA} - I_{AB}; I_B = I_{AB} - I_{BC}; I_C = I_{BC} - I_{CA}$	102
	$I_A = I_{CA} + I_{AB}; I_B = I_{AB} + I_{BC}; I_C = I_{BC} + I_{CA}$	23
Удовлетворяет ли приведенная диаграмма уравнениям токов для изображенной выше схемы?	Да	61
	Нет	33
Как соединены эти обмотки?	Звездой	75
	Треугольником	45
	Звездой с нулевым проводом	86

Линейное напряжение 380 В. Определить фазное напряжение, если симметричная нагрузка соединена треугольником	380 В	100
	220 В	19
	127 В	72
Линейный ток равен 2,2 А. Рассчитать фазный ток, если симметричная нагрузка соединена треугольником	3,8 А	54
	2,2 А	83
	1,27 А	10

§ 6.6. АКТИВНАЯ, РЕАКТИВНАЯ И ПОЛНАЯ МОЩНОСТИ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ

Активная мощность трехфазной цепи равна сумме активных мощностей ее фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C.$$

Реактивная мощность трехфазной цепи равна сумме реактивных мощностей ее фаз:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C.$$

Очевидно, что в симметричной трехфазной цепи

$$P_A = P_B = P_C = P_\phi; \quad Q_A = Q_B = Q_C = Q_\phi.$$

Тогда $P = 3P_\phi$, $Q = 3Q_\phi$.

Мощность одной фазы определяется по формулам для однофазной цепи. Таким образом,

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi; \quad Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi.$$

Эти формулы можно использовать для расчета мощности симметричной трехфазной цепи. Однако измерения фазных напряжений и токов связаны с некоторыми трудностями, так как необходим доступ к нулевой точке, которая не всегда имеет специальный вывод и находится внутри машины. Проще измерить линейные токи и напряжения непосредственно на клеммах щита питания. Поэтому формулы мощности трехфазной системы записывают через линейные токи и напряжения.

При соединении звездой

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = 3 \frac{U_L}{\sqrt{3}} I_L \cos \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi.$$

При соединении треугольником

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = 3U_L \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi.$$

Таким образом, в обоих случаях активная мощность симметричной цепи

$$P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi.$$

Аналогично, реактивная мощность

$$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi.$$

Полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} U_L I_L.$$

Коэффициент мощности симметричной трехфазной цепи находят как отношение активной и полной мощностей:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{3} U_L I_L}.$$

Эти формулы точны для симметричных цепей. Реальные цепи рассчитывают таким образом, чтобы их нагрузка была близка к симметричной, поэтому приведенные формулы имеют широкое применение.

Карточка № 6.6 (246)
Активная, реактивная и полная мощности
трехфазной цепи. Коэффициент мощности

В симметричной трехфазной цепи фазное напряжение равно 220 В, фазный ток 5 А, $\cos \varphi = 0.8$. Определить активную мощность	0,88 кВт	5
	1,1 кВт	58
	2,64 кВт	40
Найти реактивную мощность трехфазной цепи в условиях предыдущей задачи	0,66 квар	97
	1,1 квар	27
	2,64 квар	70
	1,98 квар	49
В симметричной трехфазной цепи линейное напряжение равно 220 В, линейный ток 5 А, коэффициент мощности 0,8. Определить активную мощность	1,1 кВт	13
	1,14 кВт	81
	1,52 кВт	56

Подсчитать реактивную мощность трехфазной цепи в условиях предыдущей задачи	0,38 квар	35
	1,14 квар	94
	1,1 квар	21
	1,52 квар	67
В трехфазной цепи линейное напряжение равно 220 В, линейный ток 2 А, активная мощность 380 Вт. Найти коэффициент мощности	0,8	42
	0,6	92
	0,5	7
	0,4	65

§ 6.7. ВЫБОР СХЕМ СОЕДИНЕНИЯ ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ И СИЛОВОЙ НАГРУЗОК ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ИХ В ТРЕХФАЗНУЮ СЕТЬ

При выборе схемы соединения нагрузки (звезда, треугольник, звезда с нулевым проводом) необходимо учитывать три основных фактора: характер нагрузки, номинальное напряжение сети, номинальное напряжение потребителей. Рассмотрим примеры, иллюстрирующие выбор схем.

1. Определить схему соединения осветительной нагрузки, если $U_{\text{сети}} = 380 \text{ В}$, $U_{\text{лампы}} = 220 \text{ В}$.

Прежде всего устанавливаем, что лампы должны быть включены на фазное напряжение. Действительно, $U_{\phi} = U_{\text{л}} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220 \text{ В}$. Поэтому выбираем схему соединения звездой. Поскольку нагрузка осветительная, нужно для обеспечения симметрии фазных напряжений включить нулевой провод. Следовательно, заданным условиям удовлетворяет схема соединения «звезда с нулевым проводом».

2. Определить схему соединения осветительной нагрузки, если $U_{\text{сети}} = 220 \text{ В}$, $U_{\text{лампы}} = 220 \text{ В}$.

В рассматриваемом случае лампы должны быть включены непосредственно на линейное напряжение. Выбираем схему соединения треугольником. Симметрия линейных напряжений обеспечивается генераторами, питающими сеть.

3. Выбрать схему соединения обмоток (фаз) трехфазного двигателя, если $U_{\text{обм}} = 220 \text{ В}$, $U_{\text{сети}} = 380 \text{ В}$.

Обмотки трехфазного двигателя образуют симметричную нагрузку; следовательно, в нулевом проводе нет необходимости. Если обмотки двигателя соединить треугольником, то каждая из них окажется под линейным напряжением 380 В и будет перегреваться. Таким образом, обмотки двигателя следует соединить звездой. Тогда к каждой обмотке будет приложено напряжение, на которое она рассчитана: $U_{\phi} = 220 \text{ В}$.

Карточка № 6.7 (118)
Выбор схем соединения осветительной и силовой нагрузок при включении их в трехфазную сеть

Лампы накаливания с номинальным напряжением 127 В включают в трехфазную сеть с линейным напряжением 220 В. Определить схему соединения ламп	Звездой	30
	Звездой с нулевым проводом	106
	Треугольником	16
	Лампы нельзя включать в сеть с линейным напряжением 220 В	79
В ту же сеть включают трехфазный двигатель, каждая из обмоток которого рассчитана на 127 В. Как следует соединить обмотки двигателя?	Звездой	52
	Треугольником	90
	Двигатель нельзя включать в эту сеть	3
Трехфазный двигатель, рассмотренный в предыдущей задаче, включают в сеть с линейным напряжением 380 В. Как нужно соединить обмотки двигателя?	Звездой	63
	Треугольником	38
	Двигатель нельзя включать в эту сеть	103
Лампы накаливания с номинальным напряжением 220 В включают в трехфазную сеть с линейным напряжением 220 В. Определить схему соединения ламп	Звездой	24
	Звездой с нулевым проводом	76
	Треугольником	46
В ту же сеть включают трехфазный двигатель, каждая из обмоток которого рассчитана на 220 В. Как следует соединить обмотки двигателя?	Звездой	87
	Треугольником	11

ТРАНСФОРМАТОРЫ

§ 7.1. НАЗНАЧЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Трансформатор предназначен для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения. Увеличение напряжения осуществляется с помощью повышающих трансформаторов, уменьшение — понижающих.

Трансформаторы применяют в линиях электропередачи, в технике связи, в автоматике, измерительной технике и других областях.

В соответствии с назначением различают: силовые трансформаторы для питания электрических двигателей и осветительных сетей; специальные трансформаторы для питания сварочных аппаратов, электропечей и других потребителей особого назначения; измерительные трансформаторы для подключения измерительных приборов.

По числу фаз трансформаторы делятся на одно- и трехфазные. Трансформаторы, используемые в технике связи, подразделяют на низко- и высокочастотные.

Расчетные мощности трансформаторов различны — от долей вольт-ампер до десятков тысяч киловольт-ампер; рабочие частоты — от единиц герц до сотен килогерц.

Трансформатор — простой, надежный и экономичный электрический аппарат. Он не имеет движущихся частей и скользящих контактных соединений, его КПД достигает 99%. КПД трансформатора η , определяемый как отношение мощности на выходе P_2 к мощности на входе P_1 , зависит от нагрузки. Современные трансформаторы рассчитывают таким образом, что максимум КПД достигается при нагрузке, равной примерно половине номинального значения.

Карточка № 7.1 (232)
Назначение трансформаторов и их применение

Укажите одно из важнейших достоинств цепей переменного тока по сравнению с цепями постоянного тока	Возможность передачи электроэнергии на большие расстояния	56

Продолжение

	Возможность преобразования электроэнергии в тепловую и механическую	10
	Возможность изменения напряжения и тока в цепи с помощью трансформатора	85
При каком напряжении целесообразно: а) передавать энергию; б) потреблять энергию?	а) Высоком; б) низком	42
	а) Низком; б) высоком	39
	Это зависит от характера тока	79
Какой это трансформатор? 	Понижающий	45
	Повышающий	24
Где применяют трансформаторы?	В линиях электропередачи	30
	В технике связи	82
	В автоматике и измерительной технике	25
	Во всех перечисленных и многих других областях техники	18
Какие трансформаторы используют для питания электроэнергией жилых помещений?	Силовые	63
	Измерительные	78
	Специальные	47

§ 7.2. УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформатор представляет собой замкнутый магнитопровод, на котором расположены две или несколько обмоток. В маломощных высокочастотных трансформаторах, используемых в радиотехнических схемах, магнитопроводом может являться воздушная среда.

Для уменьшения потерь на гистерезис магнитопровод изготавливают из магнитомягкого материала — трансформаторной стали, имеющей узкую петлю на-

магнитизации. Для уменьшения потерь на вихревые токи в материал магнитопровода вводят примесь кремния, повышающую его электрическое сопротивление, а сам магнитопровод собирают из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,35—0,5 мм, изолированных друг от друга теплостойким лаком или специальной бумагой.

Различают трансформаторы стержневого (рис. 7.1, а) и броневые (рис. 7.1, б) типов. Последний хорошо

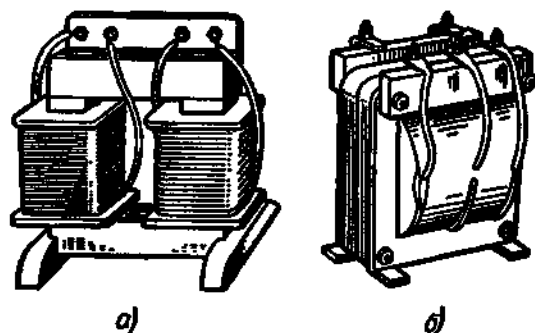


Рис. 7.1. Конструкция однофазного малоомощного трансформатора стержневого (а) и броневые (б) типов

защищает обмотки катушек от механических повреждений. Верхнюю часть магнитопровода, называемую ярмом, крепят после насадки на стержень катушек (обмоток). Стержни и ярмо соединяют очень плотно, чтобы исключить воздушные зазоры на стыках. В малоомощных трансформаторах находят широкое применение кольцевые магнитопроводы, которые собирают из штампованных колец или навивают из длинной ленты. В этих магнитопроводах отсутствует воздушный зазор, поэтому магнитный поток рассеяния мал. В трансформаторах, рассчитанных на повышенные частоты, кольцевые магнитопроводы часто пресуют из ферромагнитного порошка, смешанного с изоляционным лаком.

Обмотки трансформаторов изготовляют из медного провода и располагают на одном и том же или на разных стержнях, рядом или одну под другой. В последнем случае непосредственно к стержню прижимает обмотка низшего напряжения, а поверх нее размещается обмотка высшего напряжения.

Обмотку трансформатора, к которой подводится напряжение питающей сети, называют первичной, а обмотку, к которой подсоединяется нагрузка, — вторичной. На сердечнике может быть размещено несколько вторичных обмоток с разным числом витков, что позволяет получить различные по значению вторичные напряжения.

При работе трансформатора за счет токов в обмотках, а также вследствие перемagnetизации магнитопровода и вихревых токов выделяется теплота. Трансформаторы небольшой мощности (до 10 кВ·А), для которых достаточно воздушного охлаждения, называют сухими.

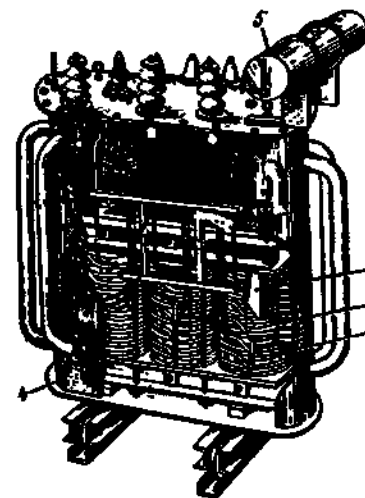


Рис. 7.2. Трехфазный масляный трансформатор

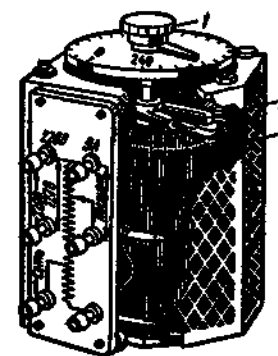


Рис. 7.3. Общий вид автотрансформатора ЛАТР-1:

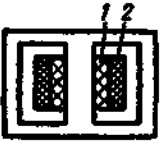
1 — ручка скользящего контакта; 2 — скользящий контакт; 3 — обмотка

В мощных трансформаторах применяют масляное охлаждение (рис. 7.2). Магнитопровод 1 с обмотками 2, 3 размещается в баке 4, заполненном минеральным (трансформаторным) маслом. Масло не только отводит теплоту за счет конвекции или принудительной циркуляции, но и является хорошим диэлектриком (изолятором). Масляные трансформаторы надежны в работе и имеют меньшие размеры и массу по сравнению

нию с сухими трансформаторами той же мощности. При изменении температуры объем масла меняется. При повышении температуры излишек масла поглощается расширителем 5, а при понижении температуры масло из расширителя возвращается в основной бак.

В тех случаях, когда требуется плавно изменять вторичное напряжение, применяют скользящий контакт для изменения числа витков обмотки (примерно так же, как это делается в ползунковых реостатах). Скользящий контакт широко используется в автотрансформаторах, рассчитанных на регулирование напряжения в небольших пределах (рис. 7.3).

Карточка № 7.2 (175)
Устройство трансформатора

Какие трансформаторы изображены на рисунках?	а) и б) Стержневого типа	48
	а) Стержневого типа; б) бронзового типа	9
	а) Бронзового типа; б) стержневого типа	87
Почему магнитопроводы высокочастотных трансформаторов прессуют из ферромагнитного порошка?	Для упрощения технологии изготовления	26
	Для увеличения магнитной проницаемости	34
	Для уменьшения тепловых потерь	50
Какая из обмоток — обмотка низшего напряжения?	Обмотка 1	5
	Обмотка 2	92
Почему допустимая плотность тока в обмотках трансформатора с масляным охлаждением, составляющая 2—4 А/мм², примерно в 2 раза выше, чем в сухих трансформаторах?	Надежнее изоляция витков	1
	Лучше условия охлаждения	20
Можно ли расширитель трансформатора полностью залить маслом?	Можно	54
	Нельзя	91

§ 7.3. ФОРМУЛА ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ЭДС

Рассмотрим катушку (рис. 7.4), к зажимам которой подведено синусоидальное напряжение. Пренебрежем сопротивлением катушки и потерями на гистерезис и вихревые токи. Тогда приложенное к катушке напряжение $u = U_m \sin \omega t$ будет уравниваться только ЭДС самоиндукции $e = E_m \sin \omega t$.

Это очевидно, так как полностью уравнивать друг друга могут только равные и одинаково изменяющиеся во времени величины.

В соответствии с законом электромагнитной индукции $e = -w \frac{d\Phi}{dt}$; следовательно, $E_m \sin \omega t = -\omega X$

$\times \frac{d\Phi}{dt}$. Это дифференциальное уравнение позволяет найти зависимость между ЭДС обмотки и магнитным потоком в магнитопроводе:

$$d\Phi = -\frac{E_m}{\omega} \sin \omega t dt.$$

Принтегрируем левую и правую части этого выражения:

$$\Phi = -\frac{E_m}{\omega} \int \sin \omega t dt = \frac{E_m}{\omega} \cos \omega t + A.$$

Здесь постоянная интегрирования $A=0$, так как синусоидальная ЭДС не может создать постоянную составляющую магнитного потока. Таким образом,

$$\Phi = \frac{E_m}{\omega} \cos \omega t = \Phi_m \cos \omega t,$$

где $\Phi_m = E_m / (\omega)$ — амплитудное значение переменного магнитного потока в магнитопроводе катушки.

Подставив в последнее равенство $E_m = \sqrt{2}E$ и $\omega = 2\pi f$, получим $\Phi_m = \frac{\sqrt{2}E}{2\pi f}$, или $E = \frac{2\pi f \Phi_m}{\sqrt{2}}$.

Нетрудно подсчитать, что $2\pi / \sqrt{2} = 4,44$, т. е. $E = 4,44 f \Phi_m$.

Это выражение, связывающее действующее значение ЭДС в обмотке с амплитудой магнитного потока в магнитопроводе, принято называть формулой трансформаторной ЭДС. Она играет важ-

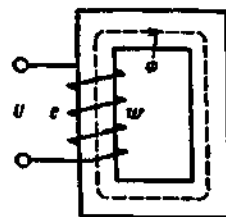


Рис. 7.4. Схема катушки с ферромагнитным сердечником в цепи переменного тока

ную роль в теории трансформаторов и электрических машин переменного тока.

Карточка № 7.3 (192)
Формула трансформаторной ЭДС

Будет ли протекать переменный ток через обмотку катушки, если потери в магнитопроводе равны нулю?	Будет	55
	Не будет	64
Какое уравнение связывает магнитный поток в магнитопроводе с мгновенным значением ЭДС в обмотке?	$E = E_m \sin \omega t$	16
	$d\Phi = -\frac{E_m}{\omega} \sin \omega t dt$	29
	$\mu_2 \sim 3\omega / (2\pi^2 \omega)$	65
Найти интеграл $\int \sin \omega t dt$	$\frac{1}{\omega} \cos \omega t$	22
	$-\frac{1}{\omega} \cos \omega t$	8
	$-\frac{1}{\omega} \cos \omega t + A$	14
Определить амплитудное значение магнитного потока, если $\Phi = 0,01 \cos \omega t$	0,01 Вб	35
	Для решения задачи недостаточно данных	13
Рассчитать ЭДС, если $T = 100 / 2\pi \text{ с}^{-1}$; $\omega = 100 \sqrt{2} \text{ рад/с}$; $\Phi_m = 0,01 \text{ Вб}$	$E = 4,44 \text{ В}$	46
	$E = 44,4 \text{ В}$	58
	$E = 100 \text{ В}$	59

§ 7.4. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА. КОЭФФИЦИЕНТ ТРАНСФОРМАЦИИ

Работа трансформатора основана на явлении взаимной индукции, которое является следствием закона электромагнитной индукции.

Рассмотрим более подробно сущность процесса трансформации тока и напряжения.

При подключении первичной обмотки трансформатора к сети переменного тока напряжением U_1 по

обмотке начнет проходить ток I_1 (рис. 7.5), который создаст в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ . Магнитный поток, пронизывая витки вторичной обмотки, индуцирует в ней ЭДС E_2 , которую можно использовать для питания нагрузки.

Поскольку первичная и вторичная обмотки трансформатора пронизываются одним и тем же магнитным потоком Φ , выражения индуцируемых в обмотке ЭДС можно записать в виде

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m;$$

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m,$$

где f — частота переменного тока; w_1, w_2 — число витков обмоток.

Поделив одно равенство на другое, получим $E_2/E_1 = w_2/w_1 = k$.

Отношение чисел витков обмоток трансформатора называют коэффициентом трансформации k .

Таким образом, коэффициент трансформации показывает, как относятся действующие значения ЭДС вторичной и первичной обмоток.

На основании закона электромагнитной индукции можно написать

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Поделив одно равенство на другое, получим $e_2/e_1 = w_2/w_1 = k$.

Следовательно, в любой момент времени отношение мгновенных значений ЭДС вторичной и первичной обмоток равно коэффициенту трансформации. Нетрудно понять, что это возможно только при полном совпадении по фазе ЭДС e_1 и e_2 .

Если цепь вторичной обмотки трансформатора разомкнута (режим холостого хода), то напряжение на зажимах обмотки равно ее ЭДС: $U_2 = E_2$, а напряжение источника питания почти полностью уравновешивается ЭДС первичной обмотки $U \approx E_1$. Следовательно, можно написать, что $k = E_2/E_1 \approx U_2/U_1$.

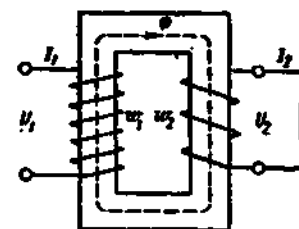


Рис. 7.5. Принципиальная схема однофазного трансформатора

Таким образом, коэффициент трансформации может быть определен на основании измерений напряжения на входе и выходе ненагруженного трансформатора. Отношение напряжений на обмотках ненагруженного трансформатора указывается в его паспорте.

Учитывая высокий КПД трансформатора, можно полагать, что $S_1 \approx S_2$, где $S_1 = U_1 I_1$ — мощность, потребляемая из сети; $S_2 = U_2 I_2$ — мощность, отдаваемая в нагрузку.

Таким образом, $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$, откуда $I_1/I_2 \approx U_2/U_1 = k$.

Отношение токов первичной и вторичной обмоток приблизительно равно коэффициенту трансформации, поэтому ток I_2 во столько раз увеличивается (уменьшается), во сколько раз уменьшается (увеличивается) U_2 .

Карточка № 7.4 (415)
Принцип действия однофазного трансформатора.
Коэффициент трансформации

На каком законе основан принцип действия трансформатора?	На законе Ампера	74
	На законе электромагнитной индукции	88
	На принципе Ленца	75
Чему равно отношение действующих и мгновенных значений ЭДС первичной и вторичной обмоток трансформатора?	Отношению чисел витков обмоток	81
	Приблизительно отношению чисел витков обмоток	69
Может ли напряжение на зажимах вторичной обмотки превышать: а) ЭДС первичной обмотки; б) ЭДС вторичной обмотки?	Может	32
	Не может	66
	а) Может; б) не может	77
	а) Не может; б) может	95
Чему равно отношение напряжений на зажимах первичной и вторичной обмоток?	Отношению чисел витков обмоток	71
	Приблизительно отношению чисел витков обмоток	73

Продолжение

Определить приближенное значение коэффициента трансформации, если $U_1 = 200$ В; $P = 1$ кВт; $I_2 = 0,5$ А	Для решения задачи недостаточно данных	31
	$k \approx 10$	96
	$k \approx 0,1$	23

§ 7.5. ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

В линиях электропередачи используют в основном трехфазные силовые трансформаторы. Внешний вид, конструктивные особенности и компоновка основных элементов этого трансформатора представлены на рис. 7.2. Магнитопровод трехфазного трансформатора имеет три стержня, на каждом из которых размещаются две обмотки одной фазы (рис. 7.6).

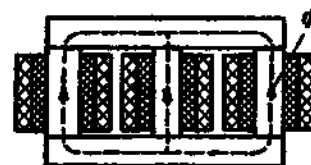


Рис. 7.6. Размещение обмоток на сердечнике трехфазного трансформатора

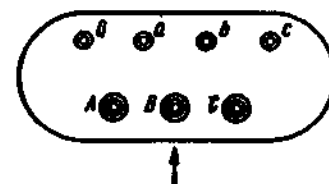


Рис. 7.7. Расположение и маркировка выводов на крышке бака трансформатора

Для подключения трансформатора к линиям электропередачи на крышке бака имеются вводы, представляющие собой фарфоровые изоляторы, внутри которых проходят медные стержни. Вводы высшего напряжения обозначают буквами А, В, С, вводы низшего напряжения — буквами а, б, с. Ввод нулевого провода располагают слева от ввода а и обозначают О (рис. 7.7).

Принцип работы и электромагнитные процессы в трехфазном трансформаторе аналогичны рассмотренным ранее. Особенностью трехфазного трансформатора является зависимость коэффициента трансформации линейных напряжений от способа соединения обмоток.

Применяются главным образом три способа соединения обмоток трехфазного трансформатора: 1) соеди-

нение первичных и вторичных обмоток звездой (рис. 7.8, а); 2) соединение первичных обмоток звездой, вторичных — треугольником (рис. 7.8, б); 3) соединение первичных обмоток треугольником, вторичных — звездой (рис. 7.8, в).

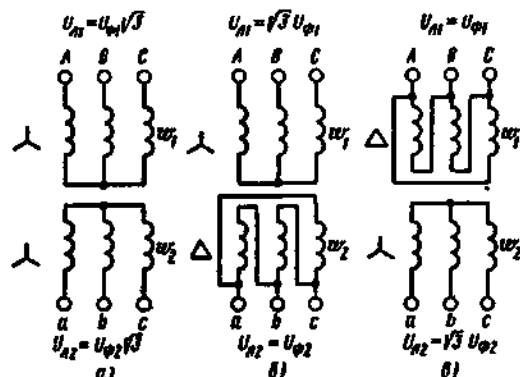


Рис. 7.8. Способы соединения обмоток трехфазного трансформатора

Обозначим отношение чисел витков обмоток одной фазы буквой k , что соответствует коэффициенту трансформации однофазного трансформатора и может быть выражено через отношение фазных напряжений: $k = w_2/w_1 \approx U_{\phi 2}/U_{\phi 1}$.

Обозначим коэффициент трансформации линейных напряжений буквой c .

При соединении обмоток по схеме звезда — звезда

$$c = U_{A2}/U_{A1} = \sqrt{3}U_{\phi 2}/(\sqrt{3}U_{\phi 1}) = k.$$

При соединении обмоток по схеме звезда — треугольник

$$c = U_{A2}/U_{A1} = U_{\phi 2}/(\sqrt{3}U_{\phi 1}) = k/\sqrt{3}.$$

При соединении обмоток по схеме треугольник — звезда

$$c = U_{A2}/U_{A1} = \sqrt{3}U_{\phi 2}/U_{\phi 1} = \sqrt{3}k.$$

Таким образом, при одном и том же числе витков обмоток трансформатора можно в $\sqrt{3}$ раза увеличить или уменьшить его коэффициент трансформации, выбирая соответствующую схему соединения обмоток.

Карточка № 7.5 (303)
Трехфазные трансформаторы

Сколько стержней должен иметь магнитопровод трехфазного трансформатора?	Один	7
	Два	2
	Три	83
Какие клеммы должны быть подсоединены к питающей сети, если трансформатор понижающий?	A, B, C	90
	a, b, c	19
	0, a, b, c	43
Число витков в каждой фазе первичной обмотки 1000, в каждой фазе вторичной обмотки 200. Линейное напряжение питающей цепи 1000 В. Определить линейное напряжение на выходе трансформатора	200 В	3
	5000 В	17
	Для решения задачи недостаточно данных	37
Решить предыдущую задачу при условии, что обмотки соединены по схеме звезда — треугольник	200/√3 В	89
	1000/√3 В	80
	Для решения задачи недостаточно данных	49
Решить предыдущую задачу при условии, что обмотки соединены по схеме треугольник — звезда	200/√3 В	38
	1000/√3 В	36
	200√3 В	4

§ 7.8. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Принципиальная схема автотрансформатора изображена на рис. 7.9. У автотрансформатора часть витков первичной обмотки используется в качестве вторичной обмотки, поэтому помимо магнитной связи имеется электрическая связь между первичной и вторичной цепями. В соответствии с этим

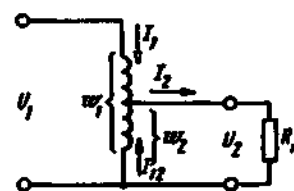


Рис. 7.9 Принципиальная схема автотрансформатора

7 я-шм

энергия из первичной цепи во вторичную передается как с помощью магнитного потока, замыкающегося по магнитопроводу, так и непосредственно по проводам.

Поскольку формула трансформаторной ЭДС применима к обмоткам автотрансформатора так же, как и к обмоткам трансформатора, коэффициент трансформации автотрансформатора выражается известными отношениями

$$k = w_2/w_1 = E_2/E_1 \approx U_2/U_1 \approx I_1/I_2.$$

Вследствие электрического соединения обмоток через часть витков, принадлежащую одновременно первичной и вторичной цепям, проходят токи I_1 и I_2 , которые направлены встречно и при небольшом коэффициенте трансформации мало отличаются друг от друга по значению. Поэтому их разность оказывается небольшой и обмотку w_2 можно выполнить из тонкого провода. Таким образом, при $k = 0,5 \div 2$ экономится значительное количество меди. При больших или меньших коэффициентах трансформации это преимущество автотрансформатора исчезает, так как та часть обмотки, по которой проходят встречные токи I_1 и I_2 , уменьшается до нескольких витков, а сама разность токов увеличивается.

Электрическое соединение первичной и вторичной цепей повышает опасность при эксплуатации аппарата, так как при пробое изоляции в понижающем автотрансформаторе оператор может оказаться под высоким напряжением первичной цепи.

Автотрансформаторы применяют для пуска мощных двигателей переменного тока, регулирования напряжения в осветительных сетях, а также в других случаях, когда необходимо регулировать напряжение в небольших пределах.

Измерительные трансформаторы напряжения и тока используют для включения измерительных приборов, аппаратуры автоматического регулирования и защиты в высоковольтные цепи. Они позволяют уменьшить размеры и массу измерительных устройств, повысить безопасность обслуживающего персонала, расширить пределы измерения приборов переменного тока.

Измерительные трансформаторы напряжения служат для включения вольтметров и обмоток напряжения измерительных приборов (рис. 7.10). Поскольку

эти обмотки имеют большое сопротивление и потребляют маленькую мощность, можно считать, что трансформаторы напряжения работают в режиме холостого хода.

Измерительные трансформаторы тока используют для включения амперметров и токовых катушек измерительных приборов (рис. 7.11). Эти катушки имеют очень маленькое сопротивление, поэтому трансформаторы тока практически работают в режиме короткого замыкания.

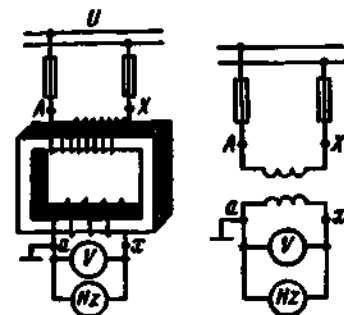


Рис. 7.10. Схема включения и условное обозначение измерительного трансформатора напряжения

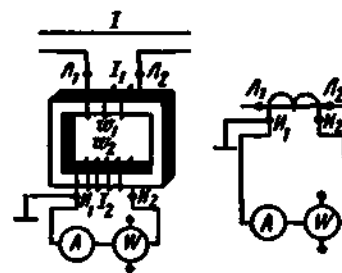


Рис. 7.11. Схема включения и условное обозначение измерительного трансформатора тока

Результирующий магнитный поток в магнитопроводе трансформатора равен разности магнитных потоков, создаваемых первичной и вторичной обмотками. В нормальных условиях работы трансформатора тока он невелик. Однако при размыкании цепи вторичной обмотки в сердечнике будет существовать только магнитный поток первичной обмотки, который значительно превышает разностный магнитный поток. Потери в сердечнике резко возрастут, трансформатор перегреется и выйдет из строя. Кроме того, на концах оборванной вторичной цепи появится большая ЭДС, опасная для работы оператора. Поэтому трансформатор тока нельзя включать в линию без подсоединенного к нему измерительного прибора. Для повышения безопасности обслуживающего персонала кожух измерительного трансформатора должен быть тщательно заземлен.

Карточка № 7.6 (221)
Автотрансформаторы и измерительные трансформаторы

Чем принципиально отличается автотрансформатор от трансформатора?	Малым коэффициентом трансформации	51
	Возможностью изменения коэффициента трансформации	40
	Электрическим соединением первичной и вторичной цепей	15
Коэффициент трансформации автотрансформатора $k=10$. а) Какая часть витков является общей для первичной и вторичной цепей? б) Какой ток в этих витках?	а) $0,1I_1$; б) $0,9 I_1$	68
	а) $0,9I_1$; б) $0,1I_1$	61
Какие устройства нельзя подключать к трансформатору напряжения?	Вольтметры, обмотки напряжения ваттметров, высокоомные обмотки реле	72
	Амперметры, токовые обмотки ваттметров, низкоомные обмотки реле	33
Какой прибор нельзя подключать к трансформатору тока?	Амперметр	44
	Реле с малым входным сопротивлением	12
	Вольтметр	53
	Ваттметр	76
На какие режимы работы рассчитаны: а) трансформатор напряжения; б) трансформатор тока?	а) Холостой ход; б) короткое замыкание	52
	а) Короткое замыкание; б) холостой ход	11
	Это зависит от подключенного измерительного прибора	41

§ 7.7. СВАРОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

К источникам питания сварочных аппаратов предъявляются специфические требования: при заданной мощности они должны создавать большие токи в нагрузке, причем резкое изменение сопротивления на-

грузки не должно существенно сказываться на значении сварочного тока.

Относительно невысокие напряжения при больших токах обеспечивают не только эффективное тепловыделение в сварочном контакте, но и безопасность сварщика, работающего обычно среди металлических конструкций с высокой электропроводностью.

В соответствии с рассмотренными требованиями сварочные трансформаторы обеспечивают понижение напряжения от 220 или 380 В до 60—70 В. Такое напряжение на зажимах вторичной обмотки устанавливается при холостом ходе сварочного трансформатора. В процессе сварки оно колеблется от максимального значения 60—70 В до значений, близких к нулю.

Сопротивление электрической дуги, возникающей при сварке, изменяется при перемещениях руки сварщика. Если бы напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора поддерживалось постоянным, возникли бы резкие колебания тока в цепи и регулировать тепловыделение было бы невозможно. Поэтому сварочный трансформатор устроен так, что при резком уменьшении сопротивления дуги ток в цепи увеличивается незначительно, а произведение $I^2 R$, определяющее количество теплоты, сохраняется на требуемом уровне.

В соответствии с законом Ома при резком уменьшении сопротивления и незначительном увеличении тока напряжение на дуге снижается. Сварочный трансформатор имеет крутопадающую внешнюю характеристику (рис. 7.12).

Сварочный трансформатор выдерживает короткие замыкания, возникающие в случае прикосновения электрода к сварочному шву. Ток короткого замыкания, как показывает внешняя характеристика, ограничен. Вторичная обмотка трансформатора рассчитана на достаточно длительное протекание этого тока.

При постоянном напряжении питающей сети быстрое снижение выходного напряжения трансформатора при незначительном возрастании тока может быть достиг-

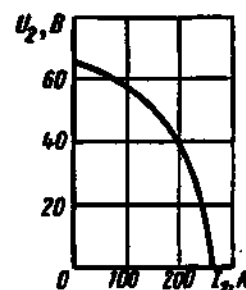


Рис. 7.12. Внешняя характеристика сварочного трансформатора

нуто только за счет увеличения внутреннего падения напряжения в обмотках трансформатора. Для этого нужно увеличить сопротивление обмоток.

Сварочные трансформаторы изготавливают с большим регулируемым индуктивным сопротивлением обмоток. При этом увеличивают не активное сопротивление проводов, а индуктивное сопротивление рассеяния обмоток, так как увеличение активного сопротивления привело бы к возрастанию потерь энергии и перегреву трансформатора.

Для увеличения индуктивного сопротивления рассеяния обмоток увеличивают поток рассеяния, вводя в магнитопровод трансформатора шунтирующий магнитопроводящий стержень, через который замыкается часть основного магнитного потока. Изменяя значение воздушного зазора в шунтирующем стержне, можно изменять магнитный поток рассеяния. Средний подвижный стержень, выполняющий функции магнитного шунта, предусмотрен, например, в конструкции отечественного сварочного трансформатора СТАН-1.

Применяют и другие способы изменения индуктивного сопротивления рассеяния обмоток. Так, в трансформаторе СТЭ в цепь вторичной обмотки включают специальный дроссель с регулируемым воздушным зазором, а в трансформаторе ТС-500 изменяют расстояние между первичной и вторичной обмотками.

Карточка № 7.7 (323)
Сварочные трансформаторы

Почему для сварки используют трансформаторы с крутопадающей внешней характеристикой?	Для получения на вторичной обмотке устойчивого напряжения 60—70 В	21
	Для ограничения тока короткого замыкания	6
Почему сварочный трансформатор рассчитывают на сравнительно небольшое вторичное напряжение? (Указать неверный ответ.)	Для повышения при заданной мощности сварочного тока	62
	Для улучшения условий безопасности сварщика	27
	Для получения крутопадающей внешней характеристики	60

Продолжение

Почему для получения крутопадающей внешней характеристики целесообразно увеличивать индуктивное, а не активное сопротивление трансформатора?	По конструктивным соображениям	86
	Для уменьшения тепловых потерь	94
Как изменяют индуктивное сопротивление рассеяния обмоток в трансформаторе СТАН-1?	Изменением воздушного зазора в дросселе	57
	Изменением рассеяния за счет изменения расстояния между обмотками	28
	Изменением воздушного зазора в магнитном шунте	93
Какие однофазные сварочные трансформаторы выпускаются отечественной промышленностью?	СТЭ	84
	СТАН-1; ТС-500	67
	Все перечисленные выше	70

ГЛАВА 8

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 8.1. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Вращающееся магнитное поле двухфазного тока. Рассмотрим образование вращающегося магнитного поля на примере двухфазного синусоидального тока и двух катушек, сдвинутых в пространстве одна относительно другой на угол 90° .

Катушка 1 создает магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны ее плоскости. На рис. 8.1 это магнитное поле представлено вектором магнитной индукции B_1 . Магнитное поле катушки 2 характеризуется вектором магнитной индукции B_2 . К катушке 1 подводится синусоидальный ток $i_1 = I_m \sin \omega t$, к катушке 2 — ток

$$i_2 = I_m \sin (\omega t + \pi/2) = I_m \cos \omega t.$$

Индукция магнитного поля пропорциональна создающему его току; следовательно,

$$B_1 = B_m \sin \omega t;$$

$$B_2 = B_m \cos \omega t.$$

Магнитные поля катушек, налагаясь друг на друга, образуют результирующее поле. Модуль вектора ин-

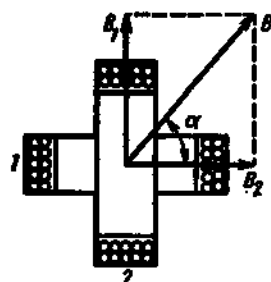


Рис. 8.1. Образование вращающегося магнитного поля с помощью двух катушек

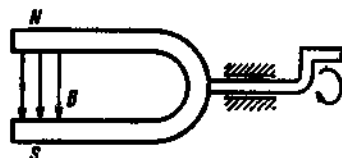


Рис. 8.2. Модель вращающегося магнитного поля

дукции результирующего магнитного поля определим из векторной диаграммы по теореме Пифагора:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = \sqrt{B_m^2 \sin^2 \omega t + B_m^2 \cos^2 \omega t} = B_m.$$

Таким образом, индукция результирующего магнитного поля оказывается не зависящей от времени величиной, равной максимальному значению индукции поля одной катушки. Это значит, что магнитные поля первой и второй катушек меняются так согласованно, что результирующее поле остается постоянным по значению.

Направление силовых линий результирующего магнитного поля характеризуется направлением вектора B , который образует угол α с горизонтальной осью, определяемой из выражения

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_1}{B_2} = \frac{B_m \sin \omega t}{B_m \cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t.$$

Отсюда $\alpha = \omega t$, т. е. вектор B вращается против часовой стрелки с угловой скоростью ω , равной угловой скорости синусоидального тока.

Результирующее магнитное поле катушек можно представить как поле постоянного магнита, который

поворачивается в пространстве (рис. 8.2). Такое поле называют вращающимся. Нетрудно убедиться, что результирующее магнитное поле катушек будет вращаться в обратную сторону, если поменять фазы токов.

Карточка № 8.1 (129)
Вращающееся магнитное поле двухфазного тока

Каков сдвиг фаз между токами в двухфазной и трехфазной системах?	90° и 90°	73
	90° и 120°	4
	180° и 120°	84
	120° и 90°	115
Можно ли получить магнитное поле с постоянной по значению индукцией, складывая периодически изменяющиеся магнитные поля?	Можно	79
	Нельзя	48
Через две катушки, сдвинутые в пространстве на угол 90°, проходят токи $i_1 = 10 \sin 314 t$; $i_2 = 10 \cos 314 t$. Определить частоту вращения результирующего магнитного поля	314 рад/с	107
	314 об/с	61
	Для решения задачи недостаточно данных	54
Две катушки, сдвинутые в пространстве друг относительно друга на угол 90°, питаются двухфазным током. Частота тока 50 Гц. Найти частоту вращения результирующего магнитного поля	314 рад/с	114
	314 об/с	69
	Для решения задачи недостаточно данных	36
Как изменить направление вращения результирующего магнитного поля?	Это невозможно	7
	Изменить порядок следования фаз токов	25

Графическое пояснение процесса образования вращающегося магнитного поля. Изобразим графически с помощью магнитных силовых линий поле двух рассмотренных катушек.

На рис. 8.3 схематически изображен цилиндрический магнитопровод, в пазах которого размещены катушки $AХ$ и $ВУ$. Буквами A и B обозначены начала, X и Y — концы катушек. По катушке $AХ$ проходит ток i_A , изменяющийся по синусоидальному закону, по катушке $ВУ$ — ток i_B , изменяющийся по косинусои-

дальному закону. Будем считать положительным ток, проходящий от начала катушки к ее концу.

При $t=0$ ток i_A в катушке $AХ$ отсутствует, а ток i_B в катушке $ВУ$ положителен. Силовые линии, определенные по правилу буравчика, выходят из верхней

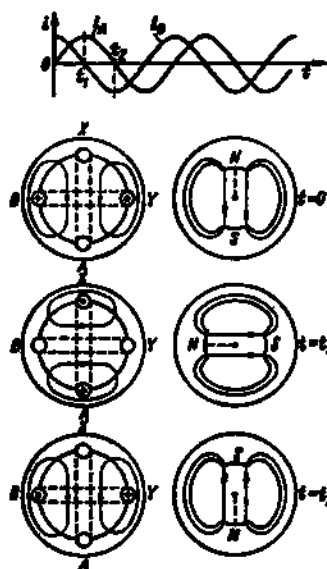


Рис. 8.3. Образование двух-полюсного вращающегося магнитного поля

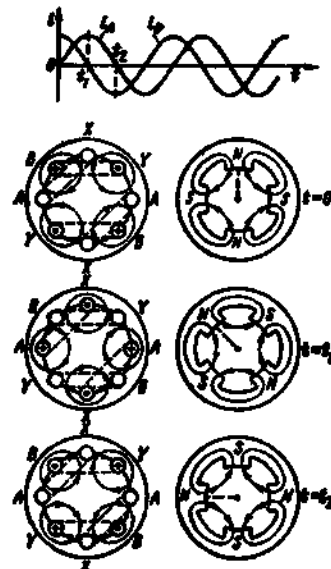


Рис. 8.4. Образование четырехполюсного вращающегося магнитного поля

части магнитопровода и направлены в нижнюю часть аналогично силовым линиям постоянного магнита, изображенного справа, у которого северный полюс расположен вверху, а южный — внизу.

При $t=t_1$ ток $i_B=0$, а ток $i_A>0$. Силовые линии магнитного поля токов аналогичны силовым линиям постоянного магнита, у которого северный полюс расположен слева, а южный — справа.

При $t=t_2$ ток $i_A=0$, а ток $i_B<0$. В этом случае силовые линии магнитного поля токов аналогичны силовым линиям постоянного магнита, у которого северный полюс расположен внизу, а южный — вверху.

Продолжив рассмотрение процессов изменения токов и магнитных потоков для других моментов

времени, нетрудно убедиться, что за половину периода тока магнитное поле повернется на 180° , а за период сделает полный оборот. Следовательно, число оборотов вращающегося магнитного поля в секунду равно частоте тока f .

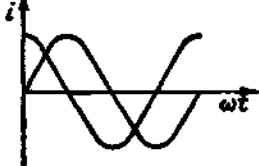
Частоту вращения магнитного поля принято выражать числом оборотов в минуту. Тогда $n_1=60f$.

Чтобы понять принцип получения многополюсных вращающихся полей, обратимся к рис. 8.4. Здесь схематически изображен магнитопровод, разделенный на две половины, в каждой из которых размещены катушки $AХ$ и $ВУ$. Таким образом, устройство имеет две катушки $AХ$, через которые проходит ток i_A , и две катушки $ВУ$, через которые проходит ток i_B .

Проводя аналогичные рассуждения, устанавливаем, что магнитное поле токов аналогично полю четырехполюсного постоянного магнита, причем в течение половины периода тока поле делает только четверть оборота, а полный оборот совершает за два периода. Таким образом, если в два раза увеличить число пар полюсов, то частота вращения поля уменьшится в два раза. Легко показать, что увеличение числа пар полюсов в три раза уменьшило бы частоту вращения поля в три раза, т. е. в общем случае $n_1=60f/p$, где p — число пар полюсов. При $p=1$ эта формула совпадает с предыдущей.

Карточка № 8.1а (237)

Графическое пояснение процесса образования вращающегося магнитного поля

Чему равны токи i_A и i_B в моменты времени: а) $t=T/4$; б) $t=T/2$ (T — период тока)? 	а) $i_A=0$; $i_B=-I_m$; б) $i_A=-I_m$; $i_B=0$	196
	а) $i_A=I_m$; $i_B=0$; б) $i_A=0$; $i_B=-I_m$	197
	а) $i_A=0$; $i_B=I_m$; б) $i_A=-I_m$; $i_B=0$	95
	а) $i_A=I_m$; $i_B=-I_m$; б) $i_A=0$; $i_B=0$	210
Каким правилом определяется направление силовых линий магнитного поля, возникающего вокруг проводника с током?	Правилем левой руки	215
	Правилем правой руки	190
	Правилем буравчика	32

Что называется северным полюсом магнита?	Полюс, в который входят магнитные силовые линии	141
	Полюс, из которого выходят магнитные силовые линии	6
На какой угол повернется за четверть периода: а) двухполюсное вращающееся поле; б) четырехполюсное вращающееся магнитное поле?	а) 90°; б) 45°	15
	а) 180°; б) 90°	143
	а) 45°; б) 90°	128
	а) 360°; б) 180°	9
Частота $f=500$ Гц. Определить частоту вращения: а) двухполюсного; б) четырехполюсного вращающегося магнитного поля	а) 60 000 об/мин; б) 30 000 об/мин	35
	а) 30 000 об/мин; б) 15 000 об/мин	89
	а) 30 000 об/мин; б) 60 000 об/мин	59

Вращающееся магнитное поле трехфазного тока. Для создания вращающегося магнитного поля с помощью трехфазной системы токов нужны три катушки, сдвинутые в пространстве на 120° одна относительно другой (рис. 8.5).

Магнитная индукция, создаваемая при этом каждой катушкой, пропорциональна соответствующему току:

$$\begin{aligned} B_1 &= B_m \sin \omega t; \\ B_2 &= B_m \sin (\omega t - 120^\circ); \\ B_3 &= B_m \sin (\omega t + 120^\circ). \end{aligned}$$

Выберем произвольное направление, повернутое на угол α относительно вектора магнитной индукции B_1 (пунктирная ось), и найдем вектор результирующей магнитной индукции в этом направлении. С этой целью сложим проекции векторов B_1, B_2, B_3 на выбранное направление:

$$B = B_1 \cos \alpha + B_2 \cos (120^\circ - \alpha) + B_3 \cos (120^\circ + \alpha).$$

Подставим в это соотношение выражения для B_1, B_2, B_3 :

$$B = B_m \sin \omega t \cos \alpha + B_m \sin (\omega t - 120^\circ) \cos (120^\circ - \alpha) + B_m \sin (\omega t + 120^\circ) \cos (120^\circ + \alpha).$$

После тригонометрических преобразований получим

$$B = \frac{B_m}{2} [\sin (\omega t - \alpha) + \sin (\omega t - \alpha) + \sin (\omega t - \alpha)] + \frac{B_m}{2} \times [\sin (\omega t + \alpha) + \sin (\omega t + \alpha - 240^\circ) + \sin (\omega t + \alpha + 240^\circ)].$$

Синусоидально изменяющиеся величины в последней квадратной скобке можно представить системой

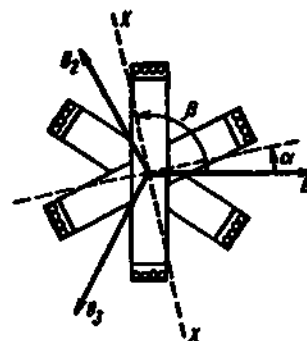


Рис. 8.5. Образование вращающегося магнитного поля с помощью трех катушек

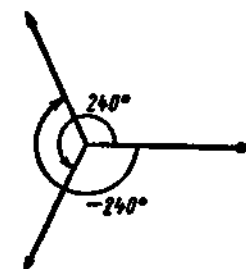


Рис. 8.6. Система трех векторов, сумма которых равна нулю

векторов, изображенной на рис. 8.6. Нетрудно убедиться, что сумма этих векторов равна нулю. Таким образом, $B = \frac{3B_m}{2} \sin (\omega t - \alpha)$. Пусть угол $\beta = \alpha + 90^\circ$ (см. рис. 10.5).

Тогда $B = \frac{3B_m}{2} \sin (\omega t - \beta + 90^\circ)$. При $\beta = \omega t$ получим $B = 3B_m/2$, т. е. магнитная индукция вдоль оси XX максимальна, а сама ось XX вращается с угловой частотой ω .

Направление вращения поля определяется порядком следования фаз. Для изменения направления вращения поля достаточно поменять местами любые две фазы из трех.

В заключение отметим, что для получения неискаженного вращающегося магнитного поля система катушек должна быть полностью симметричной, а токи должны быть строго одинаковыми по амплитуде и частоте и сдвинутыми по фазе на 120° один относительно другого.

Карточка № 8.16 (288)
Вращающееся магнитное поле трехфазного тока

Можно ли с помощью токов $i_1 = I_m \sin \omega t$; $i_2 = I_m \sin (\omega t + 120^\circ)$; $i_3 = I_m \sin (\omega t - 120^\circ)$ получить вращающееся магнитное поле?	Можно	30
	Нельзя	99
Сколько катушек, через которые проходит трехфазный ток, необходимо иметь для получения шестиполюсного вращающегося магнитного поля?	3	102
	6	146
	9	82
	Получить такое поле невозможно	222
Через шесть катушек, сдвинутых в пространстве одна относительно другой на 60° , проходит трехфазный ток частотой 500 Гц. Определить частоту вращающегося магнитного поля	18 000 об/мин	72
	30 000 об/мин	218
	60 000 об/мин	214
Магнитное поле трехфазного тока частотой 50 Гц вращается с частотой 3000 об/мин. Сколько полюсов имеет это поле?	2	17
	3	184
	6	179
Как изменить направление вращения магнитного поля трехфазного тока?	Это невозможно	170
	Нужно поменять местами все три фазы	138
	Нужно поменять местами две любые фазы	87

§ 8.2. УСТРОЙСТВО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Асинхронный двигатель является простейшей из электрических машин. Как и любая электрическая машина, он имеет две основные части: статор и ротор.

Статор (рис. 8.7) состоит из чугунной станины 1, в которой закреплен магнитопровод 2 в виде полого

цилиндра. Между станиной и сердечником обычно оставляют зазор, через который проходит охлаждающий воздух. Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод набирают из тонких (0,5 мм) листов электротехнической стали, изолированных друг от друга лаком. В пазы, вырезанные по внутренней окружности статора, укладывают обмотку 3. У двухполюсной машины обмотка статора состоит из трех катушек, сдвинутых на углы 120° , у четырехполюсной — из шести катушек, сдвинутых на 60° , у шестиполюсной — из девяти катушек и т. д. Обмотку в пазах статора закрепляют клиньями.

Ротор также набирают из тонких листов электротехнической стали. В пазах ротора размещают обмотку, которая может быть короткозамкнутой или фазной (рис. 8.8). Короткозамкнутая обмотка типа

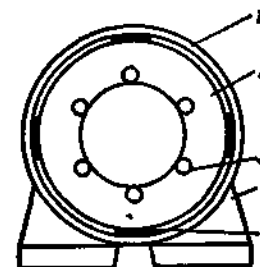


Рис. 8.7. Конструкция статора асинхронного двигателя:
1 — станина; 2 — сердечник; 3 — обмотка; 4 — лапа; 5 — прокладка

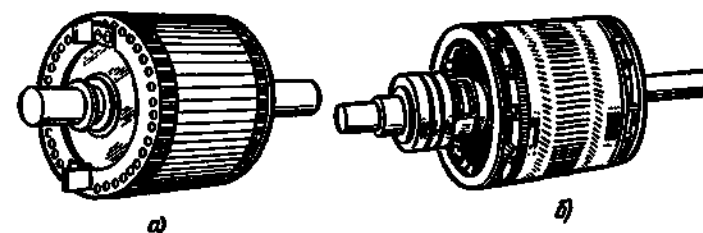


Рис. 8.8. Общий вид ротора асинхронного двигателя с короткозамкнутой (а) и фазной (б) обмотками

«беличья клетка» изображена на рис. 8.9. Она состоит из толстых проводящих стержней (медь, алюминий), соединенных по торцам медными или алюминиевыми кольцами. Короткозамкнутая обмотка не изолируется от ротора. Иногда ее изготовляют заливкой расплавленного алюминия в пазы ротора.

Устройство фазной обмотки ротора аналогично устройству обмотки статора. Концы фазной обмотки

ротора соединяют с контактными кольцами и через щетки соединяют с регулировочными или пусковыми реостатами 3 (рис. 8.10). Контактные кольца 1, изготовленные из латуни или меди, укрепляют на валу двигателя с помощью изолирующих прокладок. Щеткодержатель с угольными или медно-графитовыми щетками 2 крепят на подшипниковом щите.

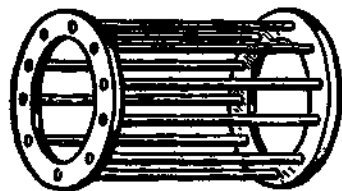


Рис. 8.9. Общий вид короткозамкнутой обмотки типа «беличья клетка»

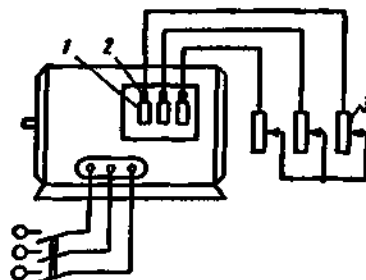


Рис. 8.10. Схема соединения фазной обмотки ротора с регулировочными реостатами: 1 — контактные кольца, 2 — щетки, 3 — реостаты

Общий вид асинхронного двигателя показан на рис. 8.11.

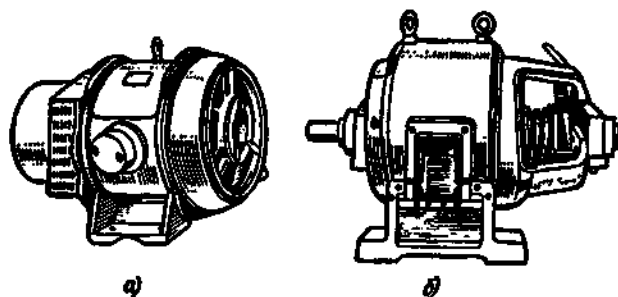


Рис. 8.11. Общий вид асинхронного двигателя с короткозамкнутой (а) и фазной (б) обмотками ротора

Карточка № 8.2 (184) Устройство асинхронного двигателя

Назовите основные части асинхронного двигателя	Станина, магнитопровод, обмотка статора, ротор	112
	Станина, магнитопровод, ротор, обмотка ротора	23
Почему магнитопровод набирают из тонких листов электротехнической стали, изолированных лаком друг от друга?	Для уменьшения потерь на вихревые токи	110
	Для уменьшения потерь на перемагничивание	3
Какие материалы используют для изготовления короткозамкнутой обмотки ротора?	Алюминий	74
	Алюминий, медь	177
	Медь, серебро	92
Чем отличается двигатель с фазным ротором от двигателя с короткозамкнутым ротором?	Наличием контактных колец и щеток	153
	Наличием пазов для охлаждения	83
	Числом катушек статора	116
С какой целью двигатель с фазным ротором снабжают контактными кольцами и щетками?	Для подключения двигателя к сети	120
	Для соединения ротора с регулировочными реостатами	132

§ 8.3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ РАСКРУЧИВАНИИ РОТОРА

Принцип действия асинхронного двигателя основан на использовании вращающегося магнитного поля и основных законов электротехники.

При включении двигателя в сеть трехфазного тока в статоре образуется вращающееся магнитное поле, силовые линии которого пересекают стержни или катушки обмотки ротора. При этом, согласно закону электромагнитной индукции, в обмотке ротора индукци-

руется ЭДС, пропорциональная частоте пересечения силовых линий. Под действием индуцированной ЭДС в короткозамкнутом роторе возникают значительные токи.

В соответствии с законом Ампера на проводники с током, находящиеся в магнитном поле, действуют механические силы, которые по принципу Ленца стремятся устранить причину, вызывающую индуцированный ток, т. е. пересечение стержней обмотки ротора силовыми линиями вращающегося поля. Таким образом, возникшие механические силы будут раскручивать ротор в направлении вращения поля, уменьшая скорость пересечения стержней обмотки ротора магнитными силовыми линиями.

Достичь частоты вращения поля в реальных условиях ротор не может, так как тогда стержни его обмотки оказались бы неподвижными относительно магнитных силовых линий и индуцированные токи в обмотке ротора исчезли бы. Поэтому ротор вращается с частотой, меньшей частоты вращения поля, т. е. несинхронно с полем, или асинхронно.

Если силы, тормозящие вращение ротора, невелики, то ротор достигает частоты, близкой к частоте вращения поля. При увеличении механической нагрузки на валу двигателя частота вращения ротора уменьшается, токи в обмотке ротора увеличиваются, что приводит к увеличению вращающего момента двигателя. При некоторой частоте вращения ротора устанавливается равновесие между тормозным и вращающим моментами.

Карточка № 8.3 (213)

Принцип действия асинхронного двигателя.

Физические процессы, происходящие при раскручивании ротора

Какова частота пересечения силовыми линиями магнитного поля стержней обмотки неподвижного ротора?	Максимальна	124
	Минимальна	65
	Равна нулю	45
Какова частота пересечения силовыми линиями магнитного поля стержней обмотки ротора двигателя в режиме холостого хода?	Максимальна	49
	Минимальна	224
	Равна нулю	60

Продолжение

Может ли ротор асинхронного двигателя раскрутиться до частоты вращения магнитного поля?	Может	161
	Не может	55
Как изменится ток в обмотке ротора при увеличении механической нагрузки на валу двигателя?	Увеличится	158
	Не изменится	8
	Уменьшится	20
Чему был бы равен ток в обмотке ротора, если бы ротор вращался с частотой вращения магнитного поля?	Максимально возможному значению	129
	Нулю	52

§ 8.4. СКОЛЬЖЕНИЕ И ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ РОТОРА

Обозначим через n_2 частоту вращения ротора асинхронного двигателя. Было установлено, что $n_2 < n_1$.

Частоту вращения магнитного поля относительно ротора, т. е. разность $n_1 - n_2$, называют скольжением. Обычно скольжение выражают в долях частоты вращения поля и обозначают буквой s :

$$s = (n_1 - n_2) / n_1.$$

Скольжение зависит от нагрузки двигателя. При номинальной нагрузке его значение составляет около 0,05 у машин небольшой мощности и около 0,02 у мощных машин.

Из последнего равенства находим, что $n_2 = (1 - s)n_1$.

После преобразования получаем выражение частоты вращения двигателя, удобное для дальнейших рассуждений: $n_2 = (1 - s) \frac{60f}{p}$.

Поскольку при нормальном режиме работы двигателя скольжение невелико, частота вращения двигателя мало отличается от частоты вращения поля.

На практике скольжение часто выражают в процентах: $b = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100$.

У большинства асинхронных двигателей скольжение колеблется в пределах 2—5%.

Скольжение является одной из важнейших характеристик двигателя; через него выражаются ЭДС и ток ротора, вращающий момент, частота вращения ротора.

При неподвижном ($n_2=0$) роторе $s=1$. Таким скольжением обладает двигатель в момент пуска.

Как отмечалось, скольжение зависит от момента нагрузки на валу двигателя; следовательно, и частота вращения ротора зависит от тормозного момента на валу. Номинальное значение частоты вращения ротора n_2 , соответствующее расчетным значениям нагрузки, частоты и напряжения сети, указывается на заводском щитке асинхронного двигателя.

Асинхронные машины, как и другие электрические машины, обратимы. При $0 < s \leq 1$ машина работает в режиме двигателя, частота вращения ротора n_2 меньше или равна частоте вращения магнитного поля статора n_1 . Но если внешним двигателем раскрутить ротор до частоты вращения, большей синхронной частоты: $n_2 > n_1$, то машина перейдет в режим работы генератора переменного тока. При этом скольжение станет отрицательным, а механическая энергия приводного двигателя будет превращаться в электрическую энергию.

Асинхронные генераторы переменного тока практически не применяются.

Карточка № 8.4 (174)

Скольжение и частота вращения ротора

Частота вращения магнитного поля 3000 об/мин. Частота вращения ротора 2940 об/мин. Определить скольжение	2 %	68
	Для решения задачи недостаточно данных	185
	20 %	216
По трем катушкам обмотки статора проходит трехфазный ток частотой 500 Гц. Частота вращения ротора 28 500 об/мин. Определить скольжение	Для решения задачи недостаточно данных	226
	5 %	37
	20 %	176
Найти частоту вращения ротора, если $s=0,05$; $p=1$; $f=50$ Гц	3000 об/мин	169
	1425 об/мин	165
	2850 об/мин	26
Вращающееся магнитное поле статора является шестиполосным. Найти частоту вращения ротора, если $s=0,05$; $f=50$ Гц	2850 об/мин	159
	1425 об/мин	127
	950 об/мин	10

Как изменится скольжение, если увеличить момент механической нагрузки на валу двигателя?	Увеличится	33
	Не изменится	63
	Уменьшится	142

§ 8.5. ВЛИЯНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ НА ЭДС В ОБМОТКЕ РОТОРА

Условия индуцирования ЭДС в обмотках трансформатора и асинхронной машины одинаковы. Действительно, в трансформаторе витки обмотки пересекаются переменным магнитным потоком, сохраняющим свое направление в пространстве. В асинхронной машине витки обмотки пересекаются постоянным, но вращающимся магнитным потоком. С точки зрения закона электромагнитной индукции следует отметить, что в обоих случаях магнитный поток, сцепленный с каждым витком обмотки, изменяется во времени по синусоидальному закону.

К асинхронным машинам полностью применима формула для трансформаторной ЭДС.

Пока ротор асинхронного двигателя неподвижен, его обмотка пересекается вращающимся магнитным полем с частотой n_1 .

Обозначим действующее значение ЭДС одной фазы неподвижного ротора E_{2n} . Тогда формула для трансформаторной ЭДС примет вид

$$E_{2n} = 4,44 w_2 k_2 f_1 \Phi,$$

где w — число витков одной фазы обмотки ротора; k_2 — обмоточный коэффициент ротора; f_1 — частота тока питающей сети; Φ — вращающийся магнитный поток.

Обмоточный коэффициент всегда меньше единицы и в современных асинхронных машинах составляет 0,85—0,95. Он обусловлен тем, что в машине переменного тока витки обмотки распределены по внутренней поверхности статора и не одновременно пересекаются магнитным потоком. Поэтому ЭДС отдельных витков сдвинуты по фазе относительно друг друга и складываются не арифметически, как в трансформаторе, а геометрически (рис. 8.12).

При неподвижном роторе частота индуцируемой

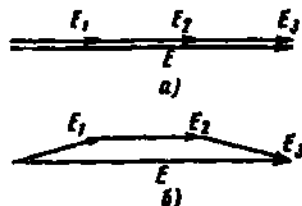


Рис. 8.12. Сложение ЭДС отдельных витков в трансформаторе (а) и в машине переменного тока (б)

в его обмотке ЭДС равна частоте сети f_1 . По мере раскручивания ротора скорость ($n_1 - n_2$) пересечения витков обмотки вращающимся магнитным полем уменьшается, а следовательно, уменьшается частота ЭДС в обмотке ротора:

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60}$$

Чтобы ввести скольжение в выражение для f_2 , умножим числитель и знаменатель на n_1 :

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)n_1}{60n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \frac{pn_1}{60} = sf_1.$$

Таким образом, частота ЭДС в обмотке ротора прямо пропорциональна скольжению.

Теперь можно записать выражение для ЭДС обмотки ротора в общем случае:

$$E_2 = 4,44\omega_2 k_2 f_2 \Phi = 4,44\omega_2 k_2 s f_1 \Phi.$$

Сравним выражения для E_{2n} и E_2 , найдем, что $E_2 = sE_{2n}$.

ЭДС E_2 , индуцируемая в обмотке ротора вращающимся магнитным полем, прямо пропорциональна скольжению двигателя.

Карточка № 8.5 (204)
Влияние скольжения на ЭДС в обмотке ротора

Можно ли использовать асинхронный двигатель в качестве трансформатора?	Можно	57
	Нельзя	111
Ротор асинхронного двигателя неподвижен. Как изменится ЭДС, индуцируемая в обмотке ротора, при увеличении в 2 раза частоты тока питающей сети?	Не изменится	151
	Увеличится в 2 раза	147
	Увеличится в 4 раза	134
Частота вращения ротора асинхронного двигателя относительно вращающегося магнитного поля 60 об/мин. Определить частоту тока в обмотке ротора при $p=1$	60 Гц	86
	1 Гц	18
	Для решения задачи недостаточно данных	40

Продолжение

Частота тока питающей сети 50 Гц. Ротор асинхронного двигателя вращается со скольжением, равным 2 %. Найти частоту тока в обмотке ротора	50 Гц	77
	1 Гц	81
	Для решения задачи недостаточно данных	31
При скольжении 2 % в одной фазе обмотки ротора индуцируется ЭДС 1 В. Чему будет равна эта ЭДС, если ротор остановить?	0	90
	1 В	193
	50 В	201

§ 8.6. ЗАВИСИМОСТЬ ЗНАЧЕНИЯ И ФАЗЫ ТОКА ОТ СКОЛЬЖЕНИЯ И ЭДС РОТОРА

В трансформаторе ЭДС вторичной обмотки создает напряжения на нагрузке и преодолевает внутреннее падение напряжения. В асинхронном двигателе обмотка ротора замкнута накоротко, поэтому ЭДС E_2 расходуется в собственном активном и индуктивном сопротивлениях обмотки.

В двигателе с фазным ротором активное сопротивление обмотки ротора может изменяться за счет включения регулировочных реостатов. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора определяется по известной формуле $X_2 = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 L_2$ и зависит от скольжения. Действительно, $f_2 = sf_1$; $X_2 = 2\pi sf_1 L_2 = s\omega_1 L_2$.

Величина $\omega_1 L_2$ представляет собой индуктивное сопротивление обмотки неподвижного ротора X_{2n} ; следовательно, $X_2 = sX_{2n}$.

На основании закона Ома для цепи переменного тока можно написать

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}.$$

Здесь E_2 и X_2 изменяются при изменении частоты вращения двигателя. Целесообразно выразить ток через неизменные величины и скольжение:

$$I_2 = \frac{sE_{2n}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{2n})^2}} = \frac{E_{2n}}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_{2n}^2}}.$$

Отсюда видно, что ток в обмотке неподвижного ротора ($s=1$) имеет наибольшее значение:

$$I_{2n} = \frac{E_{2n}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2n}^2}}$$

По мере раскручивания ротора скольжение уменьшается, стремясь к нулю, ток в роторе также уменьшается и при синхронной частоте вращения становится равным нулю: $s=0$, $I_2=0$.

Сдвиг фаз между током и ЭДС ротора может быть определен по его тангенсу: $\operatorname{tg} \varphi_2 = X_2/R_2 = sX_{2n}/R_2$.

Величины $X_{2n} = \omega_1 L_2$ и R_2 не зависят от частоты вращения двигателя, поэтому $\operatorname{tg} \varphi_2$ пропорционален скольжению двигателя.

При неподвижном роторе (в момент пуска), когда $s=1$, ток и ЭДС ротора сдвинуты по фазе на максимальный угол: $\operatorname{tg} \varphi_2 = X_{2n}/R_2$.

По мере раскручивания ротора сдвиг фаз между I_2 и E_2 уменьшается. При $s=0$ $\operatorname{tg} \varphi_2 = 0$.

Для определения φ_2 можно воспользоваться также формулой

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{2n})^2}}$$

Карточка № 8.6 (190)

Зависимость значения и фазы тока от скольжения и ЭДС ротора

Активное и индуктивное сопротивления фазы обмотки неподвижного ротора равны 10 Ом каждое. Чему равны их значения при скольжении, равном 10 %?	$R_2 = 10 \text{ Ом}; X_2 = 10 \text{ Ом}$	187
	$R_2 = 1 \text{ Ом}; X_2 = 10 \text{ Ом}$	149
	$R_2 = 10 \text{ Ом}; X_2 = 1 \text{ Ом}$	135
В предыдущем случае в фазе обмотки неподвижного ротора индуцируется ЭДС $100 \sqrt{2}$ В. Чему равен ток?	1 А	108
	10 А	14
	$10 \sqrt{2}$ А	2
Как будет изменяться ток в обмотке ротора по мере раскручивания ротора?	Увеличится	12
	Уменьшится	130
	Останется неизменным	157
Чему равен сдвиг фаз между ЭДС и током в обмотке неподвижного ротора с параметрами, указанными выше?	45°	167
	0	173
	Для ответа на вопрос недостаточно данных	122

Продолжение

Как будет изменяться сдвиг фаз между ЭДС и током в обмотке ротора по мере раскручивания ротора?	Увеличится	53
	Уменьшится	44
	Останется неизменным	91

§ 8.7. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Вращающий момент любого электрического двигателя создается в результате взаимодействия магнитного поля и проводников с током. В двигателе постоянного тока вращающий момент выражается формулой

$$M = c_M I \Phi.$$

В асинхронном двигателе вращающий момент выражается аналогичной формулой. Нужно только установить, какое значение тока должно быть использовано. Полный ток I_2 в обмотке ротора состоит из активной $I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2$ и реактивной $I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2$ составляющих. Допустим, что активная составляющая тока ротора равна нулю. Тогда, несмотря на наличие ЭДС E_2 и тока I_2 в обмотке ротора, активная мощность этой обмотки была бы равна нулю. Но ротор, не потребляющий активной мощности, не может создавать вращающего момента, так как момент $M = P/\omega$ и равен нулю при $P=0$. Следовательно, реактивная составляющая тока ротора не участвует в создании вращающего момента и можно написать $M = c \Phi I_2 \cos \varphi_2$, т. е. вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален результирующему магнитному потоку и активной составляющей тока в обмотке ротора. Коэффициент пропорциональности c зависит от конструктивных параметров двигателя.

Необходимо установить, как зависит вращающий момент от скольжения двигателя. Подставим в формулу для момента значения I_2 и $\cos \varphi_2$:

$$M = c \Phi \frac{sE_{2n}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{2n})^2}} \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{2n})^2}} = c \Phi \frac{E_{2n} R_2}{R_2^2/s + sX_{2n}^2}.$$

Как и следовало ожидать, при $S=0$ вращающий момент исчезает. При $S=\infty$ вращающий момент также обращается в нуль. Таким образом, с увели-

чением скольжения от нуля вращающий момент увеличивается, достигает максимума, а с дальнейшим возрастанием s до бесконечности снова стремится к нулю. Задаваясь различными значениями скольжения, можно построить график зависимости $M(s)$, который представлен на рис. 8.13. На графике выделены три момента: номинальный вращающий момент M_n , максимальный момент $M_{\max}$ и пусковой момент

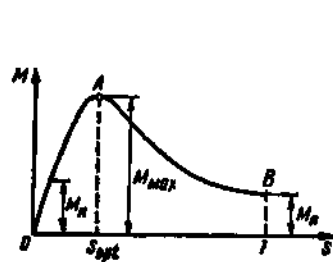


Рис. 8.13. Зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от скольжения

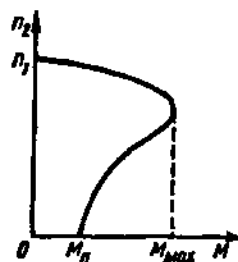


Рис. 8.14. Механическая характеристика асинхронного двигателя

M_n . Номинальный момент обычно соответствует скольжению $s=3\div 5\%$, максимальный момент — $s=10\div 14\%$ (это скольжение называют оптимальным — s_{opt}), пусковой момент — $s=100\%$. Обычно асинхронный двигатель рассчитывают так, чтобы максимальный момент в 2—3 раза превышал номинальный, а пусковой момент примерно был равен номинальному. Небольшое значение пускового момента — один из существенных недостатков асинхронного двигателя.

Кривая $M(s)$ разделена на два участка: OA и AB . Участок от точки O до точки A соответствует устойчивым режимам работы асинхронного двигателя: с увеличением момента нагрузки частота вращения двигателя замедляется, скольжение увеличивается и, как видно из графика, возрастает вращающий момент. Новое положение равновесия достигается, когда вращающий момент становится равным тормозному. При этом двигатель устойчиво вращается с уменьшенной частотой.

Участок AB соответствует неустойчивым режимам работы двигателя: с увеличением момента нагрузки скольжение увеличивается, вращающий момент

уменьшается, скольжение возрастает еще больше и т. д. Двигатель останавливается и начинает быстро нагреваться, так как при $s=1$ его пусковой ток в 6—7 раз превышает номинальное значение.

Зависимость частоты вращения двигателя n_2 от момента на валу M при постоянных напряжении питания и частоте сети называют механической характеристикой (рис. 8.14). Она может быть снята экспериментально и легко получена на основании графика $M(s)$. С увеличением момента нагрузки частота вращения двигателя уменьшается незначительно. Если момент нагрузки превысит максимальный, то частота вращения двигателя лавинообразно уменьшится до нуля.

Частота вращения асинхронного двигателя зависит от напряжения питания. Можно показать, что вращающий момент M пропорционален квадрату напряжения питания. Поэтому даже небольшие колебания напряжения питания приводят к заметному изменению вращающего момента и частоты вращения двигателя.

Карточка № 8.7 (168)
Вращающий момент асинхронного двигателя

Как изменится вращающий момент асинхронного двигателя при увеличении скольжения от 0 до 1?	Увеличится	199
	Уменьшится	191
	Сначала увеличится, затем уменьшится	29
	Сначала уменьшится, затем увеличится	155
Что произойдет, если тормозной момент на валу асинхронного двигателя превысит максимально допустимый вращающий момент?	Скольжение уменьшится до нуля	131
	Скольжение увеличится до 1	21
	Скольжение будет равно оптимальному значению	119
Чему равен вращающий момент асинхронного двигателя при: а) $s=0$; б) $s=1$?	а) 0; б) M_n	28
	а) 0; б) 0	117
	а) M_n ; б) 0	42

Чему равен вращающий момент асинхронного двигателя при $s = s_{\text{опт}}$?	0	56
	$M_{\text{н}}$	162
	$M_{\text{в}}$	171
	$M_{\text{мак}}$	70
Напряжение на зажимах асинхронного двигателя уменьшилось в 2 раза. Как изменился его вращающий момент?	Не изменился	208
	Уменьшился в 2 раза	209
	Уменьшился в 4 раза	220

§ 8.8. ВЛИЯНИЕ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТКИ РОТОРА НА ФОРМУ ЗАВИСИМОСТИ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА ОТ СКОЛЬЖЕНИЯ

Для изучения особенностей пуска асинхронного двигателя и регулирования его частоты вращения полезно исследовать, каким образом активное сопротивление обмотки ротора влияет на форму зависимости $M(s)$.

Было установлено, что зависимость вращающего момента от скольжения выражается формулой

$$M = c\Phi \frac{E_{2\text{н}}R_2}{R_2^2/s + sX_{2\text{н}}^2}.$$

Вращающий момент M достигает максимума, когда знаменатель выражения $R_2^2/s + sX_{2\text{н}}^2$ достигает минимума.

Знаменатель представляет собой сумму двух членов. Первый член выражения с увеличением скольжения уменьшается, второй — увеличивается. Задавая числовыми значениями s , можно убедиться, что сумма имеет минимальное значение, когда первый ее член равен второму: $R_2^2/s = sX_{2\text{н}}^2$. При этом скольжение $s = R_2/X_{2\text{н}} = s_{\text{опт}}$, так как оно соответствует минимуму знаменателя формулы и максимуму вращающего момента.

Оптимальное скольжение можно найти и известными из математики методами. Для этого нужно исследовать на экстремум функцию $f(s) = R_2^2/s + sX_{2\text{н}}^2$.

Применив правило Лопиталя, получим

$$df/ds = -R_2^2/s^2 + X_{2\text{н}}^2 = 0,$$

откуда $s_{\text{опт}} = R_2/X_{2\text{н}}$.

Таким образом, оптимальное скольжение асинхронного двигателя прямо пропорционально активному сопротивлению обмотки ротора. Изменяя активное сопротивление обмотки ротора R_2 , можно менять положение максимума кривой $M(s)$, как показано на рис. 8.15.

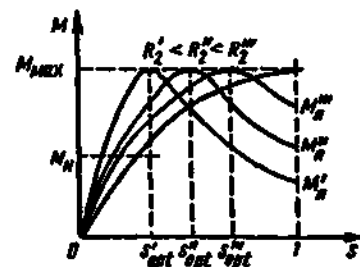


Рис. 8.15. Влияние активного сопротивления обмотки ротора на зависимость $M(s)$

При увеличении сопротивления R_2 максимум кривой сдвигается в сторону больших значений скольжения, при этом и вся кривая сдвигается вправо.

Максимальный вращающий момент двигателя можно найти, если в формулу момента подставить оптимальное значение скольжения $s_{\text{опт}} = R_2/X_{2\text{н}}$:

$$M_{\text{мак}} = c\Phi \frac{F_{2\text{н}}R_2}{\frac{R_2^2X_{2\text{н}}}{R_2} + \frac{R_2X_{2\text{н}}^2}{X_{2\text{н}}}} = c\Phi \frac{E_{2\text{н}}}{2X_{2\text{н}}}.$$

Следовательно, максимальный вращающий момент не зависит от активного сопротивления обмотки ротора.

Карточка № 8.8 (176)

Влияние активного сопротивления обмотки ротора на форму зависимости вращающего момента от скольжения

При каком значении скольжения сумма $R_2^2/s + sX_{2\text{н}}^2$ минимальна, если $R_2 = X_{2\text{н}} = 10 \text{ Ом}$?	$s = 2$	194
	$s = 1$	160
	$s = 0,5$	98
Индуктивное сопротивление обмотки неподвижного ротора в 10 раз превышает ее активное сопротивление. При каком скольжении двигатель развивает максимальный вращающий момент?	Для решения задачи недостаточно данных	67
	10%	1
	2%	51

В предыдущем случае активное сопротивление обмотки ротора увеличили в 2 раза. При каком скольжении вращающий момент двигателя будет максимальным?	5%	126
	10%	150
	20%	145
Во сколько раз нужно увеличить активное сопротивление цепи обмотки ротора, чтобы двигатель с указанными выше характеристиками развивал максимальный пусковой момент?	В 10 раз	123
	В 2 раза	11
Активное сопротивление обмотки ротора увеличили в 2 раза. Как изменится максимальный вращающий момент двигателя при прочих равных условиях?	Не изменится	47
	Увеличится в 2 раза	206
	Увеличится в 4 раза	200

§ 8.9. ПУСК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Прежде чем включить асинхронный двигатель в сеть, нужно определить схему соединения его обмоток, соответствующую номинальному режиму работы.

Предположим, что линейное напряжение сети 220 В, а в паспорте двигателя указано напряжение 220/380 В. При этих условиях обмотки пужно соединить треугольником, чтобы напряжение на них соответствовало расчетному.

На практике при пуске асинхронного двигателя для ограничения пусковых токов его обмотки временно соединяют звездой. Переключение с треугольника на звезду и обратно осуществляют специальным переключателем. Такое переключение не производят, если рассматриваемый двигатель включают в сеть с линейным напряжением 380 В. В этом случае его обмотки и при пуске, и при номинальном режиме работы должны быть соединены звездой.

Как было отмечено, пусковой момент асинхронного двигателя невелик, поэтому пуск обычно производят при отключенной нагрузке.

Под действием пускового момента ротор начинает раскручиваться, скольжение уменьшается, вращающий момент возрастает (см. рис. 8.13), процесс, соответствующий неустойчивому режиму работы (участок от I до s_{opt}), быстро заканчивается и переходит на учас-

ток характеристики, соответствующий устойчивому режиму. Здесь увеличению частоты вращения ротора соответствует уменьшение вращающего момента, поэтому рост частоты быстро прекращается. Ротор устойчиво вращается с частотой, несколько меньшей частоты вращения поля. Теперь с помощью фрикционной муфты можно включить нагрузку. Момент нагрузки не должен превышать максимальный момент.

Если по условиям эксплуатации двигатель должен запускаться при включенной нагрузке, то его следует рассчитать так, чтобы пусковой момент превышал момент нагрузки при номинальном режиме.

В предыдущем параграфе было показано, что, изменяя активное сопротивление обмотки ротора, можно менять форму зависимости $M(s)$ и значение пускового момента. В частности, сопротивление R_2 можно подобрать таким, что максимум вращающего момента будет соответствовать $s=1$, т. е. пусковой момент будет равен максимальному моменту асинхронного двигателя.

У двигателей с фазным ротором пусковой момент увеличивают с помощью пускового реостата, включаемого в цепь обмотки ротора в период запуска (рис. 8.16), у двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора — за счет перераспределения плотности тока в стержнях обмотки при пусковом и номинальном режимах работы.

На практике применяют два типа двигателей с искусственно увеличенным пусковым моментом. Первый тип — двигатели с двойной «беличьей клеткой» ротора — рассчитывают обычно на большие мощности. Второй тип — двигатели с глубоким пазом ротора — получили наибольшее распространение. Стержни короткозамкнутой обмотки таких двигателей имеют вид узких пластин, глубоко врезанных в ротор. Короткозамкнутые двигатели небольшой мощности с увеличенным пусковым моментом включают в сеть непосредственно (без пусковых

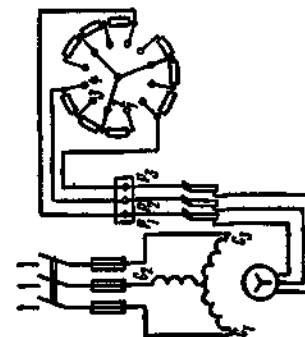


Рис. 8.16. Схема включения пускового реостата

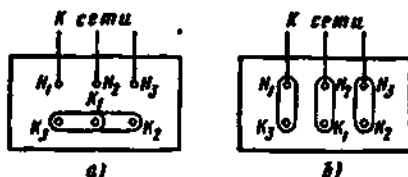


Рис. 8.17 Расположение перемычек на клеммовой колодке асинхронного двигателя при соединении обмоток статора звездой (а) и треугольником (б)

реостатов и переключателей).

На рис. 8.17 показано расположение перемычек на колодке асинхронного двигателя.

Карточка № 8.9 (369)
Пуск асинхронного двигателя

Напряжение сети 220 В. В паспорте асинхронного двигателя указано напряжение 127/220 В. Как должны быть соединены обмотки статора двигателя в рабочем режиме работы?	Треугольником	195
	Звездой	78
Напряжение сети 127 В. В паспорте асинхронного двигателя указано напряжение 127/220 В. Как должны быть соединены обмотки статора двигателя: а) при пуске; б) в рабочем режиме?	а) Звездой; б) треугольником	93
	а), б) Звездой	188
	а), б) Треугольником	148
	а) Треугольником; б) звездой	136
При скольжении, равном 1, вращающий момент равен 1 Н·м, момент нагрузки на валу двигателя 1,5 Н·м, опрокидывающий момент 2 Н·м. Можно ли запустить этот двигатель под нагрузкой?	Можно	105
	Нельзя	121
Рассмотренный двигатель раскрутили на холостом ходу (без нагрузки) до $s < s_{кр}$. Указать максимальный момент нагрузки на валу, при котором двигатель не остановится	1 Н·м	97
	2 Н·м	41
	3 Н·м	24
Какие меры принимают для увеличения пускового момента у двигателя с фазным ротором?	Применяют ротор с двойной «беличьей клеткой»	100
	Применяют ротор с глубоким пазом	205
	В цепь обмотки ротора вводят пусковые реостаты	76

§ 8.10. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Современные асинхронные двигатели не имеют простых и экономичных устройств для плавного регулирования частоты вращения ротора. Этот существенный недостаток ограничивает область их применения и позволяет двигателям постоянного тока во многих случаях успешно конкурировать с асинхронными двигателями.

Из выведенной формулы частоты вращения асинхронного двигателя видно, что частоту n_2 можно регулировать изменяя скольжение s , число пар полюсов p или частоту питающего напряжения f .

Плавное регулирование частоты вращения двигателя за счет изменения скольжения возможно только в двигателях с фазным ротором. На рис. 8.15 видно, что скольжение при неизменном моменте нагрузки зависит от активного сопротивления обмотки ротора. Поэтому в цепь этой обмотки с помощью контактных колец и щеток включают регулировочный реостат, которым плавно изменяют сопротивление обмотки, скольжение и частоту вращения двигателя. Этот способ связан с большими тепловыми потерями. При $s=0,5$ половина энергии, передаваемой в ротор вращающимся магнитным полем, расходуется на нагрев ротора и регулировочного реостата. Кроме того, наличие колец и щеток усложняет эксплуатацию машины и резко снижает ее надежность.

Скольжение, а следовательно, и частоту вращения двигателя в небольших пределах можно регулировать изменением напряжения, подводимого к двигателю.

Ступенчатое регулирование частоты вращения можно осуществлять изменением числа пар полюсов статора двигателя за счет переключения секций его обмотки. Однако этот экономичный и сравнительно простой способ не позволяет регулировать частоту вращения двигателя плавно. Промышленность выпускает двигатели, частоту вращения которых можно регулировать ступенями в 2, 3 и 4 раза.

Частоту вращения двигателя можно регулировать также изменением частоты питающего тока, но этот способ практически не применяют ввиду отсутствия простых и экономичных устройств для регулирования частоты тока в мощных электрических цепях. Частота

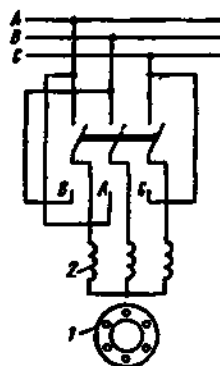


Рис. 8.18. Схема реверсирования асинхронного двигателя:
1 — ротор; 2 — обмотка статора

тока определяется частотой вращения ротора генератора, которую при параллельной работе генераторов необходимо поддерживать строго постоянной. Таким образом, в данном случае необходим отдельный генератор для каждого двигателя, что нецелесообразно.

Разработка и промышленное освоение мощных управляемых полупроводниковых диодов позволяет создать статические устройства с выходным напряжением, частоту которого можно регулировать. Эти простые, экономичные и надежные преобразователи частоты для регулирования частоты вращения короткозамкнутых асинхронных двигателей значительно упрощают при-

вод различных механизмов: отпадает необходимость в редукторах, коробках скоростей, трансмиссиях.

В некоторых случаях возникает необходимость регулирования не только частоты, но и направления вращения двигателя. Изменение направления вращения ротора двигателя называют реверсированием.

Для реверсирования двигателя необходимо изменить направление вращения магнитного поля статора. При рассмотрении вращающегося магнитного поля было установлено, что направление его вращения определяется порядком чередования фаз. Поэтому для реверсирования двигателя достаточно поменять местами две любые фазы на клеммовой колодке двигателя.

Если реверсирование приходится применять часто, то собирают схему со специальным переключателем (рис. 8.18).

Карточка № 8.10 (250) Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя

Укажите основной недостаток асинхронного двигателя	Зависимость частоты вращения от момента нагрузки на валу	204
	Отсутствие экономичных устройств для плавного регулирования частоты вращения ротора	34
	Низкий КПД	198
Можно ли плавно и в широких пределах регулировать частоту вращения асинхронного двигателя изменением частоты тока?	Можно	62
	Нельзя	183
Каким образом осуществляют плавное регулирование в широких пределах частоты вращения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?	Изменением числа пар полюсов вращающегося магнитного поля статора	178
	Изменением сопротивления обмотки ротора	174
	Частота вращения плавно не регулируется	58
Каким образом осуществляют плавное регулирование частоты вращения асинхронного двигателя с фазным ротором?	Изменением числа пар полюсов вращающегося магнитного поля статора	140
	Изменением сопротивления цепи обмотки ротора	50
	Частота вращения плавно не регулируется	101
Каким образом осуществляют ступенчатое регулирование частоты вращения асинхронного двигателя?	Переключением секций обмотки статора	46
	Изменением сопротивления цепи обмотки ротора	98

§ 8.11. КПД и КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Потери энергии в асинхронном двигателе складываются из потерь в обмотках статора и ротора, потерь в магнитопроводе, механических и добавочных потерь.

Потери в обмотках P_m (потери в меди) пропорциональны квадрату тока и существенно изменяются при изменении нагрузки двигателя. Потери на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе P_c (потери в стали) практически не зависят от нагрузки, так как магнитный поток асинхронного двигателя при изменении нагрузки почти не меняется. Механические потери $P_{мех}$ обусловлены трением в подшипниках и о воздух вращающихся частей двигателя. Добавочные потери $P_{доб}$ определяются пульсациями магнитного потока вследствие зубчатого строения магнитопровода и другими трудно учитываемыми факторами. Добавочные потери невелики и составляют при номинальной нагрузке около половины процента от подводимой мощности.

Для определения потерь ставят опыты холостого хода и короткого замыкания асинхронного двигателя. В опыте холостого хода определяют потери в стали и механические потери: $P_x = P_c + P_{мех}$.

Мощность холостого хода P_x измеряют ваттметром, подключенным к зажимам питания электродвигателя.

Опыт короткого замыкания проводят при неподвижном роторе и пониженном напряжении питания. В опыте короткого замыкания определяют потери в меди: $P_k = P_m$.

Мощность короткого замыкания P_k также измеряют ваттметром. КПД двигателя рассчитывают по формуле

$$\eta = \frac{P_1 - (P_m + P_c + P_{мех} + P_{доб})}{P_1},$$

где P_1 — мощность, потребляемая двигателем из сети.

КПД асинхронного двигателя зависит от нагрузки. При номинальном режиме работы двигателя $\eta = 0,9 \div 0,95$. Чем больше расчетная мощность двигателя, тем выше его КПД.

Важной характеристикой асинхронного двигателя является его коэффициент мощности $\cos \phi$. Он показывает, какая часть полной мощности, поступающей из сети, расходуется на покрытие потерь и преобразуется в механическую работу. Коэффициент мощности асинхронного двигателя зависит от нагрузки, достигая значений 0,7—0,9 при номинальном режиме работы и снижаясь до 0,2—0,3 при холостом ходе.

Низкое значение $\cos \phi$ асинхронного двигателя объясняется тем, что для создания магнитного потока в магнитопроводе с воздушными зазорами необходим большой намагничивающий ток, который является реактивным и с увеличением воздушного зазора возрастает. Конструктивный выбор воздушного зазора зависит от многих причин: жесткости вала, его центровки, допустимого износа подшипников и др. У мощных машин воздушный зазор относительно других размеров магнитопровода меньше, чем у машин малой мощности. Поэтому у мощных асинхронных двигателей $\cos \phi$ обычно больше, чем у машин малой мощности.

При низком $\cos \phi$ сеть нагружается реактивными токами и не может обеспечить питание расчетного числа потребителей. Поэтому при эксплуатации асинхронного двигателя следует стремиться к повышению его $\cos \phi$, в частности необходимо обеспечивать двигатель полезной нагрузкой, близкой к номинальной.

Карточка № 8.11 (252)
КПД и коэффициент мощности асинхронного двигателя

Как изменяются при увеличении нагрузки асинхронного двигателя потери энергии: а) в меди; б) в стали?	а), б) Увеличиваются	104
	а) Увеличиваются; б) не изменяются	137
	а) Не изменяются; б) увеличиваются	144
Ваттметр, подключенный к асинхронному двигателю, показывает при номинальной нагрузке 1 кВт; при холостом ходе 50 Вт; при коротком замыкании 50 Вт. Определить КПД двигателя	Для решения задачи недостаточно данных	189
	90%	192
	95%	213
Чему равен КПД двигателя, работающего в режиме холостого хода?	0	225
	90%	227
	Для ответа на вопрос недостаточно данных	139
На какую мощность должен быть рассчитан генератор, питающий асинхронный двигатель, который развивает на валу механическую мощность 5 кВт при $\cos \phi = 0,5$?	1 кВт·А	207
	25 кВт·А	211
	10 кВт·А	223

Как изменится коэффициент мощности асинхронного двигателя при уменьшении его нагрузки?	Не изменится	182
	Увеличится	180
	Уменьшится	175

§ 8.12. ОДНОФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

На статоре однофазного двигателя размещается одна обмотка, синусоидальный ток в которой создает пульсирующий магнитный поток.

На рис. 8.19 показано, что пульсирующий магнитный поток может быть разложен на два вращаю-

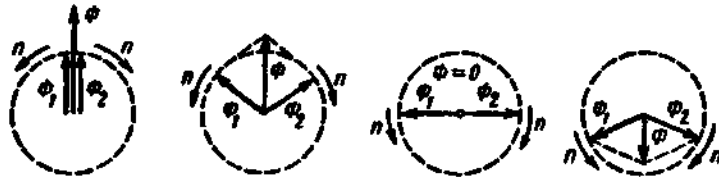


Рис. 8.19. Разложение пульсирующего магнитного потока на два

щихся в противоположные стороны потоков Φ_1 и Φ_2 . Частоты вращения этих потоков равны угловой частоте тока, а амплитуды — половине амплитуды пульсирующего потока Φ .

При неподвижном роторе возникают два равных по значению и противоположно направленных вращающих момента $M_{\text{пр}}$ и $M_{\text{обр}}$, вследствие чего результирующий момент остается равным нулю. Таким образом, собственный пусковой момент однофазного асинхронного двигателя равен нулю.

Раскрутим принудительно ротор до частоты вращения n_2 . Тогда скольжение ротора относительно прямого поля

$$s_{\text{пр}} = (n_1 - n_2)/n_1,$$

относительно обратного поля

$$s_{\text{обр}} = \frac{n_1 + n_2}{n_1} = \frac{n_1 + (1 - s_{\text{пр}})n_1}{n_1} = 2 - s_{\text{пр}}.$$

Частота тока в роторе, создаваемого прямым полем, равна $s_{\text{пр}}f$, а частота тока, создаваемого обрат-

ным полем, $(2 - s_{\text{пр}})f$. Так, если частота тока в сети $f = 50$ Гц, а скольжение $s_{\text{пр}} = 0,02$, то

$$f_{\text{пр}} = s_{\text{пр}}f = 50 \cdot 0,02 = 1 \text{ Гц};$$

$$f_{\text{обр}} = (2 - s_{\text{пр}})f = 1,98 \cdot 50 = 99 \text{ Гц}.$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора пропорционально частоте тока и для прямого тока на два порядка меньше, чем для обратного тока. Вследствие этого прямой ток и прямой вращающий момент $M_{\text{пр}}$ существенно больше обратного тока и обратного вращающего момента. Следовательно, раскрутив двигатель в любую сторону, можно нагрузить его и двигатель будет продолжать вращаться в ту же сторону. Вращающий момент раскрученного однофазного двигателя незначительно отличается от вращающего момента аналогичного трехфазного двигателя.

Для создания пускового момента на статоре однофазного двигателя размещают дополнительную пусковую обмотку, рассчитанную на кратковременную работу. Эту обмотку включают через конденсатор, вследствие чего ток в ней сдвинут по фазе относительно тока основной обмотки (рис. 8.20). Образующееся двухфазное вращающееся магнитное поле раскручивает ротор. По окончании пуска питание пусковой обмотки должно быть отключено.

Однофазные асинхронные двигатели получили наибольшее распространение в бытовых приборах. Их мощность обычно не превышает 500 Вт.

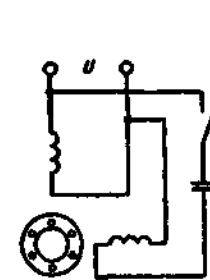


Рис. 8.20. Схема пуска однофазного асинхронного двигателя

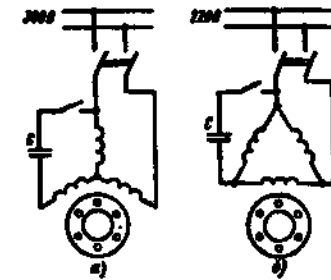


Рис. 8.21. Схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть при соединении обмоток:
а — звездой; б — треугольником

Иногда в качестве однофазного используют трехфазный асинхронный двигатель, у которого в цепь одной из обмоток статора включен конденсатор (рис. 8.21).

При соединении обмоток звездой пусковую емкость подсчитывают по формуле

$$C = \frac{P \cdot 10^6}{314 U^2},$$

где P — мощность двигателя, кВт; U — напряжение сети, В; C — емкость конденсатора, мкФ.

При соединении обмоток треугольником пусковая емкость в три раза больше, чем в предыдущем случае.

При работе в однофазном режиме трехфазный двигатель без перегрева развивает 60—70% номинальной мощности. Недостаток этих схем — необходимость в дорогостоящих конденсаторах большой емкости, примерно 10 мкФ на каждые 100 Вт мощности двигателя при соединении его обмоток треугольником.

Карточка № 8.12 (388)
Однофазный асинхронный двигатель

В магнитном поле, пульсирующем с частотой 50 Гц, вращается ротор асинхронного двигателя с частотой 2850 об/мин. Определить скольжение: а) относительно прямого поля; б) относительно обратного поля	а) 5%; б) 195%	168
	а) 15%; б) 195%	103
	а) 5%; б) 5%	219
Во сколько раз индуктивное сопротивление обмотки ротора для обратного тока больше, чем для прямого (в условиях предыдущего примера)?	В 20 раз	217
	В 24 раза	186
	В 39 раз	152
Трехфазный двигатель мощностью 1 кВт включен в однофазную сеть. Какую полезную мощность на валу можно получить от этого двигателя?	Не более 200 Вт	106
	Не более 700 Вт	96
	Не менее 1 кВт	22
Чему равен пусковой момент однофазного асинхронного двигателя, не имеющего пусковой обмотки?	Половине максимального момента	5
	Нулю	80

Продолжение

В каком случае требуется более значительная пусковая емкость для трехфазного двигателя, подключаемого к однофазной сети?	При соединении обмоток звездой	181
	При соединении обмоток треугольником	172

§ 8.13. СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

Ротор синхронных машин вращается синхронно с вращающимся магнитным полем (отсюда их название). Поскольку частоты вращения ротора и магнитного поля одинаковы, в обмотке ротора не индуцируются токи. Поэтому обмотка ротора получает питание от источника постоянного тока.

Устройство статора синхронной машины (рис. 8.22) практически не отличается от устройства статора

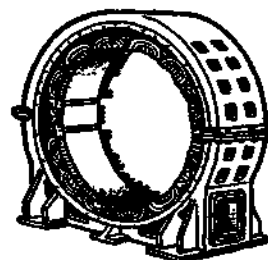


Рис. 8.22. Общий вид статора синхронного генератора

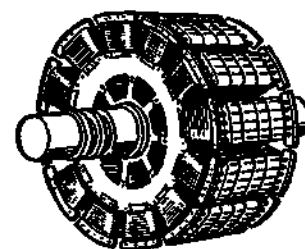


Рис. 8.23. Общий вид неявнополюсного ротора синхронного генератора

асинхронной машины. В пазы статора укладывают трехфазную обмотку, концы которой выводят на клеммовую панель. Ротор в некоторых случаях изготавливают в виде постоянного магнита.

Роторы синхронных генераторов могут быть явнополюсными (рис. 8.23) и неявнополюсными (рис. 8.24). В первом случае синхронные генераторы приво-



Рис. 8.24. Общий вид явнополюсного ротора синхронного генератора

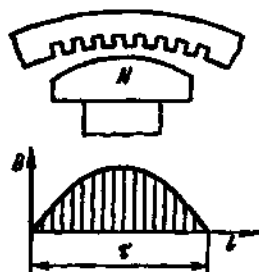


Рис. 8.25. Форма воздушного зазора и распределение магнитной индукции по поверхности ротора в синхронном генераторе

ника к его краям (рис. 8.25).

Частота индуцированной ЭДС (напряжения, тока) синхронного генератора

$$f = pn/60,$$

где p — число пар полюсов ротора генератора.

Отношение $n/60$ выражает число оборотов ротора в секунду; при $p=1$ каждый оборот ротора соответствует полному циклу изменений индуцированного переменного тока (одному периоду); при увеличении p соответственно увеличивается и число периодов тока, индуцируемого за один оборот ротора.

Как и у любого генератора, работающего по закону электромагнитной индукции, индуцированная ЭДС пропорциональна магнитному потоку машины и частоте вращения ротора.

Используют различные способы возбуждения синхронных генераторов. Широкое распространение получил синхронный генератор с машинным возбудителем, представляющим собой генератор постоянного тока, расположенный на одном валу с синхронным генератором. Машинный возбудитель приводится в действие от того же первичного двигателя, что и синхронный генератор. Выходные зажимы возбудителя через щетки и кольца подсоединены к обмотке ротора синхронного генератора. Напряжение синхронного генератора можно регулировать реостатом в цепи обмотки возбуждения возбудителя, что удобно и энергетически выгодно, так как в этой обмотке протекают сравнительно небольшие токи.

дятся в действие тихоходными турбинами гидроэлектростанций, во втором — паровыми или газовыми турбинами тепловых электростанций.

Питание к обмотке ротора подводится через скользящие контакты, состоящие из медных колец и графитовых щеток. При вращении ротора его магнитное поле пересекает витки обмотки статора, индуцируя в них ЭДС. Чтобы получить синусоидальную форму ЭДС, зазор между поверхностью ротора и статором увеличивают от середины полюсного наконечника к его краям (рис. 8.25).

Находят также применение генераторы с самовозбуждением через полупроводниковые или механические выпрямители.

Из характеристик синхронного генератора наибольший практический интерес представляют внешние характеристики, выражающие зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при неизменных значениях тока возбуждения, частоты и коэффициента мощности.

Внешние характеристики снимают при повышении и понижении напряжения (рис. 8.26) и различных

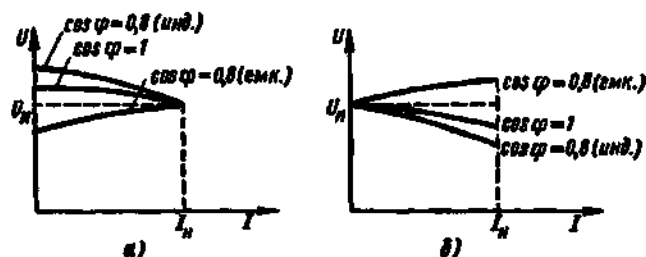


Рис. 8.26. Внешние характеристики синхронного генератора при повышении (а) и понижении (б) напряжения

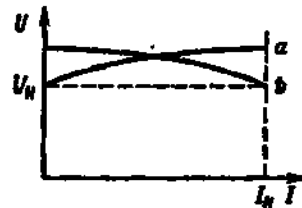
значениях коэффициента мощности нагрузки: $\cos \varphi = 1$, $\cos \varphi = 0.8$ (нагрузка индуктивная), $\cos \varphi = 0.8$ (нагрузка емкостная). Так же как и у трансформатора, напряжение на зажимах синхронного генератора повышается при увеличении емкостной нагрузки.

Отечественная промышленность выпускает синхронные генераторы на напряжение от 230 В до 21 кВ.

Карточка № 8.13 (149)
Синхронный генератор

Можно ли трехфазную обмотку синхронного генератора большой мощности расположить на роторе?	Можно	109
	Нельзя	88
	Можно, но нецелесообразно	16
Двухполюсный ротор синхронного генератора вращается с частотой 3000 об/мин. Определить частоту тока	50 Гц	27
	500 Гц	71

Каким должен быть зазор между ротором и статором синхронного генератора для обеспечения синусоидальной формы индуцируемой ЭДС?	Увеличивающимся от середины к краям полюсного наконечника	133
	Уменьшающимся от середины к краям полюсного наконечника	166
	Строго одинаковым по всей окружности ротора	202
При выполнении каких условий зависимость $U=f(I)$ является внешней характеристикой синхронного генератора?	$\omega = \text{const}$	206
	$\cos \varphi = \text{const}$	212
	$I_n = \text{const}$	221
	Всех перечисленных	154
Каким образом снимались эти внешние характеристики синхронного генератора?	а), б) При понижении напряжения	113
	а) При повышении; б) при понижении напряжения	85
	а) При понижении; б) при повышении напряжения	19
	а), б) При повышении напряжения	64



§ 8.14. СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Устройство статора синхронного двигателя аналогично устройству статора асинхронного двигателя. Ротор синхронного двигателя представляет собой электромагнит или постоянный магнит (рис. 8.27).

Принцип работы синхронного двигателя поясняется рис. 8.28. Внутри магнита N_1S_1 помещен магнит NS . Если магнит N_1S_1 вращать, то он потянет за собой магнит NS . В стационарном режиме частоты вращения обоих магнитов одинаковы.

К валу магнита NS можно приложить механическую нагрузку. Чем больше эта нагрузка, тем больше угол отставания оси магнита NS от оси магнита N_1S_1 . При некоторой нагрузке силы притяжения

между магнитами будут преодолены и ротор остановится.

В реальном двигателе поле магнита N_1S_1 заменено вращающимся магнитным полем статора; при этом ротор либо вращается синхронно с магнитным полем

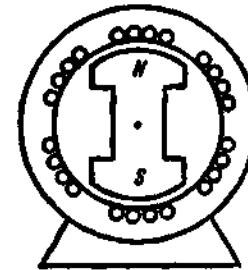


Рис. 8.27. Схематическое изображение синхронного двигателя

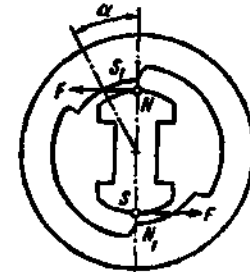


Рис. 8.28. К пояснению принципа работы синхронного двигателя

статора, отставая на угол α , либо останавливается (выпадает из синхронизма) при перегрузке. Таким образом, независимо от нагрузки ротор всегда вращается с постоянной частотой, равной частоте вращения магнитного поля статора: $n_2 = n_1 = 60f/p$.

Постоянство частоты вращения — важное достоинство синхронного двигателя. Строгое постоянство частоты вращения требуется во многих областях техники, например при записи и воспроизведении звука. Недосток синхронного двигателя — трудность пуска: для пуска нужно раскрутить ротор в сторону вращения поля статора. Для этого чаще всего применяют специальную короткозамкнутую обмотку, вделанную в ротор. В момент пуска двигатель работает как асинхронный. Когда частота вращения ротора приближается к частоте вращения поля статора, ротор входит в синхронизм и двигатель работает как синхронный. Короткозамкнутая обмотка при этом оказывается обесточенной, так как частота вращения ротора равна частоте вращения поля статора и стержни обмотки ротора не пересекаются магнитными силовыми линиями.

В настоящее время существует тенденция замены на подвижных объектах (корабли, самолеты, автомобили) электрических цепей постоянного тока цепями

переменного тока повышенной частоты (200, 400 Гц и выше). Возможность использования бесколлекторных машин переменного тока, трансформаторов и магнитных усилителей позволяет повысить надежность работы цепи, а также уменьшить габариты и массу машин и аппаратов.

При оборудовании объекта сетью переменного тока широкое применение находит электропривод на переменном токе. Разработаны схемы с асинхронными и синхронными двигателями, которые позволяют выполнить все операции, осуществляемые ранее двигателями постоянного тока.

Преимущества асинхронных двигателей особенно заметны тогда, когда по условиям работы привода нет необходимости в плавном регулировании частоты вращения в широких пределах и больших пусковых моментах (привод насосов, вентиляторов и др.).

Синхронные двигатели особенно удобны для привода роторов гироскопов. В тех случаях, когда гироскоп используют для особо точных измерений (например, в баллистических ракетах), приводом ротора гироскопа служит синхронный двигатель. При этом частота вращения ротора зависит только от конструкции двигателя и частоты питающего тока, которую можно стабилизировать с очень высокой степенью точности.

Карточка № 8.14 (242)
Синхронный двигатель

Чем отличается синхронный двигатель от асинхронного?	Устройством статора	13
	Устройством ротора	66
Нужны ли щетки и контактные кольца для синхронного двигателя, ротор которого представляет собой постоянный магнит?	Нужны	163
	Не нужны	39
Нужны ли кольца и щетки, если ротор синхронного двигателя изготовлен в виде электромагнита?	Нужны	118
	Не нужны	164
Определить частоту вращения синхронного двигателя, если $f = 500$ Гц, $p = 1$	2850 об/мин	156
	30 000 об/мин	125
	15 000 об/мин	43

Продолжение

С какой целью на роторе синхронного двигателя иногда размещают дополнительную короткозамкнутую обмотку?	Для увеличения вращающего момента	75
	Для раскручивания ротора при запуске	94

ГЛАВА 9

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 9.1. УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА. ОБРАТИМОСТЬ МАШИН

По назначению электрические машины постоянного тока делятся на генераторы и двигатели.

Генераторы вырабатывают электрическую энергию, поступающую в энергосистему; двигатели создают механический вращающий момент на валу, который используется для привода различных механизмов и транспортных средств.

Электрические машины обратимы. Это значит, что одна и та же машина может работать и как генератор, и как двигатель. Поэтому можно говорить об устройстве машин постоянного тока, не рассматривая отдельно устройство генератора или двигателя.

Свойство обратимости не следует противопоставлять определенному назначению машины, которая обычно проектируется и используется либо как двигатель, либо как генератор. Значительно реже находят применение машины, предназначенные для работы как в генераторном, так и в двигательном режимах. Это так называемые стартер-генераторы, которые устанавливаются на некоторых подвижных объектах.

Генератор и двигатель отличаются расчетными и конструктивными особенностями. Поэтому использование двигателя в качестве генератора или генератора в качестве двигателя приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик машин, в частности к снижению коэффициента полезного действия.

В любой машине постоянного тока четко выделяются подвижная и неподвижная части. Подвижную (вращающуюся) часть машины называют ротором, неподвижную — статором.

Часть машины, в которой индуцируется электродвижущая сила, принято называть якорем, а часть машины, в которой создается магнитное поле возбуждения,—индуктором. Как правило, в машине постоянного тока статор служит индуктором, а ротор — якорем.

Статор машины постоянного тока называют также станиной. Станину изготавливают из магнитопроводящего материала (обычно литая сталь); он выполняет две функции, являясь, во-первых, магнитопроводом, по которому проходит магнитный поток возбуждения машины, и, во-вторых, основной конструктивной деталью, в которой размещаются все остальные детали. Изнутри к станине крепятся полюсы. Полюс машины состоит из сердечника, полюсного наконечника и катушки. При прохождении по катушкам постоянного тока в полюсах индуцируется магнитный поток возбуждения. Помимо главных полюсов в машинах повышенной мощности (более 1 кВт) устанавливаются дополнительные полюсы меньших размеров, предназначенные для улучшения работы машины. Катушки дополнительных полюсов включают последовательно с обмоткой якоря.

Обмотка вращающегося якоря соединяется с помощью коллектора и щеток с неподвижными клеммами, через которые машина включается в электрическую сеть.

Сердечник якоря и коллектор крепятся на одном валу. Стальной вал якоря опирается на подшипники, закрепленные в боковых щитках машины. В свою очередь боковые щитки крепятся болтами к статору.

Для уменьшения вихревых токов и связанных с ними тепловых потерь сердечник якоря набирают из тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга лаковым покрытием. В теле якоря сверлят вентиляционные каналы, по которым проходит охлаждающий воздух. В пазы сердечника якоря укладывают проводники обмотки якоря, соединенные с коллекторными пластинами.

Коллектор набирают из медных пластин, разделенных миканитовыми прокладками. Поверхность медных пластин специально обрабатывают, чтобы повысить их устойчивость к истиранию.

Электрическое соединение вращающейся обмотки якоря с неподвижными клеммами машины осуществ-

ляется с помощью щеток, скользящих по коллектору.

Щетки вставляются в специальные обоймы щеткодержателя и прижимаются к коллектору спиральными или пластинчатыми пружинами. Щеткодержатели крепятся к траверсе, которую вместе со щетками можно поворачивать относительно статора на некоторый угол в ту или другую сторону.

В качестве основы для изготовления щетки используют графит. Чтобы получить заданные свойства (определенную электропроводность, повышенную сопротивляемость к истиранию), в щетку добавляют порошки металлов (медь, свинец).

На рис. 9.1. показан внешний вид машины постоянного тока серии П, выпускаемой отечественной промышленностью. Машины этой серии рассчитывают на различную мощность от 0,3 до 200 кВт. Двигатели серии П рассчитаны на напряжение 110 или 220 В, а генераторы — 115 или 230 В.

Поперечный разрез машины постоянного тока схематически изображен на рис. 9.2, где видны статор, создающий магнитный поток возбуждения, и ротор, в пазах которого размещены проводники обмотки якоря. Между полюсным наконечником и якорем имеется воздушный зазор, исключающий трение ротора о статор (рис. 9.3, а). Магнитная индукция в воздушном зазоре изменяется вдоль окружности по закону, который называют трапецеидальным (рис. 9.3, б).

Устройство машины постоянного тока изображено на рис. 9.4.

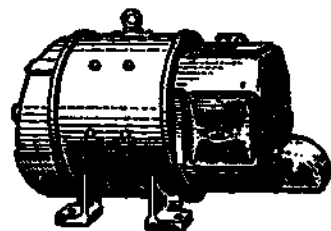


Рис. 9.1. Внешний вид машины постоянного тока

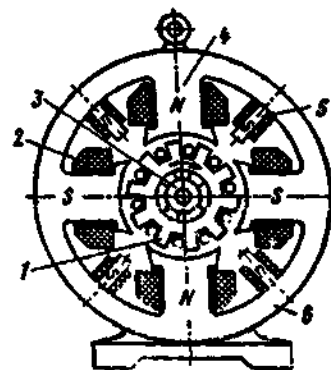


Рис. 9.2. Поперечный разрез машины постоянного тока:
1 — сердечник якоря с проводниками обмотки; 2 — катушка обмотки возбуждения; 3 — вал; 4 — главный полюс; 5 — дополнительный полюс; 6 — статор

Машины постоянного тока обычно имеют принудительное воздушное охлаждение, осуществляемое вентилятором, насаженным на вал якоря. Для мощных машин выработаны системы водородного, а также водяного охлаждения.

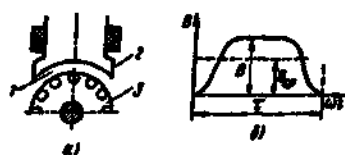


Рис. 9.3. Схематическое изображение воздушного зазора / между полюсным наконечником 2 и якорем 3 (а) и магнитная индукция в воздушном зазоре (б)

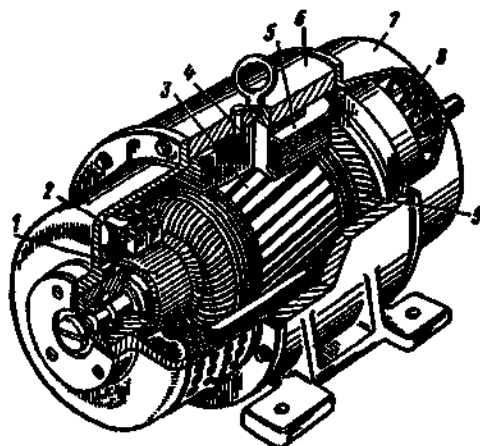


Рис. 9.4. Устройство машины постоянного тока:

1 — коллектор; 2 — щетки; 3 — сердечник якоря; 4 — сердечник главного полюса; 5 — полюсная катушка; 6 — статор; 7 — подшипниковый щит; 8 — вентилятор; 9 — обмотка якоря

Для защиты машины от пыли и влаги конструктивные окна, обеспечивающие доступ к коллектору и щеткам, закрывают съемными стальными лентами или пластинами.

Карточка № 9.1 (200)
Устройство электрических машин постоянного тока.
Обратимость машин

Укажите основные конструктивные детали машины постоянного тока	Индуктор, якорь, коллектор, вентилятор	107
	Индуктор, якорь, коллектор, щетки	175
Что называют якорем?	Статор, главные полюсы, дополнительные полюсы, якорь, коллектор	32
	Вращающуюся часть машины	85
Почему сердечник вращающегося якоря набирают из тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга?	Часть машины, а которой индуцируется ЭДС	25
	Из конструктивных соображений	6
На заводском щитке машины серии П указано ее номинальное напряжение, равное 220 В. Какая это машина?	Для уменьшения магнитного сопротивления потоку возбуждения	41
	Для уменьшения тепловых потерь в машине	174
С какой целью применяют принудительное охлаждение машины постоянного тока?	Двигатель постоянного тока	23
	Генератор постоянного тока	158
Для защиты машины от пыли и влаги конструктивные окна, обеспечивающие доступ к коллектору и щеткам, закрывают съемными стальными лентами или пластинами.	Для ответа на вопрос: недостаточно данных	58
	Во избежание перегрева машины	40
Для уменьшения потерь энергии в машине	Для уменьшения потерь энергии в машине	18
	Для уменьшения размеров и массы машины	172

§ 9.2. ПРИНЦИП РАБОТЫ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для понимания сущности работы электрической машины необходимо вспомнить физические законы, которыми описываются основные электромагнитные явления: закон электромагнитной индукции, закон Био — Савара, закон Ампера. Эти законы вместе с законами

Кирхгофа и Ома позволяют описать основные процессы, происходящие в электрических машинах.

Работа любой электрической машины (генератора или двигателя постоянного и переменного тока) характеризуется взаимодействием двух направленных навстречу друг другу вращающихся моментов, один из которых создается механическими, а другой — электромагнитными силами. Кроме того, работа двигателя и генератора характеризуется взаимодействием напряжения сети и ЭДС, возникающей в обмотке якоря.

Генератор постоянного тока. В генераторе энергия механического движения преобразуется в электрическую энергию. Двигатель, в качестве которого обычно используют турбину, или двигатель внутреннего сгорания, вращает якорь в магнитном поле возбуждения. Вследствие этого вращения изменяется магнитный поток, пронизывающий витки обмотки якоря. При этом индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости изменения магнитного потока: $e = \omega \frac{d\Phi}{dt}$, где ω — число витков, пронизываемых изменяющимся магнитным потоком Φ ; $d\Phi/dt$ — производная магнитного потока по времени, или скорость изменения магнитного потока.

Приведенная формула, выражающая закон электромагнитной индукции, показывает, что для индуцирования постоянной ЭДС E необходимо равномерно с (с постоянной скоростью) увеличивать или уменьшать магнитный поток Φ . Однако равномерное увеличение или уменьшение магнитного потока в течение длительного времени технически осуществить невозможно. Поэтому получение постоянной ЭДС в устройствах, основанных на законе электромагнитной индукции, невозможно*.

В реальном генераторе постоянного тока магнитный поток, пронизывающий каждый виток обмотки якоря, периодически изменяется. Соответственно изменяется и ЭДС в каждом витке обмотки по значению и направлению.

Для получения постоянной ЭДС используют раз-

* Высокоскоростные униполярные машины позволяют получить постоянную ЭДС порядка нескольких вольт. Однако теоретически такие машины следует рассматривать как генераторы переменного тока, имеющие коллектор с бесконечно большим числом пластин.

личные выпрямители, в частности генератор постоянного тока снабжается механическим выпрямителем — коллектором. Коллектор автоматически переключает концы витков обмотки при изменении направления ЭДС.

На рис. 9.5 изображена синусоидальная ЭДС, которая индуцируется в одном витке обмотки якоря. С помощью коллектора эта ЭДС преобразуется в пульсирующую ЭДС e_1 .

Рассмотрим второй виток обмотки генератора, сдвинутый относительно первого на угол 90° . Индуцируемая во втором витке ЭДС e_2 опережает по фазе на 90° ЭДС e_1 . Форма e_1 , e_2 , а также выпрямленных ЭДС e_1 и e_2 показана на рис. 9.6.

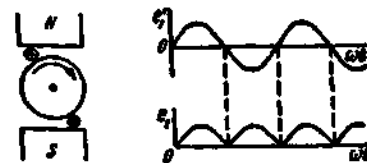


Рис. 9.5. Зависимость ЭДС, индуцируемой в одном витке обмотки, от ωt

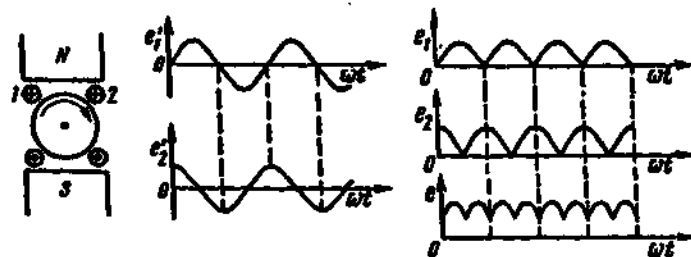


Рис. 9.6. Уменьшение пульсаций при сложении ЭДС, сдвинутых по фазе

К выходным зажимам генератора подводится ЭДС, равная сумме ЭДС e_1 и e_2 . Из рис. 9.6 видно, что результирующая ЭДС e имеет значительно меньшие пульсации, чем ЭДС e_1 и e_2 . При большом числе витков, сдвинутых по окружности якоря на небольшие углы, пульсации результирующей ЭДС на зажимах генератора становятся пренебрежимо малыми. В этом случае машина вырабатывает напряжение, практически постоянное по значению и направлению.

Для повышения уровня вырабатываемой ЭДС верх первого ряда витков обмотки могут быть уложены без смещения (в те же самые пазы якоря) второй и последующие ряды витков.

При разомкнутых выходных зажимах генератора ток в обмотке якоря равен нулю. При этом генератор работает вхолостую, а приводной двигатель преодолевает только моменты трения, затрачивая минимальную механическую энергию. При подключении к генератору электрической нагрузки по обмотке якоря начинает проходить ток.

Проводники обмотки находятся в магнитном поле. В соответствии с законом Ампера возникают механические силы, направление которых определяется правилом левой руки. Нетрудно убедиться, что эти силы создают вращающий момент, направленный противоположно моменту приводного двигателя.

Чем больше мощность потребителей электрической энергии, подключенных к генератору, тем больше ток в обмотке якоря и больше силы, препятствующие его вращению. Соответственно увеличиваются и затраты механической энергии на вращение якоря генератора.

Двигатель постоянного тока. Если подключить машину постоянного тока к электрической сети, через обмотку якоря потечет ток. В соответствии с законом Ампера на проводники обмотки якоря, находящиеся в магнитном поле возбуждения, действуют механические силы. Эти силы создают вращающий момент, под действием которого якорь начинает раскручиваться.

Вращающийся вал якоря используют для привода в действие различных механизмов: подъемных и транспортных средств, станков, швейных машин и т. д.

Исходя из закона сохранения энергии можно считать, что мощность, потребляемая двигателем из сети, тем больше, чем больше механическая нагрузка на его валу. Однако для понимания сущности работы электрического двигателя важно проследить, каким образом изменение механической нагрузки сказывается на электрической мощности, потребляемой двигателем.

Разберемся в этом. Обмотка якоря двигателя вращается в магнитном поле возбуждения. В этих условиях в соответствии с законом электромагнитной индукции в обмотке якоря возникает ЭДС. Применяя правило правой руки, нетрудно установить, что она направлена навстречу приложенному напряжению сети. Поэтому ее назвали противо-ЭДС. Именно противо-ЭДС является фактором, регулирующим потребление электрической мощности из сети.

По закону электромагнитной индукции, противо-

ЭДС прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего витки обмотки якоря. Следовательно, с уменьшением частоты вращения якоря уменьшается и противо-ЭДС.

Если механическая нагрузка на валу двигателя отсутствует (двигатель работает вхолостую), вращающему моменту двигателя препятствуют только моменты трения и частота вращения якоря достигает максимального значения. При этом противо-ЭДС почти полностью компенсирует напряжение сети и через обмотку якоря проходит минимальный ток. Соответственно электрическая мощность, потребляемая из сети, минимальна.

При подключении механической нагрузки частота вращения якоря уменьшается, а следовательно, уменьшится и значение противо-ЭДС. Ток и электрическая мощность, потребляемые двигателем из сети, возрастут.

Таким образом, противо-ЭДС в двигателе выполняет функции дросселя, регулирующего поступление мощности из сети.

Карточка № 0.2. (230)
Принцип работы машины постоянного тока

Как должен изменяться магнитный поток, сцепленный с витком, чтобы в витке индуцировалась постоянная ЭДС?	Оставаться неизменным	128
	Изменяться по синусоидальному закону	14
	Равномерно (линейно) увеличиваться или уменьшаться	105
Какая ЭДС индуцируется в витках обмотки якоря генератора постоянного тока?	Постоянная по значению и направлению	122
	Переменная	84
Ток генератора увеличился. Как изменился вращающий момент на валу генератора?	Не изменился	65
	Увеличился	95
	Уменьшился	22
При неизменном магнитном потоке возбуждения ток в обмотке якоря увеличился. Как изменился вращающий момент двигателя?	Не изменился	141
	Увеличился	142
	Уменьшился	171

Частота вращения двигателя уменьшилась. Как изменилась ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря?	Не изменилась	29
	Увеличилась	39
	Уменьшилась	4
	В двигателе ЭДС не индуцируется	30

§ 9.3. ПОНЯТИЕ ОБ ОБМОТКЕ ЯКОРЯ. КОЛЛЕКТОР И ЕГО НАЗНАЧЕНИЕ

Основным элементом обмотки якоря является секция — часть обмотки, подсоединенная к двум коллекторным пластинам, которые следуют друг за другом по схеме обмотки (рис. 9.7).

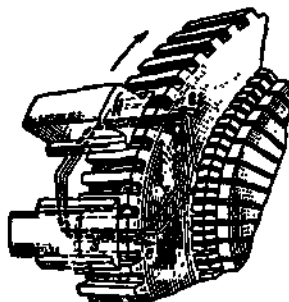


Рис. 9.7. Общий вид секции обмотки якоря

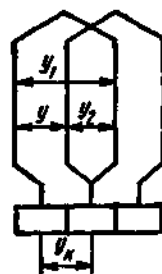


Рис. 9.8. Принцип построения простой петлевой обмотки

Секция может состоять из одного или нескольких витков. Активные стороны секции располагаются под разноименными полюсами на расстоянии полюсного деления друг от друга (полюсным делением называют часть длины окружности якоря, приходящуюся на один полюс). При этом ЭДС, индуцируемые в активных сторонах секции, суммируются.

В современных машинах постоянного тока применяют двухслойные обмотки якоря, в каждом пазу которого укладываются две активные стороны двух различных секций. Очевидно, что в этом случае число пазов равно числу секций.

Для уменьшения пульсаций ЭДС секции обмотки соединяют последовательно: к коллекторной пластине припаивают конец одной секции и начало следующей.

Таким образом, число коллекторных пластин также оказывается равным числу секций.

При проектировании и расчете обмоток якорей используют следующие понятия:

первый частичный шаг y_1 (ширина секции) — число пазов, расположенных между активными сторонами секции;

второй частичный шаг y_2 — число пазов между конечной стороной одной секции и начальной стороной следующей секции;

результрующий шаг y — число пазов между начальными сторонами двух последовательно соединенных секций;

шаг обмотки по коллектору y_k — число коллекторных пластин между началом и концом секции по ходу обмотки.

В зависимости от формы секции различают петлевые и волновые обмотки.

В петлевой обмотке секция имеет форму петли, а начало и конец секции припаяны к двум соседним коллекторным пластинам (рис. 9.8).

Расчет простой петлевой двухслойной обмотки осуществляют по следующим формулам:

$$y = y_k = 1; y_1 = \frac{z}{2p} \pm b; y_2 = y_1 - y,$$

где z — число пазов якоря; p — число пар полюсов машины; b — дробь, которую отнимают или добавляют к значению y , чтобы оно стало целым числом.

Группы секций образуют параллельные ветви, число которых равно числу полюсов машины. Наличие параллельных ветвей позволяет уменьшить токовые нагрузки на щетки, что очень важно, так как коллекторно-щеточный контакт — самый уязвимый и ненадежный элемент электрической машины постоянного тока.

В волновой обмотке секция по форме напоминает волну (рис. 9.9).

Расчет простой волновой двухслойной обмотки осуществляется по формулам

$$y = y_k = \frac{k \pm 1}{p}; y_1 = \frac{z}{2p} \pm b;$$

$$y_2 = y - y_1,$$

где k — число коллекторных пластин.

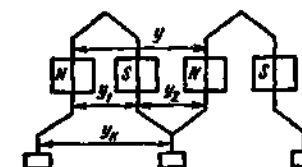


Рис. 9.9. Принцип построения простой волновой обмотки

Простая волновая обмотка всегда имеет одну пару параллельных ветвей.

Волновую обмотку, в которой половина секций всегда соединена последовательно, применяют в электрических машинах, рассчитанных на высокие напряжения.

В машинах, рассчитанных на сильные токи, используют петлевые обмотки с большим числом пар параллельных ветвей.

Для увеличения числа пар параллельных ветвей разработаны схемы сложных петлевых и волновых обмоток, состоящих из двух или нескольких простых обмоток.

Токи, индуцируемые в якорной обмотке, подводятся к потребителю электрической энергии через щеточно-коллекторный узел. Коллектор машины постоянного тока является самой ответственной в эксплуатации деталью, так как его скользящий контакт требует постоянного наблюдения и ухода, очистки от пыли, нагара и грязи, поддержания оптимального давления между трущимися поверхностями. Кроме того, коллектор является механическим выпрямителем переменного тока, который периодически меняет направление тока в каждой секции, сохраняя постоянство направления тока во внешней цепи.

Карточка № 9.3 (306)
Понятие об обмотке якоря. Коллектор
и его назначение

Якорь имеет 12 пазов. Обмотка якоря двухслойная. Определить: а) число секций в обмотке; б) число пластин коллектора	Для ответа на вопрос недостаточно данных; неизвестно число полюсов машины	146
	а) 12; б) 12	162
	а) 6; б) 12	64
	а) 6; б) 6	8
Якорь четырехполюсной машины имеет 12 пазов и простую петлевую обмотку. Найти: а) ширину секции; б) шаг по коллектору	а) 12; б) 12	43
	а) 3; б) 1	87
	а) 3; б) 3	71

Продолжение

Якорь четырехполюсной машины имеет 9 пазов и простую волновую обмотку. Определить: а) ширину секции; б) шаг по коллектору	а) 2; б) 2	19
	а) 2; б) 4	45
	а) 4; б) 1	76
	Задача не определена, так как неизвестно число коллекторных пластин	169
В каких машинах применяют обмотки: а) петлевые; б) волновые?	а) Высоковольтных; б) силовых	150
	а) Силовых; б) высоковольтных	134
	а) Генераторах; б) двигателях	138
	а) Двигателях; б) генераторах	125
Каково основное назначение коллектора?	Крепление обмотки якоря	156
	Электрическое соединение вращающейся обмотки якоря с неподвижными клеммами машины	68
	Выпрямление переменного тока в секциях обмотки	101

§ 9.4. ЭДС, ИНДУЦИРУЕМАЯ В ОБМОТКЕ ЯКОРЯ

Приведенные ранее формулировки закона электромагнитной индукции неудобны для практики, так как выражают ЭДС через переменные физические величины, которые сравнительно трудно рассчитать и измерить (скорость изменения магнитного потока, скорость пересечения силовых линий, магнитная индукция). Поэтому, применяя логические рассуждения и известные зависимости, ЭДС генератора выражают через магнитный поток возбуждения и частоту вращения машины.

Как указывалось, магнитная индукция распределена по окружности якоря неравномерно (трапецидальный закон распределения), что вызывает пульсации ЭДС в каждой секции. Однако при суммировании

ЭДС большого числа секций обмотки якоря пульсации сглаживаются и на зажимах машины ЭДС имеет постоянное усредненное значение. Поэтому реальное магнитное поле машины можно заменить равномерным с одинаковым средним значением магнитной индукции по всей боковой поверхности якоря.

Среднее значение магнитной индукции равно отношению магнитного потока полюса к площади, которую он пронизывает:

$$B_{cp} = \Phi / (\tau l),$$

где τ — полюсное деление; l — длина якоря, равная активной длине секции обмотки.

Введя обозначение $\tau = \pi D / (2p)$, где D — диаметр якоря, получим

$$B_{cp} = \frac{\Phi}{\frac{\pi D}{2p} l} = \frac{2p\Phi}{\pi D l}.$$

Среднее значение ЭДС, индуцируемой в одном активном проводнике обмотки, определим по формуле закона электромагнитной индукции: $E_1 = B_{cp} l v$. Следовательно,

$$E_1 = \frac{2p\Phi}{\pi D l} l v = \frac{2p\Phi}{\pi D} v.$$

Линейная скорость движения проводников обмотки якоря в (м/с) $v = \pi D n / 60$, где D — диаметр якоря, м; n — частота вращения якоря, об/мин.

Следовательно,

$$E_1 = \frac{2p\Phi}{\pi D} \frac{\pi D n}{60} = \frac{2p\Phi n}{60}.$$

ЭДС генератора равна сумме ЭДС последовательно соединенных проводников, число которых равно числу всех проводников обмотки N , деленному на число параллельных ветвей $2a$:

$$E = E_1 \frac{N}{2a} = \frac{2p\Phi n}{60} \frac{N}{2a} = \frac{p}{60} \frac{N}{a} \Phi n.$$

Величину $\frac{p}{60} \frac{N}{a}$ называют постоянной генератора. Таким образом, $E = c_E \Phi n$, т. е. ЭДС генератора постоянного тока прямо пропорциональна частоте вращения якоря, магнитному потоку возбуждения и зависит от конструктивных особенностей машины, характеризуемых постоянной c_E .

Карточка № 9.4 (170)
ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря

В четырехполюсной машине длина окружности якоря 40 см, активная длина проводника 10 см, магнитный поток возбуждения 0,01 Вб. Определить среднее значение магнитной индукции	$B_{cp} = 1 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = 1 \text{ Тл}$	144
	$B_{cp} = 0,01 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = 0,01 \text{ Тл}$	96
	$B_{cp} = 0,0001 \text{ Тл}$	112
	$B_{cp} = 2 \text{ Тл}$	79
В условиях предыдущей задачи линейная скорость проводников обмотки якоря 10 м/с. Найдите ЭДС, индуцируемую в одном проводнике	$E = 0,1 \text{ В}$	24
	$E = 100 \text{ В}$	46
	$E = 1 \text{ В}$	118
В пазах якоря рассматриваемой машины уложено 460 проводников простой петлевой обмотки. Определить ЭДС, индуцируемую в обмотке якоря	Задача не определена, так как неизвестно число пар параллельных ветвей обмотки якоря	7
	$E = 460 \text{ В}$	20
	$E = 230 \text{ В}$	91
	$E = 115 \text{ В}$	168
Рассмотренная выше машина работает в качестве генератора. Найти постоянную генератора	Задача не определена	109
	$c_E = 460/60$	3
Частота вращения якоря рассматриваемой машины 1500 об/мин. Определить ЭДС, индуцируемую в обмотке якоря	100 В	39
	115 В	37
	230 В	116

§ 9.5. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ

В режиме холостого хода магнитное поле машины создается только обмоткой возбуждения (рис. 9.10, а). При подключении нагрузки через обмотку якоря проходит ток, который создает свое магнитное поле (рис. 9.10, б).

На рисунках кружками показаны сечения проводников обмотки возбуждения и обмотки якоря. Ток в проводнике, текущий за плоскость рисунка, помечен кружком с крестиком, а ток, направленный «к нам», — кружком с точкой. Направления магнитных силовых линий определены по правилу буравчика.

Реально существующее в нагруженной машине

магнитное поле следует рассматривать как результат наложения магнитных полей обмотки возбуждения и обмотки якоря (рис. 9.10, а).

Таким образом, магнитное поле машины, в котором движутся проводники обмотки якоря, создается не

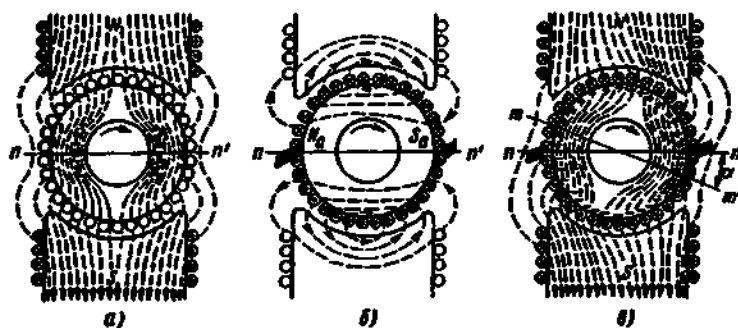


Рис. 9.10. Реакция якоря в генераторе постоянного тока

только обмоткой возбуждения, но и обмоткой якоря. При этом поле возбуждения стабильно, а поле якоря изменяется при изменении нагрузки машины.

Влияние магнитного поля якоря на поле возбуждения машины называют реакцией якоря.

Вследствие реакции якоря (рис. 9.10, в) симметрия магнитного поля машины нарушается. Происходит усиление магнитного потока под сбегающим краем полюса генератора и ослабление — под набегающим краем (якорь генератора вращается по часовой стрелке; следовательно, левый край северного полюса и правый край южного полюса «набегают» на якорь).

Вследствие насыщения участков магнитной цепи усиление магнитного потока под одним краем полюса оказывается относительно меньшим, чем ослабление магнитного потока под другим краем. Это приводит к тому, что среднее значение магнитного потока в нагруженной машине становится меньше, чем в ненагруженной. Соответственно уменьшается и ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря.

Назовем геометрической нейтралью воображаемую линию, которая проходит строго посередине между полюсами и лежит в плоскости, разделяющей магнитную систему машины на две симметричные части. Аналогичную линию, проходящую через диамет-

рально противоположные точки окружности якоря, в которых магнитная индукция равна нулю, назовем физической нейтралью. Магнитная индукция равна нулю в тех точках, где магнитные силовые линии касаются окружности якоря (не входя в него), а физическая нейтраль перпендикулярна магнитным силовым линиям.

В ненагруженной машине физическая нейтраль совпадает с геометрической.

В нагруженном генераторе (рис. 9.10, в) физическая нейтраль mm' поворачивается относительно геометрической нейтрали ll' на угол α в сторону вращения якоря.

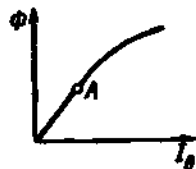
Мысленно представим себе, что на рис. 9.10 изображен не генератор, а двигатель. Тогда при тех же направлениях токов в обмотках якоря и возбуждения ротор двигателя начал бы вращаться в другую сторону (против часовой стрелки), в чем нетрудно убедиться, применив правило левой руки. Правый край северного полюса и левый край южного полюса стали бы набегающими.

Следовательно, в нагруженном двигателе магнитный поток усиливается под набегающим краем полюса и ослабляется под сбегающим краем, а физическая нейтраль поворачивается на угол α против вращения якоря.

Карточка № 9.5 (220)
Реакция якоря

В какой из точек (а или б) генератора результирующее магнитное поле слабее?	В точке а	16
	В точке б	118
	Ответить нельзя, так как не обозначена полярность полюсов машины	139
	Магнитное поле в обеих точках одинаково	119
В какой из точек (а или б) двигателя результирующее магнитное поле слабее?	В точке а	108
	В точке б	90
	Ответить нельзя, так как не обозначена полярность полюсов машины	140

Как повернута физическая нейтраль относительно геометрической в машине, рассмотренной: а) в первой задаче; б) во второй задаче?	а) По часовой стрелке; б) против часовой стрелки	75
	а) Против часовой стрелки; б) по часовой стрелке	160
	а), б) Против часовой стрелки	159
	а), б) По часовой стрелке	5
Какое явление называют реакцией якоря?	Уменьшение магнитного поля машины при увеличении нагрузки	52
	Искажение магнитного поля машины при увеличении нагрузки	27
	Уменьшение ЭДС обмотки якоря при увеличении нагрузки	82
	Воздействие магнитного поля якоря на основное магнитное поле полюсов	47
Режим работы генератора соответствует точке А. Как скажется реакция якоря на результирующем магнитном поле?	Результирующее магнитное поле машины уменьшится и будет искажено	97
	Результирующее магнитное поле машины будет искажено, но не уменьшится	111



§ 9.6. КОММУТАЦИЯ И СПОСОБЫ ЕЕ УЛУЧШЕНИЯ. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОЛЮСЫ

Как отмечалось, замкнутая схема обмотки якоря разделяется щетками на две параллельные ветви или на несколько пар параллельных ветвей. При работе машины обмотка вращается относительно неподвижных щеток, поэтому секции обмотки непрерывно переходят из одной параллельной ветви в другую.

Рассмотрим этот процесс более подробно. На рис. 9.11 коллекторные пластины с припаянной к ним

секцией обмотки перемещаются слева направо относительно неподвижной щетки. При переходе с первой коллекторной пластины на вторую секция обмотки якоря переключается из одной параллельной ветви в другую. В процессе переключения секция замыкается щеткой накоротко, а ток в секции изменяет все направления на противоположное.

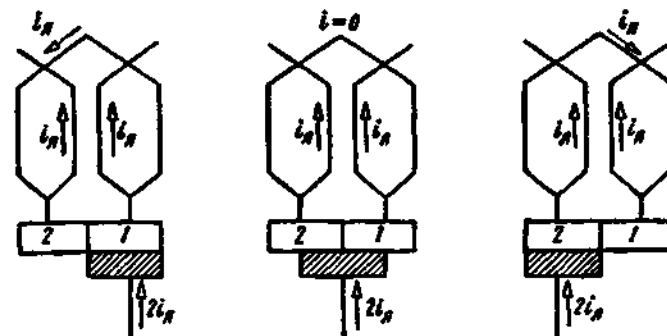


Рис. 9.11. Изменение тока в секции обмотки якоря при переключении ее из одной параллельной ветви в другую

Процесс переключения секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую и связанные с ним явления в короткозамкнутых секциях называют коммутацией машины. Время, в течение которого секция обмотки накоротко замкнута щеткой, называют периодом коммутации T .

В процессе коммутации сопротивление щеточного контакта, пропорциональное площади соприкосновения щетки с коллекторной пластиной, и ток в короткозамкнутой секции изменяются в течение периода коммутации по линейному закону (рис. 9.12). При прямолинейной коммутации плотность тока в щеточном контакте постоянна, что обеспечивает оптимальные условия работы коллектора.

Однако влияние ЭДС самоиндукции и ЭДС, индуцируемой в короткозамкнутой секции магнитным потоком якоря, приводит к криволинейной коммутации, при которой в течение некоторой части периода плотность тока под щеткой резко возрастает. Возрастание плотности тока вызывает повышенное искрение под щетками и разрушение коллектора.

Для получения прямолинейной коммутации необходимо скомпенсировать магнитные поля, в которых

находится короткозамкнутая секция обмотки якоря.

Самый простой способ улучшения коммутации — сместить щетки с геометрической нейтрали. Однако он пригоден только для машин, работающих при постоянной нагрузке. Действительно, при изменении нагрузки изменится угол α поворота физической нейтрали относительно геометрической и регулировка

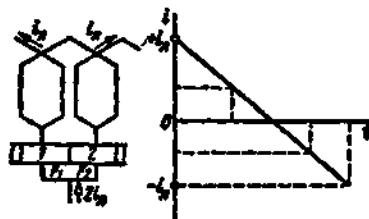


Рис. 9.12. К определению прямой коммутации (F — площадь соприкосновения щетки с коллекторной пластиной)

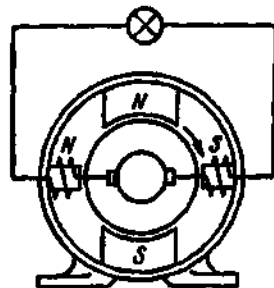


Рис. 9.13. Схема включения обмотки дополнительных полюсов

коммутации нарушится. Поэтому в современных машинах постоянного тока применяют другой способ компенсации магнитных полей в области вращения короткозамкнутых секций обмотки якоря. При этом щетки размещают на геометрической нейтрали, а между главными полюсами машины устанавливают дополнительные полюсы, обмотки которых включают последовательно с обмоткой якоря (рис. 9.13). Магнитный поток дополнительных полюсов пропорционален току нагрузки и компенсация достигается при всех режимах работы машины. На рис. 9.14, а, б условно показано размещение дополнительных полюсов в генераторе и двигателе.

Помимо электрических причин на коммутацию влияют механические дефекты: неправильный выбор щеточных пружин, отклонение формы коллектора от цилиндрической, загрязнение поверхности коллектора, плохое прилегание щеток к коллектору. Поэтому в процессе эксплуатации машины необходимо тщательно следить за щеточно-коллекторным узлом и обнаруженные дефекты немедленно устранить: очистить коллектор от грязи и угольной пыли, заменить и притереть щетки, проточить коллектор на токарном станке и т. д. Кроме того, на коммутацию влияют значения

сопротивлений щеток. Практически полная компенсация магнитных полей в короткозамкнутой секции невозможна, поэтому малые ЭДС в этой секции все-таки наводятся. Чтобы ограничить токи, вызываемые этими ЭДС, сопротивление щетки выбирают достаточно большим. Однако не следует забывать, что через

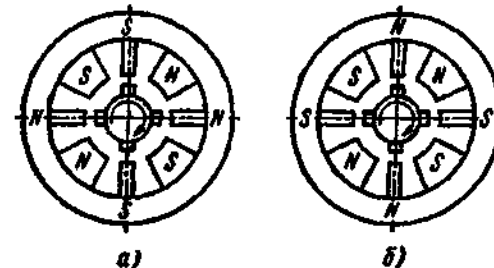


Рис. 9.14. Схема размещения дополнительных полюсов в машине постоянного тока:

а — двигатель; б — генератор

щетку проходит ток нагрузки и увеличение ее сопротивления приводит к возрастанию потерь напряжения внутри машины. При учете этих факторов наиболее приемлемыми оказываются металлографитовые щетки.

Несмотря на все предупредительные меры, полностью устранить искрение под щетками не удастся. Поэтому правилами эксплуатации допускается слабое точечное искрение под небольшой частью поверхности щетки.

Особенно опасен для машины «круговой огонь» по коллектору. Увеличение искрения под щетками приводит к подгоранию коллектора. В результате возникает дуговой разряд, обмотка машины замыкается накоротко, а ток в обмотке якоря становится недопустимо большим. Возникновение «кругового огня» является аварийным режимом.

Карточка № 9.6 (293)

Коммутация и способы ее улучшения. Дополнительные полюсы

Какая секция коммутируется в рассматриваемый момент времени?	Секция 2	56
	Секция 3	44
	Секция 4	66
	Определить невозможно	177



Пластин коллектора движутся относительно щеток с линейной скоростью 25 м/с. Ширина щетки 1 см. Определить время, в течение которого совершается процесс коммутации одной секции	Для решения задачи недостаточно данных	80
	0,0004 с	94
	0,04 с	2
	0,0002 с	33
Прямолнейную коммутацию иногда получают за счет смещения щеток с геометрической нейтрали. Каков основной недостаток этого способа?	Сложность определения физической нейтрали машины	126
	Зависимость угла поворота щеток от нагрузки	165
Какой способ улучшения коммутации целесообразно использовать в мощных машинах при переменной нагрузке?	Смещение щеток с геометрической нейтрали	106
	Установку дополнительных полюсов	35
Чем ограничивается сопротивление щеток машины постоянного тока: а) минимально допустимое; б) максимально допустимое?	а) Ничем; б) потерями напряжения в щеточном контакте	143
	а) Потерями напряжения в щеточном контакте; б) током в короткозамкнутой секции обмотки якоря	50
	а) Током в короткозамкнутой секции; б) потерями напряжения в щеточном контакте	55

§ 9.7. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Различают генераторы независимого возбуждения и генераторы с самовозбуждением. В генераторах независимого возбуждения основной магнитный поток создается либо постоянным магнитом, либо электромагнитом (обмоткой возбуждения), питаемым от источника постоянного тока.

Схема генератора постоянного тока независимого возбуждения изображена на рис. 9.15. Важнейшая особенность этой схемы — независимость тока возбуж-

дения и магнитного потока главных полюсов от нагрузки генератора.

Физические величины, характеризующие работу электрической машины, связаны между собой определенными зависимостями, которые называют характеристиками.

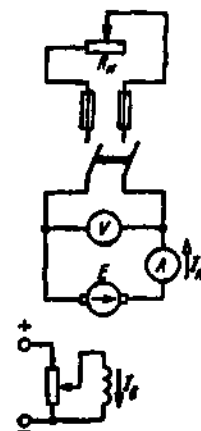
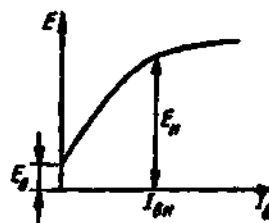


Рис. 9.15. Схема генератора постоянного тока независимого возбуждения

Рис. 9.16. Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения



Рассмотрим основные характеристики генератора независимого возбуждения.

Характеристикой холостого хода называют зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения при постоянной частоте вращения якоря и отключенной нагрузке:

$$E = f(I_a) \quad (I = 0, n = \text{const}).$$

Ее обычно снимают при номинальной частоте вращения генератора.

Характеристика холостого хода (рис. 9.16) представляет собой изображенную в другом масштабе часть петли гистерезиса магнитной системы генератора. Поскольку ЭДС пропорциональна магнитной индукции, а напряженность магнитного поля — току возбуждения, зависимость $E(I_a)$ имеет такой же вид, как зависимость $B(H)$.

Таким образом, характеристика холостого хода отображает свойства магнитопровода. Поскольку после первоначального намагничивания коэрцитивная сила удерживает в магнитопроводе небольшой остаточный магнитный поток, ЭДС генератора не равна

нулю при токе возбуждения, равном нулю. Эту ЭДС называют остаточной: $E_0 = E$ при $I_a = 0$.

Изгиб характеристики холостого хода объясняется насыщением магнитопровода. Номинальный ток возбуждения выбирают таким, чтобы он соответствовал участку перегиба характеристики холостого хода. При этом наилучшим образом используется свойство магнитопровода усиливать магнитный поток обмоток возбуждения.

Характеристика холостого хода может быть рассчитана теоретически или снята экспериментально. В последнем случае ЭДС измеряется вольтметром, подключенным к зажимам генератора.

Внешней характеристикой называют зависимость нагрузки на зажимах генератора от тока нагрузки при постоянной частоте вращения и постоянном сопротивлении цепи возбуждения:

$$U = f(I) (n = \text{const}, R_a = \text{const}).$$

При отсутствии размагничивающего действия реакции якоря внешняя характеристика описывается уравнением $U = E - IR_a$, представляющим прямую линию в плоскости координатных осей U, I . При насыщении магнитной системы и наличии размагничивающего действия реакции якоря с увеличением нагрузки ЭДС генератора уменьшается, поэтому напряжение генератора снижается быстрее, чем по закону прямой линии (рис. 9.17).

Внешняя характеристика позволяет определить, в каких пределах изменяется напряжение генератора при изменении нагрузки.

Регулировочной характеристикой называют зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при постоянных частоте вращения и напряжении на зажимах генератора:

$$I_a = f(I) (n = \text{const}, U = \text{const}).$$

Регулировочная характеристика показывает, как нужно изменять ток возбуждения, чтобы поддерживать постоянным напряжение генератора при изменении его нагрузки.

С увеличением тока нагрузки напряжение генератора уменьшается. Чтобы поддерживать его постоянным, необходимо увеличивать ЭДС. При постоянной частоте вращения это достигается увеличением маг-

нитного потока, а следовательно, и тока возбуждения (рис. 9.18).

Регулировочные характеристики используют при проектировании регуляторов напряжения.

Генераторы независимого возбуждения находят применение в схемах автоматики, в двигатель-генера-

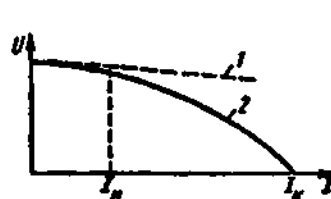


Рис. 9.17. Внешние характеристики генератора независимого возбуждения при отсутствии (прямая 1) и наличии (кривая 2) размагничивающего действия реакции якоря



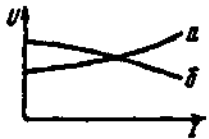
Рис. 9.18. Регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения

торных агрегатах, когда требуется изменять не только значение, но и полярность напряжения на зажимах, а также в качестве тахогенераторов, предназначенных для дистанционного измерения частоты вращения.

Недостатком этих машин является необходимость иметь отдельный источник энергии для питания обмотки возбуждения или постоянные магниты.

Карточка № 9.7 (112)
Генераторы постоянного тока независимого возбуждения

При независимом возбуждении как изменяются с увеличением нагрузки: а) магнитный поток главных полюсов; б) результирующий магнитный поток генератора?	а) Не изменяется; б) увеличивается	99
	а), б) Уменьшается	93
	а) Не изменяется; б) уменьшается	129
	а) Увеличивается; б) не изменяется	135

Определить ЭДС остаточного намагничивания генератора по графику 	3 В	11
	Около 12 В	60
	Для ответа на вопрос недостаточно данных	17
Используя график предыдущей задачи, найти примерное номинальное напряжение машины	Около 12 В	104
	Около 6 В	151
	Около 18 В	13
ЭДС генератора 240 В. Сопротивление обмотки якоря 0,1 Ом. Определить напряжение на зажимах генератора при токе нагрузки 100 А	240 В	49
	230 В	114
	220 В	115
На графике изображены характеристики генератора независимого возбуждения. Какие это характеристики? 	Для ответа на вопрос недостаточно данных	138
	а) Внешняя; б) регулировочная	173
	а) Регулировочная; б) внешняя	54

§ 9.8. ГЕНЕРАТОРЫ С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ

В генераторах с самовозбуждением питание обмотки главных полюсов осуществляется напряжением самого генератора. При этом отпадает необходимость в отдельном источнике энергии.

В зависимости от схемы включения обмотки возбуждения различают генераторы параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

Генератор параллельного возбуждения. Схема генератора параллельного возбуждения, или шунтового генератора, изображена на рис. 9.19.

Ток якоря генератора разветвляется на ток нагрузки и ток возбуждения: $I_a = I + I_f$, причем ток возбуждения составляет 1—3% от номинального тока нагрузки.

Характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения аналогична характеристике холостого хода генератора независимого возбуждения. Поскольку ток возбуждения невелик, генератор можно считать ненагруженным. При необходимости получить

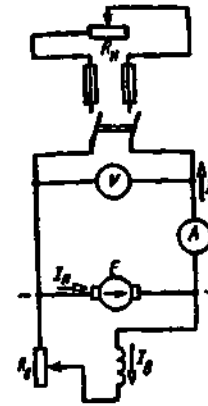
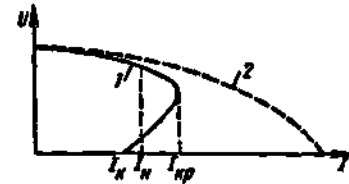


Рис. 9.19. Схема генератора параллельного возбуждения

Рис. 9.20. Внешние характеристики генератора параллельного возбуждения при самовозбуждении (кривая 1) и независимом возбуждении (кривая 2)



более точную характеристику обмотки возбуждения генератора параллельного возбуждения питания от отдельного источника.

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения (рис. 9.20) показывает, что напряжение на его зажимах с увеличением тока нагрузки падает быстрее, чем при независимом возбуждении.

Падение напряжения на зажимах генератора объясняется тремя причинами: 1) уменьшением среднего значения магнитной индукции в машине вследствие реакции якоря; 2) увеличением падения напряжения внутри генератора, пропорциональным току нагрузки; 3) уменьшением (вследствие двух первых причин) напряжения, подводимого к цепи возбуждения.

Ток нагрузки генератора может быть определен по закону Ома:

$$I = U / R_n,$$

где U — напряжение на зажимах генератора, равное напряжению на обмотке возбуждения; R_n — сопротивление нагрузки.

При снятии внешней характеристики увеличение тока I осуществляется за счет уменьшения сопротивления R_n . Как указывалось, с увеличением тока

I уменьшается напряжение U на зажимах генератора. Следовательно, при уменьшении R_n одновременно уменьшается и U . При некотором значении тока нагрузки скорость уменьшения U сравнивается со скоростью уменьшения R_n и, как следует из формулы закона Ома, увеличение тока прекращается. Это максимально возможное значение тока называют критическим $I_{кр}$. При дальнейшем уменьшении сопротивления R_n напряжение U падает относительно быстрее и ток нагрузки тоже начинает уменьшаться. Поэтому для генераторов параллельного возбуждения не опасны короткие замыкания. Ток короткого замыкания I_k такого генератора обычно меньше номинального тока и создается только за счет остаточного намагничивания, поскольку напряжение на зажимах генератора, а следовательно, и напряжение, подводимое к цепи возбуждения, при коротком замыкании равны нулю.

Регулировочная характеристика рассматриваемого генератора в пределах рабочих токов нагрузки имеет такой же вид, как и у генератора независимого возбуждения. Для поддержания неизменного напряжения на зажимах генератора с возрастанием тока нагрузки необходимо увеличивать ток возбуждения, что достигается уменьшением сопротивления R_n цепи возбуждения машины.

Генераторы постоянного тока параллельного возбуждения находят широкое применение, особенно в качестве бортовых источников питания, на подвижных объектах: кораблях, самолетах, автомобилях и т. д.

Генератор последовательного возбуждения. Генератор последовательного возбуждения, или серийный генератор, назван так потому, что обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены последовательно (рис. 9.2, а). Для этого генератора $I = I_n = I_b$.

Характеристика холостого хода, отображающая магнитные свойства системы возбуждения, может быть снята только при независимом возбуждении.

Внешняя характеристика изображена на рис. 9.21, б. Пока магнитная система не насыщена, с увеличением тока нагрузки возрастают магнитный поток и ЭДС генератора. Однако по мере насыщения магнитопровода рост ЭДС замедляется, а размагничивающее действие реакции якоря проявляется все сильнее. Поэтому напряжение, достигнув максимального значения, начинает снижаться.

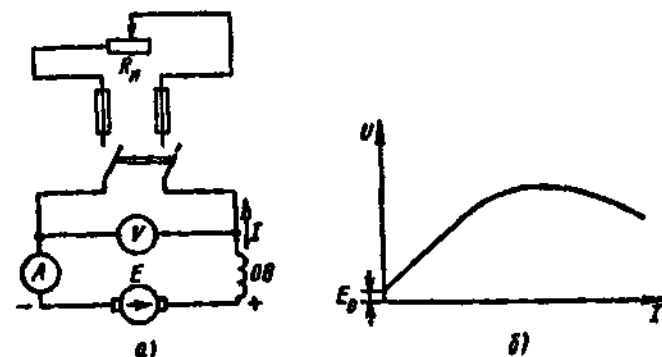


Рис. 9.21. Генератор последовательного возбуждения:
а — схема; б — внешняя характеристика

Генераторы последовательного возбуждения используют сравнительно редко.

Генераторы смешанного возбуждения. Более широкое применение находят генераторы постоянного тока, у которых магнитный поток возбуждения создается двумя обмотками: шунтовой и серийной. Это генераторы смешанного возбуждения, или компаундные генераторы (рис. 9.22), которые могут иметь согласно или встречно включенные обмотки возбуждения.

У генераторов с согласным включением обмоток напряжение почти не изменяется при изменении нагрузки. Это объясняется тем, что магнитный поток серийной обмотки создается током нагрузки и при увеличении возрастает, компенсируя влияние реакции якоря и увеличение падения напряжения внутри машины. Генераторы с согласным включением обмоток применяют в тех случаях, когда требуется высокая стабильность напряжения питания при изменении нагрузки в широких пределах.

Генераторы со встречным включением обмоток имеют крутопадающую внешнюю характеристику. При увеличении тока нагрузки встречный поток серийной обмотки размагничивает машину и напряжение генератора резко снижается. Такие машины используют в качестве сварочных генераторов, где требуется относительно постоянное постоянство сварочного тока при изменении напряжения в широких пределах вплоть до значений близких к нулю (когда электрод касается свариваемых деталей).

Внешние характеристики генератора смешанного возбуждения изображены на рис. 9.23.

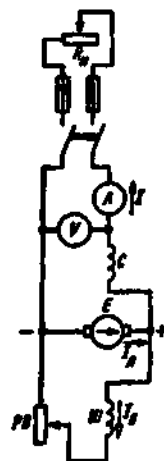
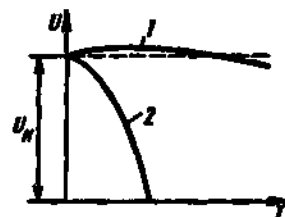


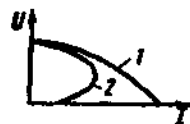
Рис. 9.22. Схема генератора смешанного возбуждения

Рис. 9.23. Внешние характеристики генератора смешанного возбуждения при согласном (кривая 1) и встречном (кривая 2) включении обмоток возбуждения



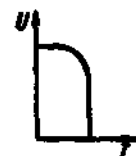
Карточка № 9.8 (268)
Генераторы с самовозбуждением

При параллельном возбуждении как изменяются с увеличением нагрузки: а) магнитный поток главных полюсов; б) результирующий магнитный поток генератора?	а) Увеличивается; б) уменьшается	31
	а), б) Уменьшается	42
	а) Уменьшается; б) не изменяется	61
	а), б) Не изменяется	137
Указать внешнюю характеристику генератора параллельного возбуждения	Кривая 1	176
	Кривая 2	15
Чем определяется ЭДС при холостом ходе генератора последовательного возбуждения?	Остаточной намагниченностью полюсов	157
	Частотой вращения якоря	36
	Тем и другим	152



Продолжение

По приведенной внешней характеристике генератора смешанного возбуждения определить, как включены обмотки возбуждения



По приведенной внешней характеристике генератора смешанного возбуждения определить, как включены обмотки возбуждения	Согласно	77
	Встречно	92
Как следует включить обмотки возбуждения компаундного генератора, чтобы уменьшить влияние тока нагрузки на напряжение генератора?	Согласно	167
	Встречно	110

§ 9.9. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО И ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ

У двигателя параллельного возбуждения цепь обмотки возбуждения, так же как и цепь обмотки якоря, включена под постоянное напряжение сети. Цепь обмотки возбуждения можно питать и от отдельного источника постоянного тока (независимое возбуждение). И в том и в другом случае ток возбуждения не зависит от тока якоря.

Схема включения в сеть двигателя постоянного тока параллельного возбуждения изображена на рис. 9.24. Обмотка якоря включается в сеть через ступенчатый пусковой реостат $R_{п}$, обмотка возбуждения — через реостат $R_{ш}$. Токпроводящая ручка пускового реостата соединена с зажимом Л и до запуска двигателя находится на контакте О. При запуске она последовательно перемещается в крайнее левое положение.

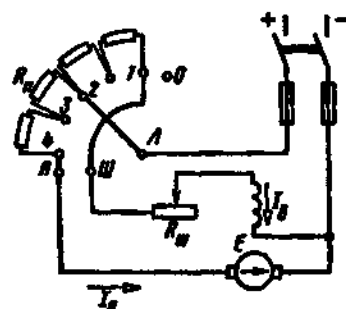


Рис. 9.24. Схема включения в сеть двигателя постоянного тока параллельного возбуждения: Л — линия; Я — якорь; Ш — шунт

При этом цепь возбуждения непосредственно подсоединена к сети через дугообразный контакт III, а цепь якоря Я через секции пускового реостата. В процессе пуска число включенных секций уменьшается, а по окончании пуска пусковой реостат полностью выводится. Такая конструкция пускового реостата исключает разрыв цепи якоря при переключении ручки с одного контакта на другой. Следует иметь в виду, что пусковой реостат не рассчитан на длительное пребывание под током якоря, поэтому при работе двигателя его ручка должна находиться в крайнем левом положении.

Вращающий момент M двигателя определяется на основании закона Ампера $F = I_1 l B_{cp}$ и известной из механики формулы

$$M = F \frac{D}{2} N = B_{cp} I_1 l \frac{D}{2} N.$$

Здесь F — сила, действующая на один проводник обмотки якоря; D — диаметр якоря; N — общее число проводников в обмотке якоря; I_1 — ток в одном проводнике обмотки; l — действующая длина проводника; B_{cp} — среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре машины.

Напомним, что $B_{cp} = 2p\Phi / (\pi D l)$ (см. § 9.4), $I_1 = I_a / (2a)$. Таким образом,

$$M = B_{cp} I_1 l \frac{D}{2} N = \frac{2p\Phi}{\pi D l} \frac{I_a}{2a} l \frac{D}{2} N = \frac{pN}{2\pi a} I_a \Phi.$$

Постоянный для данного двигателя коэффициент $pN / (2\pi a)$ обозначают c_M . Таким образом, $M = c_M I_a \Phi$, т. е. вращающий момент двигателя прямо пропорционален току якоря и магнитному потоку возбуждения:

Выражение для вращающего момента двигателя можно получить и другим способом.

Электромагнитная мощность P_e , за счет которой создается момент, поворачивающий якорь,

$$P_e = E I_a,$$

где E — ЭДС в обмотке якоря машины, работающей как генератор, и противо-ЭДС машины, работающей как двигатель.

Из механики известно, что мощность, вращающий момент и угловая частота вращения связаны соотношением $P_e = M\omega$. Следовательно, $M\omega = E I_a$, откуда $M = E I_a / \omega$.

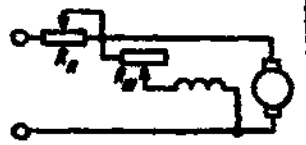
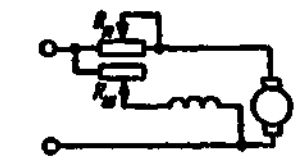
Угловая скорость ω (рад/с) и частота вращения n (об/мин) легко выражаются друг через друга: $\omega = 2\pi n / 60$.

Напомним, что ЭДС машины $E = c_E \Phi$. Следовательно,

$$M = \frac{c_E \Phi I_a}{2\pi n / 60} = \frac{60 c_E}{2\pi} \Phi I_a = c_M \Phi I_a,$$

где $c_M = 60 c_E / (2\pi)$.

Карточка № 9.9 (248)
Двигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения. Вращающий момент

На какой из схем пусковой реостат двигателя параллельного возбуждения включен правильно?		70
		155
		163
Определить силу, действующую на один проводник обмотки якоря, если $B_{cp} = 2$ Тл; $I_1 = 10$ А; $l = 5$ см	1 Н	10
	100 Н	38
	1 кг	67
Найти вращающий момент двигателя, если $D = 5$ см, $N = 200$ (остальные данные см. во втором задании)	10 Н·м	117
	5 Н·м	148
	500 Н·м	12
Постоянная машины, работающей в качестве генератора, равна 6,28. Рассчитать постоянную машины, работающей в качестве двигателя	6,28	88
	6	62
	60	82

Ток якоря увеличился в 2 раза. Как изменился вращающий момент двигателя параллельного возбуждения?	Не изменился	121
	Увеличился в 2 раза	153
	Увеличился в 4 раза	103

§ 9.10. МЕХАНИЧЕСКАЯ И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО И ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Зависимость установившейся частоты вращения от момента двигателя при постоянном напряжении питания цепей якоря и возбуждения называют механической характеристикой.

Зависимости частоты вращения n , тока якоря I_a , вращающего момента M и коэффициента полезного действия η от полезной мощности P_2 на валу двигателя при постоянном напряжении цепей якоря и возбуждения ($I_a = \text{const}$) называют рабочими характеристиками.

Механическая и рабочие характеристики двигателя независимого возбуждения аналогичны этим характеристикам двигателя параллельного возбуждения.

Выведем уравнение механической характеристики. Подведенное к цепи якоря напряжение расходуется во внутреннем сопротивлении машины и компенсирует противо-ЭДС: $U = E + I_a R_a$. Подставив в это уравнение $E = c_E n \Phi$ и $I_a = M / (c_M \Phi)$, получим зависимость между n и M :

$$U = c_E n \Phi + \frac{M}{c_M \Phi} R_a.$$

Выразив эту зависимость в явном виде, получим уравнение механической характеристики:

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{R_a}{c_E c_M \Phi^2} M.$$

При отсутствии тормозного момента на валу частота вращения двигателя максимальна: $n_0 = U / (c_E \Phi)$. С увеличением момента частота вращения двигателя

уменьшается по линейному закону: $n = n_0 - kM$, где k — постоянный коэффициент.

Механическая характеристика рассматриваемых двигателей изображена на рис. 9.25. Как видно из рисунка, частота вращения двигателей при изменении тормозного момента в широких пределах (от нуля до номинального) изменяется незначительно. Следовательно, двигатели независимого и параллельного возбуждения имеют жесткую механическую характеристику.

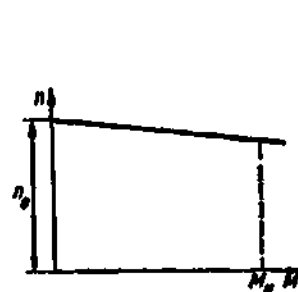


Рис. 9.25. Механическая характеристика двигателей постоянного тока параллельного и независимого возбуждения

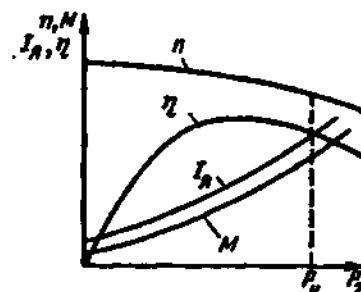
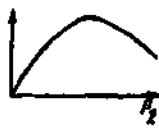


Рис. 9.26. Рабочие характеристики двигателей постоянного тока параллельного и независимого возбуждения

Рабочие характеристики двигателей параллельного и независимого возбуждения представлены на рис. 9.26. Так как с увеличением полезной мощности P_2 вращающий момент возрастает, частота вращения двигателя уменьшается (ср. с механической характеристикой). С увеличением вращающего момента увеличивается и пропорциональный ему ток якоря. Машину проектируют таким образом, чтобы наибольший КПД достигался при нагрузках, несколько меньших номинальной.

Отечественные заводы выпускают машины постоянного тока различного типа и назначения. Электродвигатели серии П с номинальными мощностями от 0,13 до 200 кВт используют в электрических приводах, требующих широкого и плавного регулирования частоты вращения.

Укажите характеристики двигателя: а) механическую; б) рабочую	а) $n(P_2)$; б) $n(M)$	120
	а) $n(M)$; б) $M(P_2)$	131
	а) $n(P_2)$; б) $M(P_2)$	166
Какие характеристики изображены на графиках?	а), б) Рабочая	170
	а) Механическая; б) рабочая	89
	а) Рабочая; б) механическая	9
	Для ответа на вопрос недостаточно данных	132
Какая из рабочих характеристик изображена на графике?		
		
		
		
Какая из рабочих характеристик изображена на графике?	$M(P_2)$	123
	$I_a(P_2)$	102
	$\eta(P_2)$	48
Какая из рабочих характеристик изображена на графике?	$M(P_2)$	147
	$I_a(P_2)$	98
	Любая из указанных ранее	145
При какой нагрузке КПД двигателя достигает максимума?	Номинальной	73
	Равной примерно половине номинальной	83
	Несколько большей номинальной	124

§ 9.11. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО И ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Обратимся еще раз к основному уравнению электродвигателя $U = E + I_a R_a$. Выражение для ЭДС двигателя ничем не отличается от выражения для ЭДС генератора. Это и понятно: и в том и в другом случае проводники обмотки пересекают силовые линии магнитного поля. Тот факт, что якорь генератора раскручивается механической, а якорь двигателя — электромагнитной силами, с точки зрения закона электромагнитной индукции не имеет значения. Поэтому $E = c_E n \Phi$ и, следовательно, $U = c_E n \Phi + I_a R_a$. Отсюда частота вращения двигателя

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c_E \Phi}$$

С практической точки зрения важно представлять условия и способы регулирования частоты вращения двигателя. Выведенная формула позволяет решить эту задачу. Прежде всего отметим, что для уменьшения потерь мощности сопротивление обмотки якоря стремятся сделать по возможности малым (в реальных машинах оно составляет сотые или тысячные доли ом). В соответствии с этим и падение напряжения на активном сопротивлении якоря $I_a R_a$ невелико по сравнению с напряжением сети. Поэтому в формуле для частоты вращения двигателя произведением $I_a R_a$ можно пренебречь. Тогда $n \approx U / (c_E \Phi)$.

Таким образом, существует два способа плавного изменения частоты вращения двигателя в широких пределах: 1) изменение напряжения U , подведенного к якорю двигателя; 2) изменение магнитного потока возбуждения Φ (тока возбуждения I_a).

На рис. 9.27 показано возможное подключение регулировочных реостатов к схеме двигателя. Увеличивая сопротивление R_2 при постоянном напряжении сети U ,

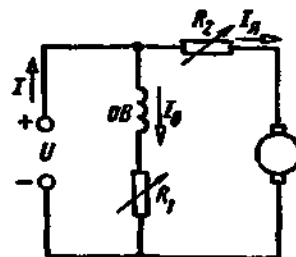


Рис. 9.27. Включение регулировочных реостатов в схему двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

уменьшаем напряжение, подведенное к якору, и частоту вращения двигателя. Увеличивая сопротивление R_1 , уменьшаем ток возбуждения и магнитный поток возбуждения, а следовательно, увеличиваем частоту вращения двигателя.

Второй способ регулирования частоты вращения двигателя предпочтительнее, так как он связан с меньшими потерями энергии: ток возбуждения в десятки раз меньше тока якоря, а потери в регулировочном реостате пропорциональны квадрату тока. Однако при необходимости изменения частоты вращения двигателя в очень широких пределах одновременно используют оба способа.

Возможность плавного и экономичного регулирования частоты вращения в широких пределах является важнейшим достоинством двигателей постоянного тока.

Во многих случаях возникает необходимость менять направление вращения якоря электродвигателя. Изменение направления вращения называют реверсированием.

Для реверсирования двигателя постоянного тока следует изменить направление магнитного потока возбуждения или тока якоря. При одновременном изменении направления потока возбуждения и тока якоря за счет изменения полярности напряжения источника питания направление вращения якоря двигателя не меняется.

Реверсирование двигателей осуществляют с помощью переключателей в цепи якоря или в цепи возбуждения.

Выражение для частоты вращения двигателя показывает, что по мере уменьшения магнитного потока возбуждения частота неограниченно возрастает. С этой точки зрения опасен обрыв цепи возбуждения двигателя, при котором магнитный поток резко уменьшается до потока остаточного намагничивания, а двигатель идет «вразнос». Особенно вероятен режим «разноса» у ненагруженного двигателя. Режим «разноса» является аварийным: центробежные силы деформируют обмотку якоря, якорь заклинивается, а в некоторых случаях и разрушается.

У нагруженного двигателя увеличение частоты вращения происходит не столь резко, так как уменьшение магнитного потока при постоянном моменте вращения

приводит к такому увеличению тока якоря, при котором произведением $I_a R_a$ уже нельзя пренебрегать. Но и в этом случае обрыв цепи возбуждения может быть опасным.

Карточка № 9.11 (179)

Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения

При постоянном напряжении питания магнитный поток возбуждения уменьшился. Как изменилась частота вращения двигателя?	Увеличилась	34
	Не изменилась	72
	Уменьшилась	130
При прочих неизменных условиях напряжение, подведенное к обмотке якоря, уменьшилось. Как изменилась частота вращения двигателя?	Увеличилась	78
	Не изменилась	57
	Уменьшилась	164
Как изменится частота вращения двигателя при уменьшении: а) R_1 ; б) R_2 ?	а) Увеличится; б) уменьшится	178
	а) Уменьшится; б) увеличится	154
	Оба способа примерно равноценны	59
	Изменение R_1	127
	Изменение R_2	86
Как изменяется частота вращения двигателя параллельного возбуждения при обрыве обмотки возбуждения в режиме холостого хода?	Двигатель останавливается	161
	Частота резко возрастает	100

§ 9.12. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО И СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В двигателе последовательного возбуждения обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря (рис. 9.28, а), поэтому магнитный поток Φ пропорционален I (если пренебречь насыщением магнито-

провода) и в формуле $M = c_M \Phi$ следует положить $\Phi = kI$, где k — постоянный коэффициент. Тогда $M = c_M k I^2$.

Вращающий момент двигателя последовательного возбуждения пропорционален квадрату тока.

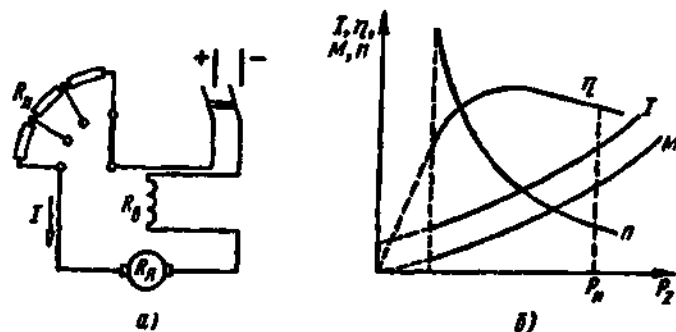


Рис. 9.28. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения:

а — схема; б — рабочие характеристики

Выразим магнитный поток через вращающий момент:

$$M = \frac{c_M}{k} \Phi^2; \quad \Phi = k_1 \sqrt{M}; \quad k_1 = \sqrt{k/c_M}$$

и подставим в приближенное выражение для частоты вращения двигателя:

$$n \approx \frac{U}{c_E \Phi} = \frac{U}{c_E k_1 \sqrt{M}}$$

Таким образом, для двигателя последовательного возбуждения опасен режим холостого хода, так как при уменьшении момента на валу частота вращения неограниченно увеличивается (рис. 9.28, б) и двигатель идет «вразнос». Это обстоятельство требует такого сочленения двигателя последовательного возбуждения с рабочей машиной, при котором режим холостого хода был бы исключен. В частности, нельзя применять ременную передачу, так как при ослаблении или обрыве ремня может возникнуть аварийный режим.

Частоту вращения двигателя последовательного возбуждения можно регулировать либо изменением подводимого напряжения (рис. 9.29, а), либо изменением магнитного потока возбуждения за счет шунтирования

обмотки возбуждения (рис. 9.29, б). Второй способ более экономичен.

Двигатель последовательного возбуждения имеет существенные преимущества вследствие квадратичной зависимости вращающего момента от тока. Так, напри-

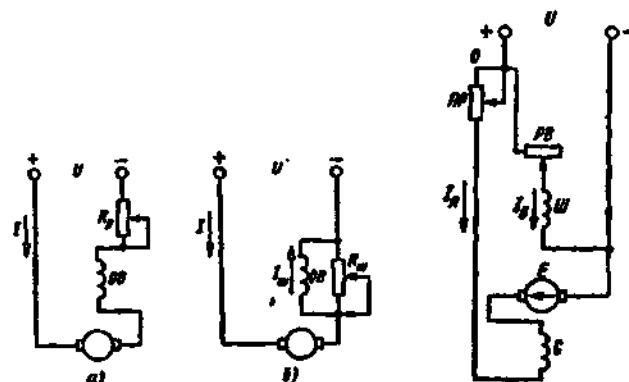


Рис. 9.29. Схемы регулировки частоты вращения двигателей последовательного возбуждения: а — изменением подводимого напряжения; б — шунтированием обмотки возбуждения

Рис. 9.30. Электрическая схема двигателя смешанного возбуждения

мер, он развивает большой пусковой момент, это очень важно для электропривода на транспорте (благодаря этому электропоезд способен быстро набирать скорость после остановки). Однако резко выраженная зависимость частоты вращения от нагрузки и опасность «разноса» ограничивают область применения этих двигателей.

Указанных недостатков лишены двигатели смешанного возбуждения (рис. 9.30). Характеристики этих двигателей являются промежуточными между характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения.

При согласном включении последовательной и параллельной обмоток возбуждения двигатель смешанного возбуждения имеет больший пусковой момент по сравнению с шунтовым двигателем. При встречном включении обмоток возбуждения двигатель имеет жесткую механическую характеристику. С увеличением нагрузки магнитный поток серийной обмотки увеличи-

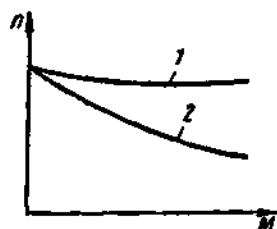


Рис. 9.31. Механические характеристики компаундного двигателя при встречном (кривая 1) и согласном (кривая 2) включении обмоток возбуждения

вается и, вычитаясь из потока шунтовой обмотки, уменьшает общий поток возбуждения. При этом частота вращения двигателя не только не уменьшается, а может даже увеличиться (рис. 9.31). И в том и в другом случае наличие магнитного потока шунтовой обмотки исключает режим «разноса» двигателя при снятии нагрузки.

Регулирование частоты вращения двигателя смешанного возбуждения осуществляют регулировочным реостатом в цепи шунтовой обмотки.

Двигатели смешанного возбуждения применяют в качестве тяговых и крановых двигателей, а также для привода прокатных станов, компрессоров, насосов.

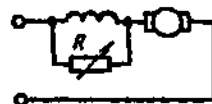
Машины постоянного тока экономичны. Их КПД при номинальной нагрузке составляет 75% и выше. Чем больше номинальная мощность машины, тем выше ее КПД. У машин мощностью 100 кВт КПД достигает 92%.

Карточка № 9.12 (230)
Двигатели постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения

Как изменится вращающий момент двигателя последовательного возбуждения, если его ток увеличится в 3 раза (насыщением магнитного провода пренебречь)?	Увеличится в 3 раза	74
	Увеличится в 9 раз	26
Во сколько раз пусковой момент двигателя последовательного возбуждения больше номинального момента, если пусковой ток превышает номинальный в 5 раз?	В 5 раз	69
	В 25 раз	53
Что произойдет, если двигатель последовательного возбуждения подключить к сети при отключенной механической нагрузке на валу?	Двигатель не запустится	51
	Обмотка якоря перегреется	63
	Двигатель пойдет «разнос»	149

Продолжение

Как изменится частота вращения двигателя при увеличении сопротивления R ?



Увеличится	1
Уменьшится	81

Какая кривая является рабочей характеристикой двигателя смешанного возбуждения: а) с согласным включением обмоток возбуждения; б) со встречным включением обмоток возбуждения?



а) Кривая 1; б) кривая 2	136
а) Кривая 2; б) кривая 1	21

ГЛАВА 10

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ

§ 10.1. АВТОМАТЫ И АВТОМАТИКА

Автоматами называют устройства, способные управлять различными объектами и процессами без непосредственного участия человека.

Автоматические устройства известны издавна. Однако автоматы, созданные в древности или в средние века, не имели большого практического значения, использовались для развлечения.

Промышленные системы автоматического регулирования появились во второй половине 18 века. В 1765 г. русский механик И. И. Ползунов изобрел автоматическое устройство, регулирующее уровень воды в котле паровой машины. Идея Ползунова в различных технических решениях до настоящего времени находит применение в системах поддержания заданного уровня жидкости в сосуде. В частности, регулятор уровня бензина в поплавковой камере автомобильного карбюратора работает по тому же принципу, что и регулятор И. И. Ползунова. Несколько позже, в 1784 г., английский

ский механик Д. Уатт изобрел центробежный регулятор частоты вращения вала паровой машины.

К середине прошлого века было изобретено большое число автоматов, различных по принципу действия и областям применения. Одновременно накопилось достаточно много фактов, свидетельствующих о том, что всем автоматическим устройствам присущи некоторые общие черты. Оказалось, что любой автомат может быть разложен на ограниченное число типовых звеньев, а автоматическая система с заданными свойствами может быть собрана из отдельных элементов по определенным правилам.

Поскольку были найдены общие методы разработки любого автомата, не зависящие от его физической природы, появилась необходимость в их систематизации и выделении автоматических устройств в особую группу, в которой физические процессы подчиняются специфическим закономерностям.

Автоматика как самостоятельная наука, изучающая методы анализа и синтеза автоматов, позволила ускорить автоматизацию различных сторон человеческой деятельности.

Можно говорить о научных, социальных, философских и других аспектах автоматизации, но во всех случаях следует четко различать цели автоматизации и последствия, к которым она приводит в условиях социалистического и капиталистического строя.

В условиях капитализма, где конечная цель производства — получение максимальной прибыли, применение автоматов ведет к росту безработицы.

При социализме, где цель производства — удовлетворение потребностей человека, автоматизация не вступает в противоречие с интересами рабочего.

Существенный вклад в развитие автоматики внесли работы советских ученых. Без этих работ были бы невозможны многие блестящие достижения отечественной науки и техники, в частности поражающие воображение победы в освоении космического пространства. Первый орбитальный полет Ю. А. Гагарина, исследования Венеры, Марса, Луны, создание искусственных спутников Земли и планет осуществлены с помощью самых совершенных автоматов, разработанных нашими конструкторскими коллективами.

Теория автоматического регулирования как науки возникла из потребностей практики.

В настоящее время успешно решается проблема автоматизации не только физической, но и умственной деятельности человека.

Карточка № 10.1 (231)
Автоматы и автоматика

Где и когда появились первые автоматы?	В Древней Греции	24
	В 1765 г. в России	48
	В 1784 г. в Англии	72
Кто изобрел поплавковый регулятор уровня жидкости в сосуде?	Английский механик Д. Уатт	96
	Русский механик И. Ползунов	120
Что служит главным стимулом автоматизации производства при капитализме?	Повышение производительности труда	144
	Увеличение национального дохода	121
	Рост прибыли	97
	Все перечисленные последствия автоматизации	73
К каким последствиям приводит автоматизация производства при социализме?	Облегчается труд рабочего	143
	Повышается благосостояние трудящихся	163
	Уменьшается различие между умственным и физическим трудом	179
	Ко всем перечисленным последствиям	178
Что послужило основным стимулом возникновения науки об автоматах?	Развитие физики	49
	Развитие математики	25
	Потребности практики	12

§ 10.2. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

По принципу действия различают разомкнутые и замкнутые системы автоматического регулирования (САР).

Возможны два варианта разомкнутых систем. В одном случае регулятор воздействует на регулируемый объект по заранее разработанной и записанной программе. В другом — возмущающее воздействие на объект измеряют, полученный сигнал усиливают и подают на исполнительное устройство, которое перемещает регулирующий орган (например, руль) так, чтобы скомпенсировать действие возмущающей силы (рис. 10.1).

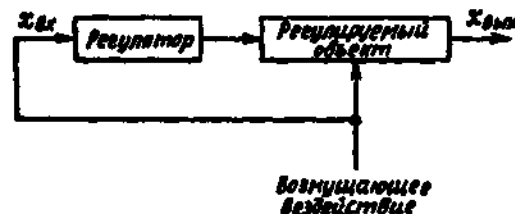


Рис. 10.1. Структурная схема разомкнутой САР

Принципиальный недостаток этой схемы — необходимость измерения возмущающих воздействий. Поскольку многие реальные объекты регулирования подвержены таким возмущающим воздействиям, которые невозможно учесть и измерить, то разомкнутые системы не в состоянии обеспечить заданную точность регулирования.

Этот недостаток отсутствует в замкнутой системе (рис. 10.2), где сигнал с выхода регулируемого объекта поступает на сумматор Σ и сравнивается с входным сигналом. Цепь, по которой сигнал с выхода регулируемого объекта подается в сумматор, называется цепью обратной связи, а сам сигнал — сигналом обратной связи $x_{ос}$.

Регулирование в замкнутой системе осуществляется по рассогласованию: $\Delta x = x_{вх} \pm x_{ос}$.

При нормальных режимах работы сумматор осуществляет вычитание сигналов. При этом регулятор измеряет Δx и воздействует на регулируемый объект таким образом, чтобы $\Delta x = x_{вх} - x_{ос} \rightarrow 0$. В этом случае $x_{ос} \approx x_{вх}$, а положение объекта, характеризуемое сигналом $x_{ос}$, соответствует сигналу управления $x_{вх}$.

Независимо от числа и характера возмущающих воздействий в пределах, на которые рассчитана система, на регулятор поступает только один сигнал Δx .

Замкнутые системы обеспечивают управление объектом в самых сложных условиях и играют важную роль в современной автоматике.

Для работы замкнутой системы важно, чтобы сигнал $x_{ос}$ поступал на вход сумматора с отрицательным знаком (отрицательная обратная связь). Если по каким-либо причинам сигнал $x_{ос}$ меняет знак (положительная обратная связь), то система теряет устойчивость.

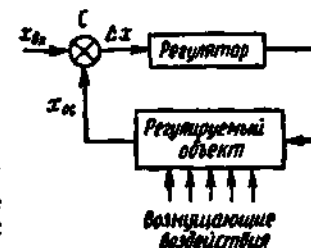


Рис. 10.2. Структурная схема замкнутой САР

В зависимости от характера изменения сигнала управления $x_{вх}$ замкнутые САР делятся на стабилизирующие, программного управления и следящие.

В стабилизирующих САР входной сигнал не меняется с течением времени: $x_{вх} = \text{const}$ (в частном случае $x_{вх} = 0$). К ним относятся, например, регуляторы напряжения и частоты в системах электроснабжения.

В системах программного управления входной сигнал изменяется во времени по строго определенному закону. Такие САР применяют при управлении полетом космических ракет и спутников.

В следящих системах сигнал $x_{вх}$ может изменяться произвольным образом в некоторых пределах. Эти системы обеспечивают, в частности, наведение тяжелых корабельных орудий на цель по сигналам, поступающим с визирного устройства.

Таким образом, во всех случаях система автоматического регулирования (рис. 10.3) состоит из объекта регулирования и регулятора. С объектом регулирования совмещен регулирующий орган, например руль. В свою очередь, в регуляторе выделяют: измерительное устройство, усилитель-преобразователь, исполнительное устройство.

Назначение систем автоматического регулирования разнообразно, они могут поддерживать стабильность давления и температуры, изменять по заданному закону положение ракеты на траектории, следить за полетом спутника связи и управлять поворотом наземных параболических антенн и т. д. Соответственно и измеряемые сигналы могут иметь различную физическую

природу. Однако в большинстве систем измеряемый сигнал преобразуется в электрический. Усиление электрического сигнала осуществляется с помощью реле, электронных или магнитных усилителей. В качестве исполнительных устройств чаще всего исполь-

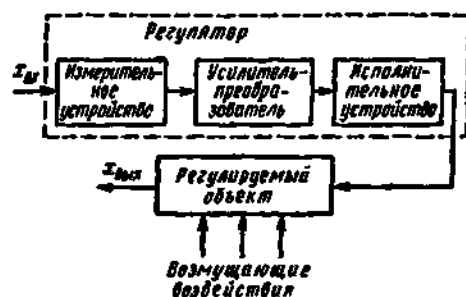


Рис. 10.3. Структурная схема блоков системы автоматического регулирования

зуют электромагниты и электрические двигатели. Помимо электрических и магнитных элементов в современных автоматах большое применение находят электронные элементы.

Карточка № 10.2 (323)
Структура системы автоматического регулирования

В какой системе автоматического регулирования необходимо измерять возмущающие воздействия?	В замкнутой	23
	В разомкнутой	47
В каком направлении движется сигнал по линии обратной связи?	От регулятора к регулируемому объекту	71
	От регулируемого объекта к регулятору	95
Как называется система автоматического регулирования, в которой входной сигнал изменяется с течением времени по заданному закону?	Стабилизирующая	119
	Следящая	142
	Программного регулирования	145
В каком случае система автоматического регулирования теряет устойчивость?	Когда входной сигнал вычитается из сигнала обратной связи	122

Продолжение

Какой элемент системы автоматического регулирования не относится к регулятору?	Когда сигнал обратной связи вычитается из входного сигнала	98
	Когда сигнал обратной связи складывается с входным сигналом	74
	Регулирующий орган	162
	Исполнительное устройство	50
	Усилитель-преобразователь	26
	Измерительное устройство	11

§ 10.3. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СИГНАЛОВ В АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Измерительное устройство состоит из чувствительного элемента и датчика. Чувствительный элемент реагирует на изменения измеряемой физической величины. Датчик преобразует эти изменения в электрические сигналы.

Наибольшее распространение получили параметрические датчики, в которых изменение неэлектрической величины приводит к изменению какого-либо электрического параметра.

На рис. 10.4 изображен потенциометрический датчик, который служит для измерения линейных и угловых перемещений. Связав движок потенциометра с поплавком, можно измерять высоту h уровня, а следовательно, и количество жидкости в сосуде. Напряжение U на входе поддерживается постоянным ($U = \text{const}$) и равномерно распределено по виткам потенциометра. Напряжение U_x снимается с части витков, которая тем больше, чем выше уровень жидкости. Таким образом, линейное перемещение поплавка измеряется и преобразуется в изменения электрического сигнала (напряжения) на выходе схемы.

На рис. 10.5 изображено устройство тензометрического датчика, применяемого для измерения дефор-

мации различных деталей. Константановую (с малым коэффициентом температурного расширения) проволоку диаметром несколько десятков микрометров наклеивают на тонкую подложку, обычно из бумаги, которую, в свою очередь, приклеивают к исследуемой детали. Деформации детали передаются проволоке.

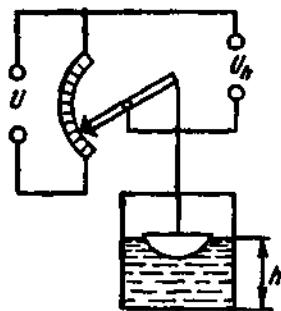


Рис. 10.4. Устройство потенциометрического датчика

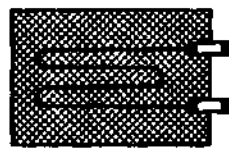


Рис. 10.5. Устройство тензометрического датчика

Ее длина, площадь сечения и электрическое сопротивление меняются. Измеряя изменение сопротивления проволоочки, можно получить точные данные о местных деформациях детали.

В последнее время широкое применение получили кремниевые тензодатчики (тензорезисторы). При сжатии под действием давления в полупроводниковом кристалле изменяется состояние энергетических зон, что приводит к существенному изменению его сопротивления. В СССР выпускается несколько десятков модификаций таких тензорезисторов, две из которых показаны на рис. 10.6, а, б.

В радиотехнике и автоматике для получения электрических сигналов используют индуктивные и емкостные датчики, работающие на переменном токе.

Устройство индуктивного датчика показано на рис. 10.7. На магнитопровод с переменным воздушным зазором δ намотана катушка, индуктивность которой L зависит от значения δ . Относительная магнитная проницаемость воздуха в тысячи раз меньше, чем железа, поэтому с увеличением воздушного зазора индуктивность катушки уменьшается. Рассмотренный датчик не позволяет получить сигнал на выходе (на-

пример, ток) равным нулю. Для этого пришлось бы увеличить индуктивность катушки до бесконечности, что невозможно.

Чтобы ввести нулевую точку отсчета и повысить чувствительность к малым изменениям зазора, используют дифференциальные индуктивные датчики, собран-

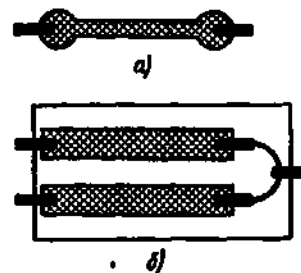


Рис. 10.6. Устройство полупроводниковых тензодатчиков

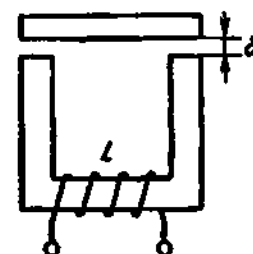


Рис. 10.7. Устройство индуктивного датчика

ные по мостовой (двухтактной) схеме (рис. 10.8). При нейтральном положении якоря датчика индуктивности катушек L_1 и L_2 одинаковы, а следовательно, одинаковы и токи в катушках $I_1 = I_2$. Падения напряжения на двух других плечах моста Z одинаковы и направлены встречно, а выходное напряжение $U_{\text{вых}} = 0$.

При смещении якоря вниз относительно нейтрального положения зазор δ_1 увеличится, а зазор δ_2 уменьшится. Индуктивность катушки L_1 уменьшится, а индуктивность L_2 увеличится, равенство токов нарушится ($I_1 \neq I_2$) и появится выходное напряжение $U_{\text{вых}} = I_1 Z - I_2 Z$. При смещении якоря вверх относительно нейтрали фаза напряжения на выходе схемы изменится на 180° .

Для измерения угловых перемещений применяется дифференциальный трансформаторный датчик с поворотным якорем (рис. 10.9). Катушки 1 и 3 намотаны встречно, к катушке 2 подведено первичное напряжение.

При нейтральном положении поворотного якоря ЭДС, наводимые в катушках 1 и 3, равны и компенсируют друг друга, напряжение на выходе равно нулю. При смещении якоря влево ЭДС первой катуш-

ки увеличивается, а второй — уменьшается. Появляется выходной сигнал $U_{\text{вых}}$, равный разности ЭДС катушек и совпадающий по фазе с ЭДС катушки 1. При повороте якоря вправо от нейтрали фаза выходного сигнала изменяется на 180° .

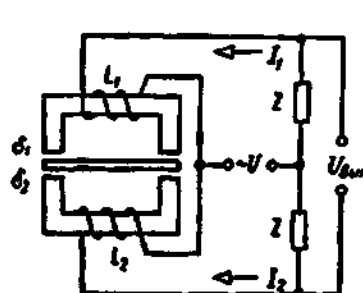


Рис. 10.8. Схема двухтактного индуктивного датчика

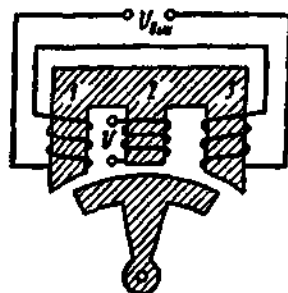


Рис. 10.9. Схема трансформаторного датчика с поворотным якорем

Емкостный датчик (рис. 10.10), помещенный в бак с топливом, которое имеет абсолютную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{\text{ст}}$, образован двумя коаксиальными трубками. Топливо свободно проникает в промежуток между этими трубками; следовательно, емкость конденсатора зависит от $\epsilon_{\text{ст}}$. Так как значение диэлектрической постоянной ϵ_0 воздуха значительно отличается от значения $\epsilon_{\text{ст}}$, то при изменении уровня жидкости в баке изменяется емкость конденсатора, образованного концентрическими трубками. Нетрудно заметить, что емкостный измеритель уровня проще и надежнее в эксплуатации, чем изображенный на рис. 10.4.

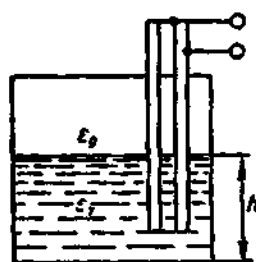


Рис. 10.10. Устройство емкостного датчика

В системах автоматического регулирования температуры широко применяют резистивные датчики, изготовленные из полупроводниковых материалов, сопротивление которых изменяется с изменением температуры (терморезисторы).

На изменении электрических свойств газовой среды под воздействием радиоактивного облучения основан принцип действия ионизационных датчиков.

Используют в автоматике и генераторные датчики, в которых изменение неэлектрической величины вызывает появление ЭДС. К генераторным датчикам относятся индукционные, термоэлектрические, пьезоэлектрические преобразователи, тахогенераторы и др.

Совершенствование датчиков — это повышение их чувствительности, надежности, а также миниатюризация.

Нередко в одном корпусе объединяются собственно датчик и усилитель-преобразователь.

Карточка № 10.3 (351)
Устройства для измерения сигналов
в автоматических системах

Как изменится сигнал на выходе потенциометрического датчика, если напряжение, питающее потенциометр, увеличится (см. рис. 10.4)?	Увеличится	22
	Уменьшится	46
	Не изменится	70
Как нужно приклеить тензотермический датчик (см. рис. 10.5), чтобы измерить деформации (удлинение, сжатие) цилиндрического стержня?	Так, чтобы длинная сторона была параллельна образующей цилиндра	94
	Длинной стороной перпендикулярно образующей цилиндра	118
Как изменится индуктивное сопротивление катушки при увеличении воздушного зазора между якорем и сердечником индуктивного датчика (см. рис. 10.7)?	Увеличится	141
	Уменьшится	161
	Не изменится	164
При нейтральном положении якоря двухтактного индуктивного датчика (см. рис. 10.8) напряжение питания U увеличилось. Как изменилось выходное напряжение $U_{\text{вых}}$?	Уменьшилось	146
	Увеличилось	123
	Не изменилось	99
Какой датчик не относится к генераторным?	Индуктивный	75
	Индукционный	51
	Термоэлектрический	27
	Пьезоэлектрический	10

§ 10.4. РЕЛЕ

Одним из наиболее распространенных элементов современных автоматов является реле, которое обеспечивает скачкообразное изменение выходного сигнала при подаче на вход управляющего сигнала.

На рис. 10.11 изображена схема электромагнитного реле. Сердечник 1, ярмо 2 и якорь 3 изготавливаются из электротехнической стали. При прохождении тока i по обмотке 4 якорь притягивается к сердечнику, замыкая контакты 5, приваренные к упругим пластинкам из фосфористой бронзы. Все металлические детали крепятся на эбонитовом основании. При обесточивании обмотки реле якорь возвращается в исходное состояние пружиной 6 и токопроводящие контакты реле размыкаются.

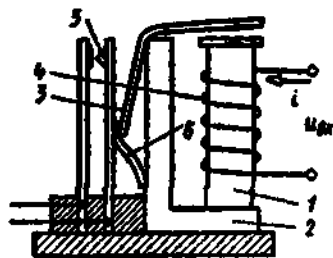


Рис. 10.11. Схема электромагнитного реле

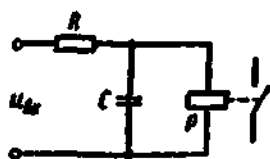


Рис. 10.12. Схема реле времени

Реле срабатывает (замыкает контакты) при определенном токе — токе срабатывания $I_{ср}$. Для получения надежного контакта обмотку сердечника реле питают током, который в 3—4 раза превышает ток срабатывания.

При подключении напряжения $u_{вх}$ ток i нарастает по экспоненциальному закону и достигает тока срабатывания через некоторое время, обычно равное сотым долям секунды. Это время примерно равно времени срабатывания реле (для точности следует еще учесть время движения якоря).

Ток, при котором якорь отрывается от сердечника, называют током отпускания $I_{отп}$. Вследствие гистерезиса магнитной системы реле ток отпускания оказывается в несколько раз меньше тока срабатывания.

Электромагнитное реле можно сделать чувствительным к полярности напряжения, подводимого к обмотке сердечника. Это достигается некоторым усложнением конструкции реле и подмагничиванием сердечника с помощью встроенного постоянного магнита. При этом управляющее напряжение положительной полярности вызывает замыкание одной пары контактов, а при изменении полярности напряжения якорь отклоняется в противоположную сторону и замыкает другую пару контактов. Такое реле называется полярным.

В системах автоматики нередко возникает необходимость включения агрегатов и исполнительных устройств в определенном порядке последовательно во времени. Такое включение электрических машин и аппаратов можно осуществить с помощью реле, контакты которых замыкаются не сразу после подачи управляющего напряжения, а через некоторое время, значительно превышающее время срабатывания реле.

Реле, у которого замыкание (размыкание) контактов происходит с необходимой задержкой, называют реле времени (рис. 10.12). При подаче на вход схемы управляющего напряжения $u_{вх}$ напряжение на конденсаторе u_c будет повышаться постепенно с постоянной времени $\tau = RC$. Обмотка реле подсоединена параллельно конденсатору, и реле сработает, когда напряжение u_c достигнет определенного значения.

Задержку срабатывания реле времени можно регулировать, изменяя R и C .

Еще одна разновидность реле — магнитоуправляемые контакты, заключенные в герметичный корпус (герконы). Схематичное изображение геркона представлено на рис. 10.13. В стеклянную ампулу впаяны две пластины из магнитомягкого материала, покрытые тонким слоем металла с высокой электропроводностью. Колба заполнена инертным газом, предупреждающим окисление контактов.

Пластины монтируются таким образом, что между их контактирующими концами остается зазор (рис. 10.13, а). Если к геркону поднести постоянный магнит (рис. 10.13, б), то пластинки намагничиваются и притягиваются друг к другу.

Вместо постоянного магнита можно использовать обмотку, размещенную на колбе. При подаче управ-

ляющего тока в обмотке возникает магнитное поле, через пластинки замыкается магнитный поток. Намагниченные таким образом пластинки взаимно притягиваются, образуя контактное соединение (рис. 10.14, а).

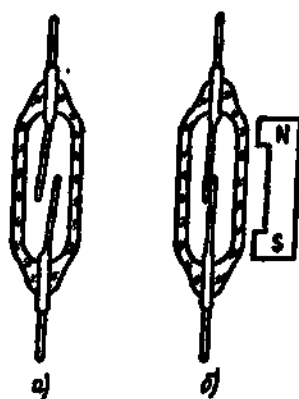


Рис. 10.13. Герметичный контакт, управляемый постоянным магнитом: а — в разомкнутом состоянии; б — в замкнутом состоянии

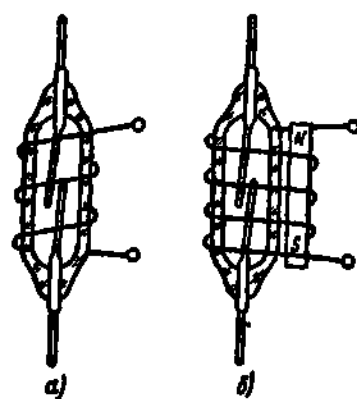


Рис. 10.14. Герметичный контакт, управляемый током: а — на замыкание; б — на размыкание

Если нужно, чтобы реле работало на размыкание контактов, на колбе монтируют постоянный магнит, который замыкает контакты в отсутствие управляющего сигнала. Катушка намотана так, что ее магнитное поле направлено встречно магнитному полю постоянного магнита (рис. 10.14, б). При подаче в катушку управляющего тока магнитные поля компенсируются и пластины расходятся под действием упругих сил.

Карточка № 10.4 (174)
Реле

На вход реле подан сигнал (ток, напряжение), достаточный для срабатывания. Какой случай не равен?	Сигналы на входе и выходе реле плавно увеличиваются	21
	Сигнал на входе увеличивается плавно, сигнал на выходе — скачком	45

Продолжение

	Сигнал на входе увеличивается скачком, сигнал на выходе — тоже скачком	69
Чему равно время срабатывания реле?	Времени нарастания тока в обмотке реле до значения тока срабатывания	93
	Времени движения якоря реле	140
	Сумме указанных выше значений	117
	Вследствие гистерезиса ток срабатывания $I_{ср}$ реле не равен току отпускания $I_{отп}$. Какой ток больше?	160
	$I_{отп} > I_{ср}$	165
	Это зависит от площади петель гистерезиса	147
Как называется реле, у которого направление отклонения якоря зависит от направления тока в обмотке?	Электромагнитное	166
	Поляризованное	124
	Электронное	100
	Реле времени	76
Как изменится время срабатывания реле времени (см. рис. 10.12), если сопротивление R увеличить?	Увеличится	62
	Не изменится	28
	Уменьшится	9

§ 10.5. МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ, ИХ НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Измерительные устройства систем автоматического регулирования обычно вырабатывают маломощные сигналы управления, которые непосредственно не могут привести в действие исполнительные механизмы. Малая мощность сигналов объясняется стремлением уменьшить влияние нагрузки на точность измерений, а также конструктивными особенностями и физической природой измерительных устройств.

Чтобы получить мощность, необходимую для работы исполнительных устройств, применяют магнитные усилители. Они практически нечувствительны к вибра-

циям и механическим воздействиям, позволяют получить на выходе значительные токи, просты в эксплуатации, сравнительно недороги и очень надежны.

В зависимости от характера физических процессов, определяющих принцип работы магнитного усилителя, различают дроссельные и трансформаторные магнитные усилители.

В дроссельных усилителях рабочая обмотка (обмотка переменного тока) выполняет функцию дроссельной «заслонки», ограничивающей ток в нагрузке, включенной (обычно последовательно) в цепь рабочей обмотки.

В трансформаторных усилителях цепь нагрузки электрически не связана с цепью питания. Передача энергии из цепи питания в цепь нагрузки осуществляется за счет магнитной связи между ними. При этом, воздействуя на общий магнитный поток, сцепленный с витками обмоток цепей питания и нагрузки, можно менять мощность, передаваемую в цепь нагрузки.

Как дроссельные, так и трансформаторные усилители могут быть собраны по одноконтурной или двухконтурной схеме. В одноконтурных магнитных усилителях фаза тока в нагрузке не зависит от полярности входного сигнала. В двухконтурных магнитных усилителях фаза тока в нагрузке меняется на 180° при изменении полярности тока в обмотке управления.

В зависимости от типа обратной связи различают магнитные усилители с внешней обратной связью, у которых выпрямленный рабочий ток проходит по специальной обмотке обратной связи, и магнитные усилители с внутренней обратной связью, у которых постоянная составляющая рабочего тока проходит по той же рабочей обмотке (дополнительная обмотка отсутствует).

Двухконтурный магнитный усилитель может быть собран по дифференциальной схеме с подмагничиванием и с обратной связью, а также по мостовой схеме.

Карточка № 10.5 (240)

Магнитные усилители, их назначение и классификация

Можно ли сигнал на выходе измерительного устройства непосредственно использовать для привода исполнительного механизма?	Можно	20
	Нельзя	44
	Можно, но нецелесообразно	68

Продолжение

Укажите достоинство магнитного усилителя	Надежность	92
	Устойчивость к механическим воздействиям	116
	Большая выходная мощность	139
	Все перечисленные	159
Какой магнитный усилитель позволяет электрически изолировать обмотку питания потребителя от обмотки питания усилителя?	Дроссельный	168
	Трансформаторный	180
	Одноконтурный	181
	Двухконтурный	177
Какой магнитный усилитель реагирует на изменение полярности сигнала управления?	Трансформаторный	167
	Дроссельный	148
	Двухконтурный	125
	Одноконтурный	101
Какие схемы используются в двухконтурных магнитных усилителях?	Дифференциальная с обратной связью	77
	Дифференциальная с подмагничиванием	53
	Мостовая	29
	Все перечисленные	8

§ 10.6. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ДРОССЕЛЬНОГО МАГНИТНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Ферромагнитный материал, из которого изготавливаются магнитопроводы магнитных усилителей, можно представить состоящим из отдельных малых областей (доменов), самопроизвольно намагничивающихся в различных направлениях.

При наложении на магнитопровод магнитного поля обмотки эти намагниченные области («магнетики») ориентируются преимущественно вдоль силовых линий внешнего поля, в результате чего общий магнитный поток резко возрастает. При изменении полярности тока в обмотке «магнетики» поворачиваются и направ-

ление общего магнитного потока в магнитопроводе изменяется на обратное.

Будем называть магнитодвижущей силой (МДС) $A\omega$ произведение тока в обмотке на число ее витков. Эта величина пропорциональна току, так как число витков обмотки обычно постоянно.

На рис. 10.15 изображена полученная опытным путем зависимость магнитного потока в магнитопроводе от количества ампер-витков его обмоток. Это усредненная кривая, характерная для магнитомягких материалов.

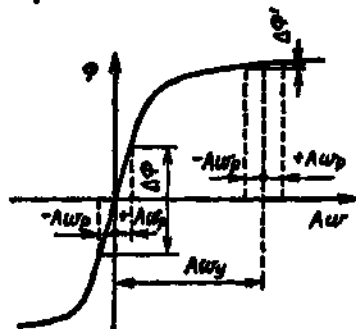


Рис. 10.15. Кривая намагничивания сердечника

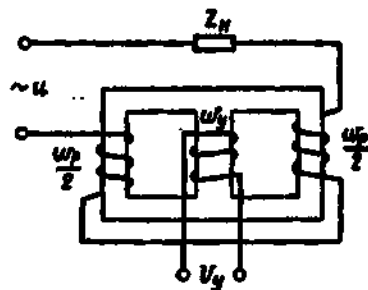


Рис. 10.16. Схема дроссельного магнитного усилителя

На рис. 10.16 изображен магнитопровод, на который намотаны две обмотки: рабочая ω_r , питаемая синусоидальным напряжением, и управляющая ω_y , к которой подводится усиливаемое напряжение.

Предположим, что управляющая обмотка обесточена, а МДС рабочей обмотки изменяются по синусоидальному закону от $+A\omega_r$ до $-A\omega_r$. При этом магнитный поток в магнитопроводе изменяется на $\Delta\Phi$ (см. рис. 10.15).

Предположим, что через управляющую обмотку проходит ток и ее МДС равна некоторому значению $A\omega_y$. МДС рабочей обмотки изменяется в прежних пределах от $+A\omega_r$ до $-A\omega_r$. При этом магнитный поток в магнитопроводе изменяется на $\Delta\Phi'$. Из рис. 10.15 видно, что $\Delta\Phi'$ значительно меньше $\Delta\Phi$.

Таким образом, в первом случае скорость изменения магнитного потока будет большой, во втором — незначительной. ЭДС самоиндукции рабочей обмотки, пропорциональная скорости изменения магнитного по-

тока (закон электромагнитной индукции), в первом случае будет значительно больше, чем во втором. Эта ЭДС направлена навстречу приложенному напряжению и ограничивает ток в цепи. При постоянном действующем значении синусоидального напряжения питания в первом случае ток в рабочей обмотке будет меньше, чем во втором.

Изменяя магнитное состояние магнитопровода, можно менять ток в рабочей обмотке, а следовательно, и в нагрузке Z_N , которая включена последовательно с ω_r .

Пока магнитопровод не насыщен, основная часть напряжения питания тратится на преодоление ЭДС самоиндукции рабочей обмотки, падение напряжения на нагрузке невелико, ток в нагрузке мал. Когда магнитопровод переходит в насыщенное состояние, ЭДС самоиндукции рабочей обмотки практически исчезает и все напряжение питания оказывается приложенным к нагрузке. Ток в нагрузке возрастает.

На рис. 10.17 изображена зависимость тока в нагрузке (рабочего тока) I_p от тока в обмотке управления I_y . Из рисунка видно, что с увеличением тока управления I_y , т. е. по мере насыщения магнитопровода и уменьшения ЭДС самоиндукции рабочей обмотки, увеличивается ток в нагрузке I_p . При этом небольшие изменения тока I_y вызывают значительные изменения рабочего тока. Следовательно, устройство работает как усилитель.

Следует отметить, что в действительности картина физических процессов несколько сложнее. В современных маг-

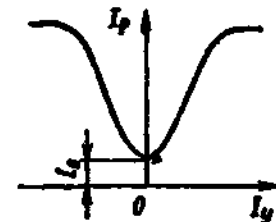


Рис. 10.17. Рабочая характеристика дроссельного усилителя

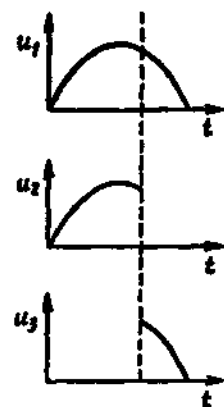


Рис. 10.18. Распределение напряжения между рабочей обмоткой и нагрузкой:
 u_1 — напряжение питания; u_2 — напряжение на дросселе; u_3 — напряжение на нагрузке

нитных усилителях применяются магнитопроводы с прямоугольной кривой намагничивания. Они либо сразу размагничиваются, либо полностью насыщаются. Поэтому перераспределение напряжения питания между рабочей обмоткой и нагрузкой происходит в течение каждого периода. Например, в течение четверти каждого периода напряжение питания приложено к нагрузке, а в течение $3/4$ периода гасится на рабочей обмотке (рис. 10.18).

Изменяя ток управления в обмотке w_y , это распределение можно изменить увеличив или уменьшив часть периода, в течение которой напряжение приложено к нагрузке, а следовательно, увеличив или уменьшив (в среднем) ток в нагрузке.

Дроссельный магнитный усилитель сравнительно прост как по устройству, так и по принципу работы, однако его применение в системах автоматического регулирования ограничено, так как ему присущ ряд недостатков. Прежде всего отметим существенную нелинейность зависимости тока в нагрузке от тока управления (см. рис. 10.17). Так, при токе управления $I_y = 0$ ток нагрузки $I_p \neq 0$. Этот нулевой ток I_0 увеличивает погрешность регулирования и потери мощности. Другой недостаток дроссельного усилителя — сравнительно низкий коэффициент усиления. Кроме того, во многих случаях существенно и то, что дроссельный усилитель не реагирует на полярность сигнала управления. Эти недостатки устранены в более сложных схемах магнитных усилителей.

Карточка № 10.6 (158)

Принцип действия дроссельного магнитного усилителя

Как должны быть направлены в среднем стержне магнитные потоки, создаваемые обмотками боковых стержней $w_p/2$?	Согласно	19
	Встречно	43
	Это безразлично	67
Что произойдет, если магнитные потоки боковых обмоток $w_p/2$ будут складываться в среднем стержне?	Магнитный поток обмотки управления увеличится	91
	Магнитный поток обмотки управления уменьшится	115
	Энергия рабочей цепи передается в цепь управления	138

Продолжение

Можно ли магнитный усилитель питать постоянным током?	Можно	158
	Нельзя	169
	Можно, если магнитопровод набрать из тонких листов электротехнической стали	149
Как изменится индуктивность рабочей обмотки при увеличении тока в обмотке управления?	Увеличится	126
	Уменьшится	102
	Не изменится	78
Как изменится ток в нагрузке дроссельного магнитного усилителя, если, не меняя значения тока управления, изменить его полярность?	Увеличится	54
	Уменьшится	30
	Не изменится	7

§ 10.7. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАГНИТНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Схема трансформаторного магнитного усилителя изображена на рис. 10.19. Синусоидальное напряжение питания подводится к обмотке w_1 , а нагрузка Z_n включена в цепь специальной обмотки w_2 .

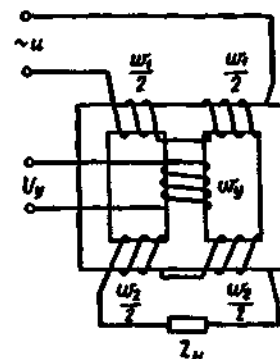


Рис. 10.19. Схема трансформаторного магнитного усилителя

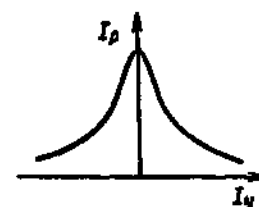


Рис. 10.20. Рабочая характеристика трансформаторного магнитного усилителя

Пока сердечник не насыщен, синусоидальный ток, проходящий по обмотке ω_1 , вызывает значительные изменения магнитного потока в магнитопроводе. Переменный магнитный поток, пронизывая витки обмотки ω_2 , наводит в этой обмотке ЭДС, которая используется для питания нагрузки Z_n . Чем больше скорость изменения магнитного потока, тем больше наведенная ЭДС и ток в нагрузке.

Когда происходит насыщение магнитопровода, скорость изменения магнитного потока резко уменьшается (см. § 10.6), ЭДС, индуцируемая во вторичной обмотке ω_2 , становится небольшой, соответственно уменьшается и ток в нагрузке.

Рабочая характеристика трансформаторного магнитного усилителя (зависимость рабочего тока от тока управления) изображена на рис. 10.20. Видно, что с увеличением тока управления I_y , ток в нагрузке I_p уменьшается.

Нетрудно заметить, что рабочие характеристики дроссельного и трансформаторного усилителей являются как бы зеркальным отображением друг друга. Это объясняется тем, что ЭДС, индуцируемая в цепи нагрузки, в одном случае играет роль «заслонки», в другом — источника питания нагрузки.

Карточка № 10.7 (115)
Принцип действия трансформаторного магнитного усилителя

Как изменится переменный магнитный поток трансформаторного усилителя при увеличении постоянного магнитного потока управления?	Увеличится	18
	Уменьшится	42
	Не изменится	66
Почему обмотки управления и питания магнитного усилителя размещены на разных стержнях магнитопровода?	По конструктивным соображениям	90
	Чтобы исключить передачу энергии из цепи питания в цепь управления	114
Почему магнитопровод трансформаторного магнитного усилителя (как и дроссельного) набирается из тонких листов?	По конструктивным соображениям	137
	Для увеличения рабочего тока	157
	Для уменьшения тепловых потерь	150

Продолжение

Как изменится ЭДС во вторичной обмотке ω_2 при увеличении постоянного тока в обмотке управления?	Увеличится	127
	Уменьшится	103
	Не изменится	79
Как изменится ток в нагрузке трансформаторного магнитного усилителя, если изменить полярность тока управления, не меняя его значения?	Увеличится	55
	Уменьшится	31
	Не изменится	6

§ 10.8. ВЛИЯНИЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ МАГНИТНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Для характеристики усилительных свойств вводят коэффициенты усиления по току k_i , по напряжению k_u , по мощности k_p . Коэффициентом усиления магнитного усилителя по току называют отношение изменения действующего значения рабочего тока к соответствующему изменению тока управления (полагаем $I_n = I_p$):

$$k_i = \Delta I_p / \Delta I_y.$$

Аналогично,

$$k_u = \Delta U_p / \Delta U_y; \quad k_p = \Delta P_p / \Delta P_y,$$

где U_p — напряжение на нагрузке; U_y — управляющее напряжение; P_p — мощность, выделяемая в нагрузке; P_y — мощность, потребляемая цепью управления.

Для магнитных усилителей справедливо (с достаточной степенью точности) следующее равенство:

$$\Delta I_p w_p = \Delta I_y w_y.$$

С учетом этого равенства выражение для коэффициента усиления по току можно представить в виде

$$k_i = w_y / w_p.$$

Коэффициент усиления по току магнитных усилителей, собранных по схемам, изображенным ранее, составляет несколько десятков единиц.

Приведенные формулы показывают, что коэффициенты усиления магнитного усилителя теоретически не зависят, а практически очень мало зависят от ко-

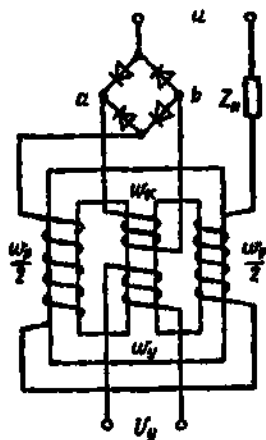


Рис. 10.21. Схема дроссельного магнитного усилителя с обратной связью

Обратная связь называется положительной, в противном случае — отрицательной. Изменить характер обратной связи можно поменяв полярность управляющего напряжения.

При наличии положительной обратной связи уравнение магнитного усилителя принимает вид

$$I_p w_p = I_y w_y + I_p w_{oc}$$

Отношение $k_{oc} = w_{oc}/w_p$ называют коэффициентом обратной связи.

При этом

$$I_p = \frac{I_y w_y}{w_p - w_{oc}} = \frac{I_y \frac{w_y}{w_p}}{1 - w_{oc}/w_p} = \frac{I_y k_i}{1 - k_{oc}}.$$

Коэффициент усиления по току усилителя с обратной связью

$$k_{oc1} = \Delta I_p / \Delta I_y = k_i / (1 - k_{oc}).$$

Если $k_{oc} \rightarrow 1$, т. е. число витков обмотки обратной связи приближается к числу витков рабочей обмотки, то коэффициент усиления усилителя с обратной связью увеличивается и стремится к бесконечности. Это значит, что бесконечно малым изменениям тока управления соответствуют конечные (скачкообразные) изменения рабочего тока.

лебаний напряжения, частоты источника питания и изменений сопротивления нагрузки.

Такая стабильность характеристик позволяет использовать в магнитном усилителе глубокую положительную обратную связь.

Обратной связью называют подачу сигнала с выхода усилителя на его вход. В магнитных усилителях наибольшее распространение получила обратная связь по току (рис. 10.21).

Обмотка обратной связи w_{oc} намотана на том же стержне, что и обмотка управления. Если магнитный поток обмотки обратной связи усиливает магнитный поток обмотки управления, то

Обычно $k_{oc} \leq 0,99$, так как при слишком большом коэффициенте усиления нарушается стабильность параметров усилителя. Кроме того, положительная обратная связь увеличивает рабочий ток при отсутствии тока в управляющей обмотке I_0 в $1/(1 - k_{oc})$ раз.

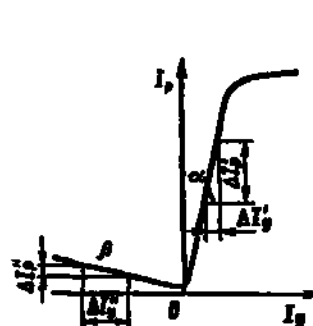


Рис. 10.22. Рабочая характеристика дроссельного магнитного усилителя с обратной связью

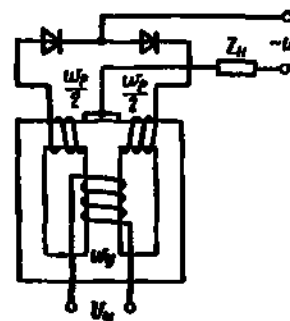


Рис. 10.23. Схема магнитного усилителя с самовозбуждением

Уже отмечалось, что при изменении полярности управляющего сигнала положительная обратная связь становится отрицательной. Вследствие этого характеристика усилителя с обратной связью приобретает несимметричную форму. Действительно, при отрицательной обратной связи уравнение магнитного усилителя и выражение для коэффициента усиления по току записываются в следующем виде:

$$I_p w_p = I_y w_y - I_p w_{oc}; \quad k_{oc1} = \frac{k_i}{1 + k_{oc}} = \frac{\Delta I_p}{\Delta I_y}.$$

Из рис. 10.22 видно, что коэффициент усиления по току можно представить как тангенс угла наклона линейного участка к оси абсцисс. При этом

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta I_p}{\Delta I_y} = \frac{k_i}{1 - k_{oc}}; \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta I_p}{\Delta I_y} = \frac{k_i}{1 + k_{oc}}.$$

Поскольку из последних выражений следует, что $\operatorname{tg} \alpha > \operatorname{tg} \beta$, то ясно, что правая ветвь характеристики магнитного усилителя идет круче, чем левая, как это и изображено на рисунке.

Отличительная особенность схемы магнитного усилителя с внешней обратной связью — наличие специальной обмотки обратной связи w_{oc} . В технике находят широкое применение усилители с внутренней

положительной обратной связью, которые иногда называют усилителями с самонасыщением (рис. 10.23). Здесь функцию обмотки обратной связи выполняет сама рабочая обмотка, в которой с помощью выпрямительных диодов создается постоянная составляющая рабочего тока, магнитный поток которой совпадает по направлению с магнитным потоком управления и «помогает» ему изменять состояние магнитопровода.

Карточка № 10.8 (138)
Влияние обратной связи на коэффициент усиления магнитного усилителя

При изменении напряжения управления на 0,5 В напряжение на нагрузке изменилось на 5 В. Найти коэффициент усиления магнитного усилителя по напряжению	0,5	17
	5,0	41
	10	65
	50	89
Известно число витков рабочей обмотки и число витков обмотки управления магнитного усилителя. Какой коэффициент усиления можно найти?	По току	113
	По напряжению	136
	По мощности	156
Коэффициент обратной связи магнитного усилителя 0,99. При выключенной цепи обратной связи и изменении тока управления на 1 А ток в рабочей обмотке изменился на 10 А. Определить коэффициент усиления с включенной цепью обратной связи	10	170
	9,9	176
	99	175
	1000	151
При обрывной цепи обратной связи измерили ток холостого хода магнитного усилителя. Как изменился этот ток после устранения обрыва (обратная связь положительная)?	Не изменился	128
	Увеличился	104
	Уменьшился	80
В каком случае магнитный усилитель будет иметь наименьший коэффициент усиления?	При включенной цепи положительной обратной связи	56
	При выключенной цепи обратной связи	32
	При включенной цепи отрицательной обратной связи	8

§ 10.9. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МАГНИТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ С ОБМОТКАМИ СМЕЩЕНИЯ

Чтобы сделать магнитный усилитель чувствительным к полярности тока управления, вводят обмотку смещения $w_{см}$, с помощью которой создают постоянное начальное подмагничивание магнитопровода (рис. 10.24). К МДС управления добавляется постоянная величина — МДС смещения, при этом характеристика магнитного усилителя сдвигается влево. Рабо-

Рис. 10.24. Схема дроссельного магнитного усилителя с обмоткой смещения

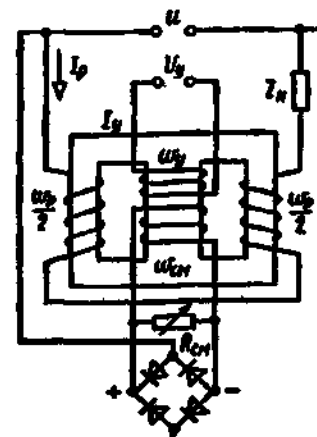
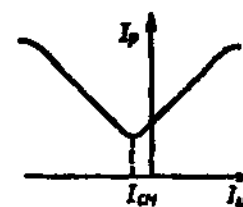


Рис. 10.25. Рабочая характеристика дроссельного усилителя с обмоткой смещения



чая характеристика усилителя с обмоткой смещения дана на рис. 10.25. Смещение можно менять с помощью резистора $R_{см}$.

Если смещения нет, то при любой полярности тока управления магнитопровод намагничивается. При наличии тока в обмотке смещения магнитопровод изначально уже подмагничен, а ток управления в зависимости от полярности либо увеличивает, либо уменьшает намагниченность магнитопровода. Таким образом, при положительной полярности тока управления ток в рабочей обмотке увеличивается, а при отрицательной полярности уменьшается (в пределах линейного участка характеристики).

Обмотка смещения используется также для начального симметрирования сложных схем, включающих два (или более) магнитных усилителя. В этом случае

регулируемый резистор $R_{см}$ выводится на щит управления автоматической системой.

Для устранения отмеченных ранее недостатков магнитные усилители собирают по различным двухтактным схемам. Наиболее простой из усилителей — дифференциальный магнитный усилитель с обмотками смещения (рис. 10.26). Этот усилитель собран из двух трансформаторных усилителей, но можно исполь-

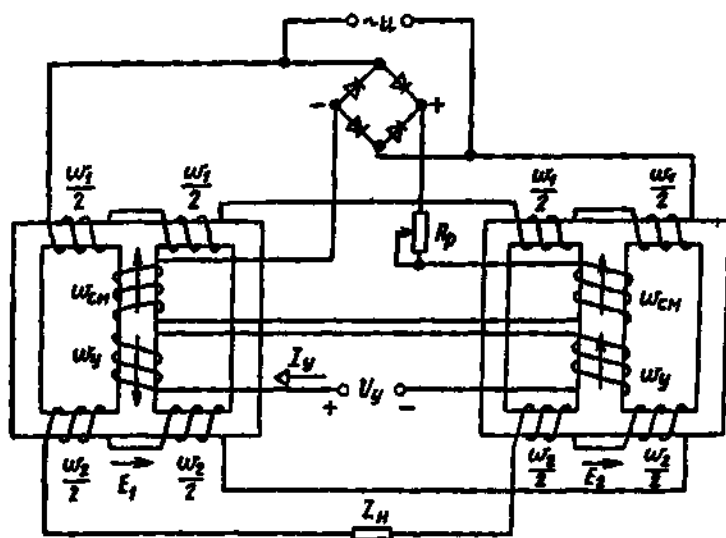


Рис. 10.26. Схема дифференциального трансформаторного магнитного усилителя с обмотками смещения

зовать и два дроссельных магнитных усилителя. Рассмотрим его работу.

В цепи нагрузки действуют две ЭДС, индуцируемые в обмотках w_2 . Эти ЭДС направлены навстречу друг другу. Если управляющий сигнал отсутствует ($U_y = 0$), то магнитное состояние магнитопроводов одинаково, ЭДС E_1 и E_2 , индуцируемые в обмотках w_2 , полностью компенсируют друг друга. Результирующая ЭДС $E = E_1 - E_2 = 0$, ток в нагрузке отсутствует.

Если к управляющим обмоткам подведено положительное напряжение, то левый магнитопровод размагничивается, а правый переходит в более насыщенное состояние, ЭДС E_1 увеличивается, а ЭДС E_2

уменьшается, результирующая ЭДС E совпадает по фазе с E_1 .

Если к управляющим обмоткам подвести отрицательное напряжение, то левый магнитопровод подмагничивается еще больше, правый размагничивается; ЭДС $E_2 > E_1$ и результирующая ЭДС E совпадает по фазе с E_2 . Ток в нагрузке Z_n пропорционален результирующей ЭДС E . Зависимость тока I_n в нагрузке от тока управления I_y изображена на рис. 10.27.

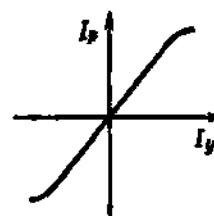


Рис. 10.27. Рабочая характеристика дифференциального магнитного усилителя

Карточка № 10.9 (302)

Дифференциальный магнитный усилитель с обмотками смещения

При отсутствии тока управления и выключенной обмотке смещения через рабочую обмотку проходит нулевой ток I_0 . Как изменится этот ток при включении обмотки смещения (см. рис. 10.24)?	Не изменится	16
	Увеличится	40
	Уменьшится	64
	Это зависит от полярности тока в обмотке смещения	88
Как изменится нулевой ток магнитного усилителя при увеличении сопротивления резистора $R_{см}$ (см. рис. 10.24)?	Не изменится	112
	Уменьшится	135
	Увеличится	155
Как должны быть намотаны обмотки смещения и управления на стержни левого и правого магнитных усилителей (см. рис. 10.26)?	Согласно	171
	Встречно	173
	На одном — встречно, на другом — согласно	174
Как изменится ток в нагрузке дифференциального магнитного усилителя при подаче тока в обмотки смещения и отсутствии тока в обмотках управления?	Не изменится	152
	Увеличится	129
	Уменьшится	105
Как изменится ток в нагрузке дифференциального магнитного усилителя, если при постоянном токе управления изменить его полярность?	Не изменится	81
	Увеличится	57
	Уменьшится	33
	Станет равным нулю	4

§ 10.10. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МАГНИТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Схема (рис. 10.28) состоит из двух одинаковых магнитных усилителей, каждый из которых снабжен обмоткой обратной связи, питаемой выпрямленным рабочим током. Управляющие обмотки намотаны так, что в одном усилителе обратная связь положительна,

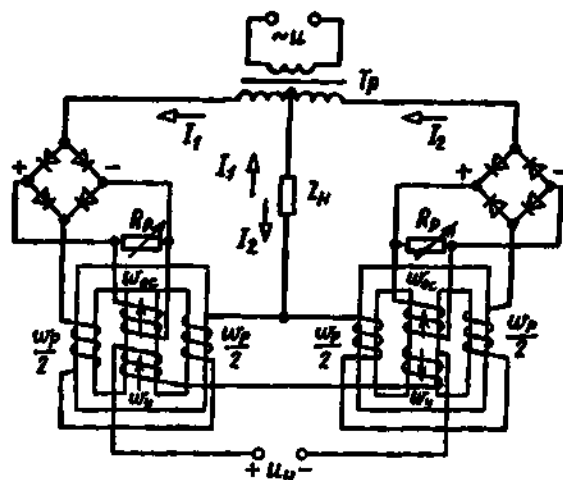


Рис. 10.28. Схема дифференциального магнитного усилителя с обратной связью

в другом — отрицательна. Регулировочные резисторы R_p обеспечивают начальную регулировку коэффициентов обратной связи. Схема собрана так, что в резисторе нагрузки Z_N рабочие токи левого и правого однотактных усилителей направлены встречно.

На рис. 10.29 изображены нагрузочные характеристики левого $I_1(I_Y)$ и правого $I_2(I_Y)$ усилителей. Ток в нагрузке I_N рассматривается как алгебраическая сумма направленных встречно токов I_1 и I_2 . (Нагрузочные характеристики усилителей с обратной связью были рассмотрены в § 10.8.)

При положительной полярности тока управления с увеличением I_Y ток I_1 резко возрастает (положительная обратная связь), ток I_2 почти не изменяется (отрицательная обратная связь). Результирующий ток $I_N = I_1 + I_2$ возрастает, совпадая по фазе с током I_1 .

При отрицательной полярности тока управления I_Y характер обратной связи меняется (положительная обратная связь становится отрицательной, и, наоборот, отрицательная — положительной). При этом ток I_N близок по значению к току I_2 и совпадает с ним по фазе.

Так как токи I_1 и I_2 сдвинуты по фазе на 180° относительно друг друга, то результирующий ток в нагрузке I_N меняет фазу на 180° при изменении полярности тока управления.

Из рис. 10.29 видно, что характеристика результирующего тока в нагрузке $I_N(I_Y)$ проходит через начало координат и линейна в широком диапазоне изменений I_Y .

Коэффициент усиления по току рассмотренной дифференциальной схемы примерно равен коэффициенту усиления однотактных усилителей, составляющих схему, и достигает значений $10^4 - 10^5$ ввиду наличия положительной обратной связи.

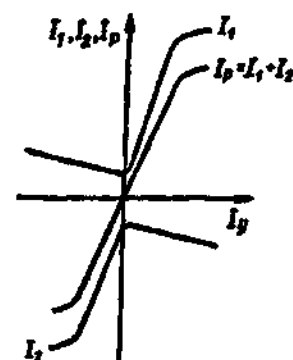


Рис. 10.29. Построение рабочей характеристики дифференциального усилителя с обратной связью

Карточка № 10.10 (209)
Дифференциальный магнитный усилитель с обратной связью

Чему равен ток в нагрузке дифференциального магнитного усилителя при отсутствии тока в обмотке управления?	Нулю	15
	Току холостого хода	39
	Току одного из двух простых магнитных усилителей	63
Чему равен в любой момент времени ток в нагрузке дифференциального магнитного усилителя?	Току одного из двух простых магнитных усилителей	87
	Сумме токов простых магнитных усилителей	111
	Разности токов простых магнитных усилителей	134

Как изменяется фаза тока нагрузки дифференциального магнитного усилителя при изменении полярности тока управления?	Не изменяется	172
	Изменяется на 180°	154
Какое высказывание о токах в рабочих обмотках простых магнитных усилителей в дифференциальной схеме соответствует действительности?	Токи всегда равны по амплитуде	153
	Токи совпадают по фазе	130
	Токи сдвинуты по фазе на 180°	106
Коэффициент усиления по току простого магнитного усилителя в дифференциальной схеме с обратной связью равен 10^3 . Чему равен коэффициент усиления дифференциального магнитного усилителя?	10^3	82
	10^4	58
	$2 \cdot 10^3$	34
	Для ответа на вопрос недостаточно данных	3

§ 10.11. МАГНИТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ, СОБРАННЫЙ ПО МОСТОВОЙ СХЕМЕ

Магнитный усилитель, собранный по мостовой схеме, изображен на рис. 10.30. Чтобы понять его работу, следует иметь в виду, что рабочие обмотки w_1 , w_2 , w_3 , w_4 соединены по мостовой схеме (рис. 10.31). В этом нетрудно убедиться, рассмотрев, какие элементы включены между точками a , b , c , d на рис. 10.30 и 10.31.

При отсутствии управляющего сигнала магнитное состояние магнитопроводов одинаково, сопротивления всех четырех рабочих обмоток одинаковы, мост уравновешен.

При положительной полярности управляющего напряжения левый магнитопровод размагничивается, правый — насыщается. При этом сопротивление обмоток w_1 и w_2 растет (вследствие увеличения ЭДС самоиндукции), а сопротивление обмоток w_3 и w_4 уменьшается.

Балансировка моста нарушается, и через нагрузку Z_H проходит рабочий ток, который тем больше, чем больше различаются магнитные состояния левого и правого магнитопроводов, зависящие от управляющего тока.

При изменении полярности управляющего напряжения происходит насыщение левого и размагничивание правого магнитопроводов. Сопротивление обмоток w_3 , w_4 станет больше, чем сопротивление обмоток w_1 , w_2 . Фаза рабочего тока изменится на 180° , а его

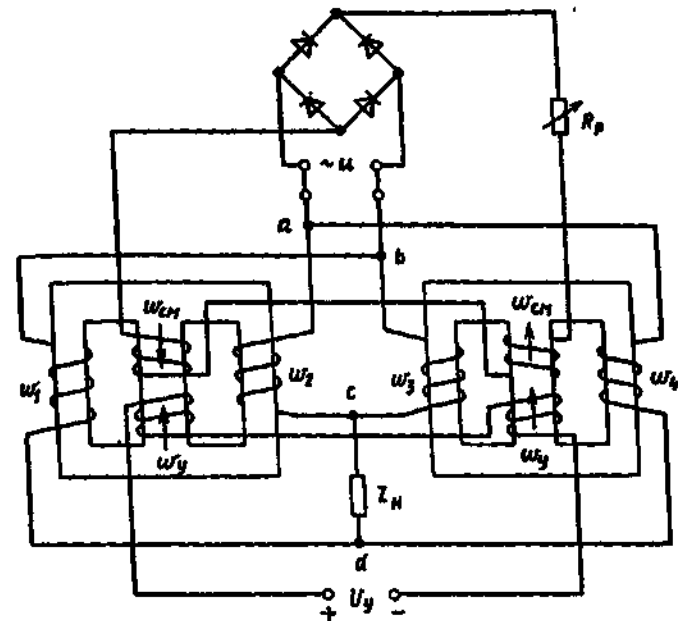


Рис. 10.30. Схема магнитного усилителя, собранного по мостовой схеме

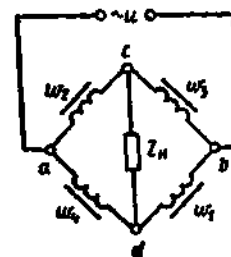


Рис. 10.31. Схема соединения рабочих обмоток магнитного усилителя, собранного по мостовой схеме

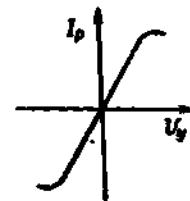


Рис. 10.32. Рабочая характеристика магнитного усилителя, собранного по мостовой схеме

значение будет увеличиваться по мере роста управляющего напряжения (тока).

Поскольку разбалансировка моста происходит вследствие согласованного изменения сопротивлений всех четырех плеч, коэффициент усиления усилителя, собранного по мостовой схеме, в четыре раза больше, чем дроссельного.

Рабочая характеристика магнитного усилителя, собранного по мостовой схеме, проходит через начало координат и линейна в широком диапазоне изменений сигнала управления (рис. 10.32).

Питание любого магнитного усилителя осуществляется переменным током. Что касается нагрузки, то ею могут быть и потребители постоянного тока, включаемые через выпрямители. Последние обычно собираются на кристаллических диодах.

Карточка № 10.11 (251)
Магнитный усилитель, собранный по мостовой схеме

Можно ли собрать мостовую схему на магнитных усилителях без обмоток смещения?	Можно	14
	Нельзя	38
Может ли появиться ток в нагрузке уравновешенного магнитного усилителя при отсутствии тока в обмотках управления?	Не может	62
	Может	86
Для чего предназначен регулировочный резистор R_p (см. рис. 10.30)?	Для регулировки коэффициента усиления	110
	Для устранения тока в нагрузке при токе управления, равном нулю	133
Коэффициент усиления каждого из двух магнитных усилителей, собранных по мостовой схеме, равен 50. Чему равен коэффициент усиления всей схемы (см. рис. 10.30)?	50	131
	100	107
	200	83
	2500	59
Может ли нагрузкой магнитного усилителя быть двигатель постоянного тока?	Да	35
	Нет	2

§ 10.12. ФЕРРОМАГНИТНЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПЯЖЕНИЯ

Эффект стабилизации напряжения получают в схемах, где последовательно соединяются линейные и нелинейные элементы электрических цепей.

Напомним, что линейным (линейным сопротивлением) называют такой элемент, в котором ток и напряжение связаны законом Ома, т. е. линейной зависимостью $U = RI$.

В нелинейном элементе зависимость между током и напряжением не подчиняется линейному закону. Типичным представителем нелинейных элементов служит катушка с ферромагнитным магнитопроводом в цепи переменного тока (рис. 10.33).

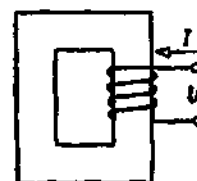


Рис. 10.33. Схема катушки с ферромагнитным сердечником

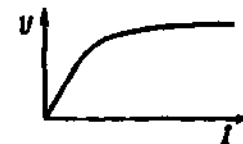


Рис. 10.34. Зависимость тока от напряжения катушки с ферромагнитным сердечником

Пока магнитопровод не насыщен, амплитуда колебаний магнитного потока в нем сильно зависит от амплитуды тока в обмотке. Если пренебречь активным сопротивлением катушки, то можно считать напряжение, приложенное к катушке, равным ЭДС в ней. С увеличением амплитуды колебаний магнитного потока увеличивается ЭДС, а следовательно, и напряжение, приложенное к катушке. Таким образом, с ростом тока заметно увеличивается напряжение. В насыщенном магнитопроводе амплитуда магнитного потока почти не зависит от амплитуды тока в обмотке. Поэтому увеличение тока не приводит к существенному росту ЭДС и компенсирующего ее напряжения. Зависимость тока от напряжения катушки с ферромагнитным магнитопроводом изображена на рис. 10.34.

В действительности все явления заметно усложняются вследствие возникновения высших гармоник

тока и напряжения. Высшие гармоники вызываются отклонениями магнитного потока от синусоидальной формы из-за магнитного гистерезиса. Однако для понимания принципа работы ферромагнитных стабилизаторов достаточно изложенных ранее упрощенных представлений.

Простейшая схема ферромагнитного стабилизатора напряжения изображена на рис. 10.35. В этой схеме

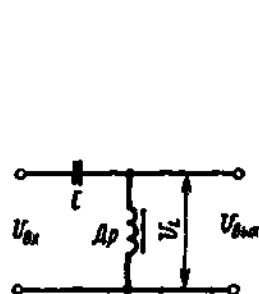


Рис. 10.35. Схема ферромагнитного стабилизатора напряжения

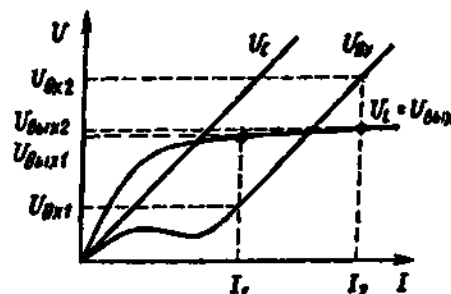


Рис. 10.36. График, поясняющий работу стабилизатора напряжения

линейным элементом служит конденсатор, активные потери энергии в котором невелики. Работа схемы иллюстрируется рис. 10.36.

Поскольку напряжение на конденсаторе U_C и напряжение на катушке $U_L = U_{\text{вых}}$ сдвинуты по фазе примерно на 180° , то напряжение на входе $U_{\text{вх}} \approx U_C - U_L$. Приближенность объясняется тем, что в данном случае не учитываются активные сопротивления и высшие гармоники напряжений и токов. На рис. 10.36 изображено абсолютное (без учета знака) значение разности $U_{\text{вх}} = U_C - U_L$.

Выберем два произвольных значения тока: I_1 и I_2 . При токе I_1 напряжение на выходе равно $U_{\text{вых1}}$, а на входе $U_{\text{вх1}}$. При токе I_2 напряжение на выходе $U_{\text{вых2}}$, а на входе $U_{\text{вх2}}$. Видно, что разность $\Delta U_{\text{вх}} = U_{\text{вх2}} - U_{\text{вх1}}$ значительно больше, чем разность $\Delta U_{\text{вых}} = U_{\text{вых2}} - U_{\text{вых1}}$. Это означает, что при значительных изменениях напряжения на входе напряжение на выходе изменяется незначительно, т. е. схема работает как стабилизатор напряжения.

Для повышения стабилизирующего эффекта, увеличения КПД и шунтирования высших гармоник

применяют более сложные схемы, одна из которых изображена на рис. 10.37. Здесь в качестве линейного элемента использована катушка с ненасыщенным магнитопроводом L_1 , а в качестве нелинейного — резонансный контур, в котором L_2 — катушка с насыщающимся магнитопроводом.

Резисторы как линейные элементы в стабилизаторах не используются, так как это привело бы к существенному увеличению тепловых потерь.

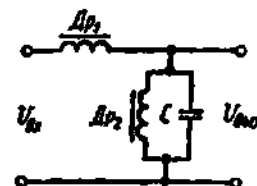


Рис. 10.37. Схема стабилизатора напряжения с феррорезонансным контуром

Карточка № 10.12 (167)
Ферромагнитные стабилизаторы напряжения

Можно ли назвать линейным элементом электрическую лампу накаливания?	Можно	37
	Нельзя	13
Можно ли назвать нелинейным элементом катушку с немагнитным магнитопроводом в цепи переменного тока?	Можно	61
	Нельзя	85
Можно ли в схеме стабилизатора напряжения (см. рис. 10.35) заменить конденсатор проволочным резистором?	Нельзя	109
	Можно	132
	Можно, но нецелесообразно	108
Возможна ли стабилизация напряжения в схеме рис. 10.35 при малых токах, не насыщающих магнитопровод катушки?	Да	84
	Нет	60
Сохранится ли строго синусоидальная форма напряжения на выходе схемы рис. 10.37 при синусоидальном напряжении на входе?	Сохранится	36
	Нет	1

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

§ 11.1. СУЩНОСТЬ И ЗНАЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерения электрических и магнитных величин служат электроизмерительные приборы: амперметры, вольтметры, гальванометры и др., а также их комбинации.

Процесс измерения состоит в сравнении измеряемой физической величины с ее значением, принятым за единицу.

Измерение одной величины можно заменить измерением другой, с ней связанной. Как правило, всякое измерение в конечном счете сводят к измерению перемещения стрелки или светового пятна на шкале.

Измерительная аппаратура разделяется на измерительные приборы и эталоны.

Измерительные приборы обладают высокой точностью и надежностью работы, возможностью автоматизации процесса измерений и передачи показаний на дальние расстояния, простотой ввода результатов измерений в электрические вычислительные устройства и т. д. Поэтому они широко используются в системах ручного или автоматического контроля и поддержания на заданном уровне параметров промышленных установок и технологических процессов.

С помощью измерительных устройств контролируется качество и количество выпускаемой продукции, соответствие ее характеристик установленным нормам. Разработаны и применяются электрические измерители влажности, температуры, давления и т. д.

Первостепенную роль электрические измерения играют в научных исследованиях. Установки, используемые в ядерной физике, наземные и бортовые измерительные комплексы для запуска и контроля параметров космических кораблей, сложные эксперименты с живой материей в медицине и биологии неосуществимы без совершенной электроизмерительной техники.

Карточка № 11.1 (275)
Сущность и значение электрических измерений

Что такое электрические измерения?	Сравнение измеряемой величины с ее значением, принятым за единицу	194
	Способ оценки физических величин	227
	Измерения величин, характеризующих электрические и магнитные явления	183
Какой прибор используется для измерения электрической мощности?	Амперметр	204
	Вольтметр	215
	Ваттметр	238
	Счетчик	172
Какие достоинства характерны для электроизмерительных приборов?	Высокая точность и надежность	131
	Возможность передачи показаний на дальние расстояния	152
	Удобство сопряжения с ЭВМ	101
	Все перечисленные достоинства	121
Где применяются электроизмерительные приборы?	Для контроля параметров технологических процессов	21
	Для контроля параметров космических кораблей	81
	Для экспериментальных исследований в физике, химии, биологии и др.	11
	Во всех перечисленных областях	71

Вспомните основные единицы в СИ	Метр, килограмм, секунда, ампер	162
	Сантиметр, грамм, секунда, ампер	91
	Метр, килограмм, секунда, вольт	51
	Все перечисленные	41

§ 11.2. ОСНОВНЫЕ ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН В МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЕ ЕДИНИЦ

В процессе измерений определяется отношение измеряемой физической величины к ее значению, принятому за единицу. Выбор этого единичного значения связан с учетом многих факторов.

Напомним, что единицы физических величин принято делить на основные и производные. Основные единицы вводятся независимо друг от друга, производные устанавливаются на основе экспериментально открытых законов или принятых определений, связывающих различные физические величины.

В принципе, выбор основных единиц произволен, и можно было бы каждую физическую величину характеризовать своей собственной (основной) единицей. Например, на парусном флоте скорость движения корабля измерялась узлами.

Увеличение числа основных единиц приводит к практическим неудобствам: затрудняется их запоминание, появляются многочисленные постоянные коэффициенты в формулах, усложняются вычисления, увеличивается работа по созданию и хранению эталонов.

Уменьшение числа основных единиц до одной или до нуля также практически неудобно, так как затрудняется процесс построения производных единиц и усложняется анализ размерностей для членов выражений, характеризующих физические явления.

Теоретически в качестве основных можно выбрать единицы любых физических величин, например единицу ускорения движущегося тела или единицу потенциала электрического поля. Однако выбор основных единиц существенно ограничен требованиями практики.

Основная единица должна обеспечивать удобство измерений и относительную простоту ее воспроизводства в разных странах. Изготовление и хранение эталонов единицы физической величины не должно приводить к чрезмерным материальным затратам. Желательно также, чтобы основные единицы были связаны с фундаментальными физическими величинами, например с такими, как протяженность, время, количество вещества.

В СИ в качестве основных единиц электрических и магнитных величин приняты следующие четыре единицы: единица длины — метр (м), единица времени — секунда (с), единица массы — килограмм (кг) и единица силы тока — ампер (А).

Метр, секунда и килограмм были введены во Франции по предложению специальной комиссии в 1799 г. Эти единицы были связаны с фундаментальными природными объектами и процессами. Метр определялся как сорок миллионная доля земного меридиана, секунда — как $1/86400$ средних солнечных суток и килограмм — как масса кубического дециметра воды при 4°C . Были изготовлены прототипы метра и килограмма в виде линейки и гири из сплавов, наиболее устойчивых к внешним воздействиям металлов.

Развитие техники позволило зафиксировать размер метра и секундный интервал времени с предельной для наших дней точностью с помощью атомных эталонов.

В настоящее время приняты следующие определения основных единиц электрических и магнитных величин, входящих в СИ:

метр (м) — длина, равная $16507763,73$ длины волн в вакууме излучения атома криптона-86, соответствующего переходу между уровнями $2p_{1/2}$ и $5d_{5/2}$;

килограмм (кг) — масса международного прототипа килограмма, который хранится в Национальном архиве Франции;

секунда (с) — продолжительность $9\,192\,631\,770$ периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133;

ампер (А) — сила тока, при котором на каждый метр длины двух параллельных прямолинейных круглых проводников, расположенных в 1 м один от другого, приходится механическая сила $2 \cdot 10^{-7}\text{ Н}$. При

этом оговаривается, что проводники имеют бесконечную длину и ничтожно малую площадь сечения.

Карточка № 11.2 (198)
Основные единицы электрических и магнитных величин
в международной системе единиц

Какое число основных единиц не может быть выбрано ни в одной системе?	1	60
	4	50
	7	151
	Превышающее число физических величин	120
К чему приводит увеличение числа основных единиц?	К усложнению расчетов по формулам	90
	К появлению в формулах большого числа числовых коэффициентов	20
	К увеличению затрат на создание и хранение эталонов	80
	Ко всем перечисленным последствиям	171
Сколько основных единиц используется при электротехнических измерениях в СИ?	2	100
	4	162
	6	40
	7	70
Можно ли выбрать в качестве основной единицы абсолютной магнитной проницаемости?	Можно	10
	Нельзя	240
Почему в качестве единицы массы выбрана масса гири, хранящейся во Франции, а не масса кубического дециметра воды?	Потому что отмерить кубический дециметр воды с необходимой точностью невозможно	152
	Потому что погрешности измерения температуры сказались бы на единице массы	101

Продолжение

Потому что сложно изолировать воду от внешних воздействий (примесей и др.)	11
По всем перечисленным выше причинам	121

§ 11.3. ПРОИЗВОДНЫЕ И КРАТНЫЕ ЕДИНИЦЫ

Используя выбранные основные единицы, можно определить производные единицы других электрических и магнитных величин. Для этого нужно подобрать по возможности простое математическое выражение, связывающее одну физическую величину с несколькими или всеми основными величинами.

Например, по определению, $dq = idt$, где q — электрический заряд; i — сила тока; t — время. Вспомнив, что сила тока выражается в амперах, а время — в секундах, устанавливаем, что единицей электрического заряда служит произведение ампер на секунду. Эту единицу называют кулоном: $[Кл] = [А] \cdot [с]$.

Одна из важнейших электрических величин — напряжение. Напряжение выражается в вольтах (В). И хотя вольт — производная единица, через нее довольно часто выражают другие производные единицы; так, единица полной мощности — вольт-ампер (В·А), единица напряженности электрического поля — вольт, деленный на метр (В/м) и т. д.

Чтобы выразить единицу напряжения через основные единицы, вспомним, что электрическое напряжение равно работе сил электрического поля при переносе точечного тела с зарядом $1 Кл$ из одной точки поля в другую: $U = A/Q$, где U — напряжение; A — работа; Q — заряд.

Широкое применение в электротехнике и электронике находят кратные единицы, связанные с основными и производными единицами постоянным множителем. Множитель может быть как больше, так и меньше единицы. Этим множителям присвоены специальные наименования: 10^{-12} — пико (п), 10^{-9} — нано (н), 10^{-6} — микро (мк), 10^{-3} — милли (м), 10^3 — кило (к), 10^6 — мега (М), 10^9 — гига (Г), 10^{12} — тера (Т). Например, запись $10 нФ$ означает, что речь идет о десяти миллиардных долях фарада.

Карточка № 11.3 (241)
Производные и кратные единицы

Размерность вольт известна. Какое выражение целесообразно использовать для определения единицы напряженности электрического поля?	$\pi(2\pi) \approx 3\pi(p_1 - 1) / [2 (\ln^2 x) (p_1 - 2)]$	249
	$E = F/Q$	237
	$U = EI$	193
	$E = Q/(4\pi\epsilon_0 R^2)$	214
Выразить единицу электрической емкости через единицы заряда и напряжения	$\Phi = A^2 \cdot c^4 / (кг \cdot м^2)$	226
	$\Phi = Кл/В$	225
Закон Кулона: $F = Q_1 Q_2 / (4\pi\epsilon_0 R^2)$ Имеет ли размерность абсолютная диэлектрическая проницаемость среды в СИ?	Имеет	247
	Нет, это безразмерная величина	248
Перевести в амперы 200 нА	0,2 А	182
	0,002 А	181
	0,00002 А	140
	0,0000002 А	141
Перевести в вольты 0,15 МВ	1 500 000 В	161
	15 000 000 В	110
	150 000 В	130
	15 000 В	30

§ 11.4. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Существует два основных метода электрических измерений: метод непосредственной оценки и метод сравнения. В методе непосредственной оценки измеряемая величина отсчитывается непосредственно по шкале прибора. При этом шкала измерительного прибора предварительно градуируется по эталонному прибору в единицах измеряемой величины. Как правило, такая градуировка производится на заводе при изготовлении прибора. Достоинства

этого метода — удобство отсчета показаний прибора и малая затрата времени на операцию измерения. Метод непосредственной оценки широко применяется в различных областях техники для контроля и регулирования технологических процессов, в полевых условиях, на подвижных объектах и т. д. Недостаток метода — сравнительно невысокая точность измерений.

В методе сравнения измеряемая величина сравнивается непосредственно с эталоном, образцовой или рабочей мерой. В этом случае точность измерений может быть значительно повышена. Метод сравнения используется главным образом в лабораторных условиях, он требует сравнительно сложной аппаратуры, высокой квалификации операторов и значительных затрат времени. В последнее время в аппаратуре сравнения все шире внедряется автоматизация.

Электронизмерительные приборы непосредственной оценки позволяют отсчитать числовое значение измеряемой величины на шкале или цифровом устройстве прибора.

Практика показывает, что при всяком измерении непрерывной величины неизбежна некоторая погрешность Δ — разница между измеренным $A_{из}$ и действительным A значениями измеряемой величины: $\Delta = A_{из} - A$. Эту разницу называют абсолютной погрешностью измерения. Она определяется систематическими и случайными погрешностями прибора, а также ошибками оператора.

Систематические погрешности изменяются по определенному закону и возникают вследствие факторов, которые могут быть учтены: влияние внешних условий (температура, радиация, электромагнитные поля), несовершенство метода измерения, несовершенство измерительного прибора.

Случайные погрешности возникают вследствие факторов, которые не поддаются непосредственному учету. Оценку случайных погрешностей можно произвести только при очень большом числе повторяющихся измерений, используя методы теории вероятностей.

Ошибки оператора (в записи, в определении цены деления прибора и др.), обычно легко выявляемые в ряду наблюдений по значительным отклонениям результата измерения от средних или примерно ожидаемых значений, исключают из записей и при обработке результатов измерения не учитывают.

Для более полной характеристики измерений вводят понятие относительной погрешности измерения δ :

$$\delta = \frac{A_m - A}{A} \cdot 100 = \frac{\Delta}{A} \cdot 100\%.$$

Величины Δ и δ характеризуют точность измерения. Во многих случаях возникает необходимость охарактеризовать точность прибора. Для этой цели вводится понятие приведенной погрешности измерения:

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_{\max}} \cdot 100\%.$$

где $A_{\max}$ — максимальное значение шкалы прибора, т. е. предельное значение измеряемой величины.

Наибольшая приведенная погрешность определяет класс точности прибора. Если, например, класс точности амперметра равен 1,5, то это означает, что наибольшая приведенная погрешность $\gamma = \pm 1,5\%$. Если прибор рассчитан на измерение токов до 15 А, то абсолютная погрешность измерения этим прибором составит

$$\Delta = A_{\max} \cdot \frac{\gamma}{100} = 15 \cdot \frac{1,5}{100} = 0,225 \text{ А}.$$

Если указанным прибором измерить ток 10 А, то относительная погрешность измерения не превысит $\frac{0,225}{10} \cdot 100 = 2,25\%$, если тем же прибором измерить ток 1 А, то относительная погрешность измерения не превысит $\frac{0,225}{1} \cdot 100 = 22,5\%$.

Этот пример показывает, что при точных измерениях прибор следует подбирать так, чтобы значение измеряемой величины приходилось на вторую половину шкалы.

Различают основную и дополнительную погрешности. Основные погрешности возникают при нормальных условиях работы, указанных в паспорте прибора и условными знаками на шкале. Дополнительные погрешности возникают при эксплуатации прибора в условиях, отличных от нормальных (повышенная температура окружающей среды, сильные внешние магнитные поля, неправильная установка прибора и др.).

Карточка №11.4 (181)
Основные методы электрических измерений.
Погрешности измерительных приборов.

Какие методы измерения применяются: а) в лабораториях для точных измерений; б) на подвижных объектах?	а) Метод сравнения; б) метод непосредственной оценки	142
	а) Метод непосредственной оценки; б) метод сравнения	111
Чем характеризуется точность измерения?	Условиями эксперимента	31
	Качеством измерительного прибора	61
	Относительной погрешностью измерения	1
	Точностью отсчета	195
В цепи протекает ток 20 А. Амперметр показывает 20,1 А. Шкала прибора 0—50 А. Установить: а) точность измерения; б) точность прибора	а) 0,1 А; б) 0,1 А	228
	а) 0,5%; б) 0,2%	184
	а) 0,05 А; б) 0,02 А	205
	а) 5%; б) 0,2%	216
Класс точности прибора 1,0. Чему равна приведенная погрешность прибора?	1	239
	1,5	173
	1%	132
Шкала амперметра 0—50 А. Прибором измерены токи: а) 3 А; б) 30 А. Какое из измеренных значений точнее?	Задача не определена, так как неизвестен класс точности прибора	153
	Первое	102
	Второе	122

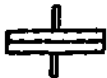
§ 11.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ НА ШКАЛЕ

Электронизмерительные приборы классифицируются по различным признакам.

В зависимости от основной приведенной погрешности электронизмерительные приборы разбиты на

классы точности. Класс точности указывается на шкале прибора и обозначает наибольшую приведенную погрешность в процентах.

Таблица 11.1

1,5	Класс точности 1,5
—	Постоянный ток
~	Переменный (однофазный) ток
⋈	Постоянный и переменный токи
≡	Трехфазный ток
	Прибор магнитоэлектрической системы
	Прибор электромагнитной системы
	Прибор электродинамической системы
	Прибор индукционной системы
П, ⊥, ∠ 60°	Прибор устанавливается горизонтально; вертикально; под углом 60°
	Изоляция прибора испытана при напряжении 2 кВ

Продолжение

A	Для закрытых отапливаемых помещений
B	Для закрытых неотапливаемых помещений
B	Для полевых и морских условий

В зависимости от принципа действия имеются следующие наиболее употребительные системы приборов: магнитоэлектрическая; электромагнитная; электродинамическая; термоэлектрическая; индукционная; электростатическая; тепловая; электронная.

По роду измеряемой величины электроизмерительные приборы делятся на: вольтметры (для измерения напряжения и ЭДС); амперметры (для измерения силы тока); ваттметры (для измерения электрической мощности); счетчики (для измерения электрической энергии); омметры, мегаомметры (для измерения электрического сопротивления); частотомеры (для измерения частоты переменного тока); фазометры (для измерения угла сдвига фаз).

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

По способу установки различают щитовые приборы, предназначенные для монтажа на приборных щитах и пультах управления, и переносные приборы.

На шкалу электроизмерительного прибора наносятся условные обозначения, основные из которых приведены в табл. 11.1

Карточка № 11.5 (221)
Классификация электроизмерительных приборов.
Условные обозначения на шкале

Укажите наибольшую приведенную погрешность для приборов классов точности 0,2; 1,0; 2,5	0,002; 0,01; 0,025	22
	0,2%; 1%; 2,5%	82
	± 0,2%; ± 1%; ± 2,5%	12

Продолжение

Как классифицируются приборы по принципу действия?	Вольтметры, амперметры, ваттметры, счетчики, омметры, частотомеры	72
	Приборы магнитоэлектрической, электродинамической, электромагнитной и других систем	163
На шкале прибора нанесен знак, схематично изображающий катушку с ферромагнитным сердечником. Какой это прибор?	Амперметр	92
	Прибор электромагнитной системы	52
	Прибор переменного тока	42
На шкале прибора нанесен знак в виде пятиконечной звезды с цифрой 5 в центре. Что это означает?	Максимально измеряемый ток равен 5 А	143
	Максимально измеряемое напряжение равно 5000 В	112
	Изоляция прибора выдерживает 5 кВ	32
Может ли влиять на показания прибора его ориентация в горизонтальной плоскости?	Может	62
	Не может	2



§ 11.6. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ

Подвижная система электроизмерительного прибора непосредственной оценки, связанная с указателем (стрелкой), подвержена действию различных моментов сил.

Вращающий момент $M_{вр}$ в приборе создается вследствие того или иного действия электрического тока. Способ создания вращающего момента определяет принцип действия прибора.

Противодействующий момент $M_{пр}$ в приборе создается закручиванием или растяжением пружины, в иногда взаимодействием специальной катушки с током

с магнитной системой прибора (в логометрах). Во время отсчета по прибору, когда стрелка неподвижна, вращающий и противодействующий моменты уравновешивают друг друга: $M_{вр} = M_{пр}$.

В отсутствие противодействующего момента работа прибора невозможна, так как при любом значении измеряемой величины стрелка отклонялась бы до упора.

Успокаивающий (демпфирующий) момент необходим для устранения инерционных колебаний стрелки возле положения равновесия. Этот момент должен действовать во время движения стрелки и исчезать при отсчете, чтобы не вносить погрешностей в измерения. Некоторый демпфирующий момент всегда создается в результате трения подвижной системы о воздух. В большинстве случаев этого недостаточно, вследствие чего для успокоения подвижной системы приходится применять специальное устройство (демпфер). Демпфирующий момент пропорционален скорости движения подвижной системы. При отсутствии демпфирующего момента отсчет показаний по прибору был бы затруднен.

Широко применяются воздушный и электромагнитный демпферы.

В воздушном демпфере поршень, связанный с подвижной системой, перемещается в камере, не касаясь ее стенок. Демпфирующий момент создается за счет перепада давлений по обе стороны поршня. Когда стрелка неподвижна, давление по обе стороны поршня выравнивается и демпфирующий момент исчезает. В некоторых случаях применяют жидкостные демпферы.

В электромагнитном демпфере демпфирующий момент создается в результате взаимодействия магнитного поля постоянного магнита с магнитным полем вихревых токов, индуцируемых в пластине при движении подвижной системы.

В приборах магнитоэлектрической системы демпфером служит металлический каркас подвижной рамки, в котором индуцируются вихревые токи при колебаниях рамки в поле постоянного магнита.

Если пластина или рамка неподвижна, то вихревые токи не индуцируются и демпфирующий момент отсутствует.

Подвижная система измерительного прибора кре-

пится на оси, выполняемой в виде тонкой медной или алюминиевой трубки, в которую завальцовываются стальные керны (рис. 11.1). Концы кернов опираются на подпятники из твердого камня, обычно агата (рис. 11.2). Винт подпятника затягивают так, чтобы обеспечивалась свобода для колебаний размеров оси при изменении температуры.

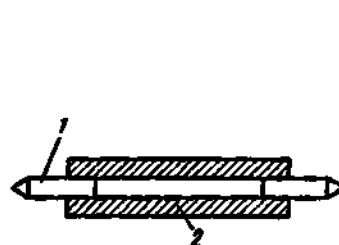


Рис. 11.1. Ось электронизмерительного прибора:
1 — керн; 2 — ось

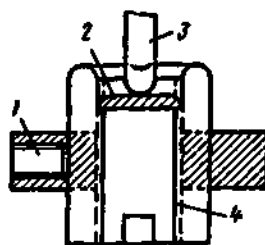


Рис. 11.2. Схема крепления подпятника:
1 — столовый винт;
2 — агатовый камень;
3 — керн; 4 — винт подпятника

Подвижная система должна быть точно сбалансирована относительно оси, для чего служат специальные балансировочные грузики — ганки.

Пружины для создания противодействующего момента обычно изготавливаются в виде спиралей из немагнитного материала, обладающего достаточной упругостью (чаще всего из фосфористой бронзы). Эти же пружины служат для подвода тока к рамке.

Для устранения влияния на показания прибора внешних магнитных полей применяют магнитные экраны из мягкого железа. Механизм прибора помещают в корпус для защиты от влаги, пыли и механических повреждений.

Карточка № 11.6 (192)
Электронизмерительные приборы непосредственной оценки

Какие моменты действуют на подвижную систему электронизмерительного прибора?	Вращающий	196
	Вращающий и противодействующий	229
	Вращающий, противодействующий и демпфирующий	185

Продолжение

Какие моменты действуют на подвижную систему электронизмерительного прибора при отсчете показаний (стрелка прибора неподвижна)?	Вращающий	206
	Вращающий и противодействующий	217
	Вращающий, противодействующий и демпфирующий	240
Что произойдет, если упругие токоподводящие пружинки из фосфористой бронзы заменить мягкой медной фольгой?	Точность прибора уменьшится	174
	Точность прибора увеличится	133
	При любом токе стрелка будет отклоняться до упора	154
Нужен ли зазор между керном и подпятником?	Не нужен	103
	Нужен	123
	Зазор существует ввиду невозможности точного изготовления деталей	23
Какие материалы используются для экранирования приборов от внешних магнитных полей?	Магнитотвердые	83
	Магнитомягкие	13

§ 11.7. ПРИБОРЫ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на использовании взаимодействия поля постоянного магнита и катушки (рамки), по которой протекает ток.

Устройство прибора схематически изображено на рис. 11.3. Между полюсами постоянного магнита NS с помощью полюсных наконечников 3 и цилиндрического сердечника 2 создается воздушный зазор такой формы, что силовые линии магнитного поля при любом положении рамки 1 перпендикулярны ее проводникам.

Сила, действующая на одну сторону рамки в магнитном поле, определяется законом Ампера: $F = IBw$, где I — ток в проводниках рамки; l — длина той части стороны рамки, которая находится в магнитном поле (активная длина); B — магнитная индукция в воздушном зазоре; w — число витков рамки.

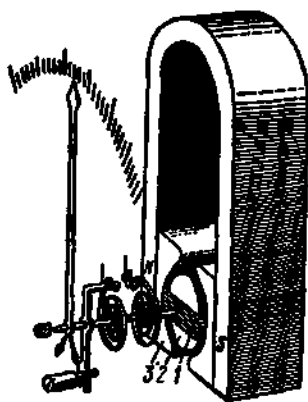


Рис. 11.3. Устройство прибора магнитоэлектрической системы

пружины, которые одновременно служат для создания противодействующего момента. Момент, создаваемый пружиной, пропорционален углу закручивания, поэтому $M_{\text{пр}} = k_2 \alpha$, где k_2 — постоянный коэффициент; α — угол поворота рамки (равный углу закручивания пружины).

Учитывая, что в момент отсчета, когда стрелка неподвижна, $M_{\text{пр}} = M_{\text{эл}}$, получаем $k_1 I = k_2 \alpha$. Из этого равенства находим $\alpha = \frac{k_1}{k_2} I = k I$.

Таким образом, угол поворота рамки и стрелки-указателя пропорционален току, т. е. прибор может быть отградуирован как амперметр.

На основании закона Ома имеем $I = U/R_n$, где U — напряжение на зажимах прибора; R_n — электрическое сопротивление рамки прибора.

После подстановки получаем

$$\alpha = \frac{k}{R_n} U.$$

Поскольку отношение k/R_n для данного прибора — величина постоянная, последнее выражение показывает, что прибор может быть отградуирован как вольтметр.

Демпфирующий момент в магнитоэлектрических приборах создается за счет вихревых токов, возникающих в алюминиевом каркасе рамки при перемещении подвижной системы.

На другую сторону рамки действует такая же сила, но противоположно направленная.

Момент сил определяется как произведение силы на плечо. Следовательно, $M_{\text{эл}} = I B r w = B S w I$, где r — ширина рамки; $S = l r$ — площадь рамки.

Значения B , S , w для каждого прибора постоянны, поэтому последнюю формулу можно записать в виде $M_{\text{эл}} = k_1 I$, где k_1 — постоянный коэффициент.

Ток к рамке подводится через две спиральные пружины,

Магнитоэлектрические амперметры и вольтметры являются основными измерительными приборами в цепях постоянного тока.

Приборы магнитоэлектрической системы обладают высокими точностью и чувствительностью, малым собственным потреблением энергии. Они имеют равномерную шкалу (угол отклонения стрелки пропорционален току), их показания почти не зависят от влияния внешних магнитных полей. Основной недостаток этих приборов — невозможность измерений в цепях переменного тока.

Для измерений в цепях переменного тока магнитоэлектрические приборы включают через выпрямители. Высокочувствительный магнитоэлектрический прибор, соединенный с выпрямительной схемой, называют прибором выпрямительной системы. Выпрямительные элементы (диоды) монтируют в корпусе прибора и обеспечивают одно- или двухполупериодное выпрямление переменного тока.

Приборы выпрямительной системы находят широкое применение. Обычно их изготавливают комбинированными, т. е. предназначенными для измерения тока, напряжения, сопротивления в цепях постоянного и переменного тока с различными пределами измерения.

Выпрямительные схемы вносят дополнительные погрешности в измерения, поэтому класс точности приборов выпрямительной системы относительно невысок и обычно составляет 1,5—2,5.

Карточка № 11.7 (243)
Приборы магнитоэлектрической системы

Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии	постоянного магнита и рамки, по которой проходит ток	73
	магнитного поля катушки и ферромагнитного сердечника	164
	проводников, по которым проходит ток	93
Можно ли магнитоэлектрический амперметр отградуировать как вольтметр?	Можно	53
	Нельзя	43
	Можно, если перемещать рамку	144

Продолжение

Чему пропорционален: а) противодействующий момент; б) вращающий момент; в) угол отклонения стрелки?	а) α ; б) I ; в) I	113
	а) α ; б) α ; в) I	33
	а) I ; б) I ; в) I	63
Можно ли алюминиевый каркас рамки прибора магнитоэлектрической системы заменить пластмассовым?	Можно	3
	Нельзя	197
Можно ли магнитоэлектрический прибор использовать для измерений в цепях переменного тока?	Можно	230
	Нельзя	186
	Можно, если прибор подключать через выпрямительную систему	207

§ 11.8. ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

В основе работы приборов электромагнитной системы лежит принцип механического взаимодействия магнитного поля и ферромагнитного материала.

Устройство прибора схематически изображено на рис. 11.4. Сердечник 3 из магнитомягкого (для уменьшения потерь на гистерезис) материала втягивается в катушку 1 при прохождении тока по ее обмотке. Противодействующий момент создается пружиной 2. Демпфирование осуществляется воздушным демпфером 4, представляющим собой гильзу, в которой может перемещаться легкий поршень, связанный со стрелкой.

Вращающий момент пропорционален квадрату тока, так как магнитные поля катушки и сердечника создаются одним и тем же измеряемым током, проходящим по катушке:

$$M_{\text{вп}} = k_1 I^2; M_{\text{пр}} = k_2 \alpha;$$

$$k_1 I^2 = k_2 \alpha; \alpha = \frac{k_1}{k_2} I^2 = \frac{k}{R^2} U^2.$$

Последнее выражение показывает, что угол отклонения стрелки пропорционален квадрату тока или напряжения. Шкала прибора квадратичная, сжатая вначале.

Приборы электромагнитной системы широко применяют для измерений в цепях постоянного и переменного токов. Они просты и надежны, обладают высокой перегрузочной способностью и механической прочностью. Однако этим приборам присущ ряд недостатков, основными из которых являются низкая чувствительность, невысокая точность, значительное собственное потребление энергии, неравномерность шкалы, влияние внешних магнитных полей на показания приборов.

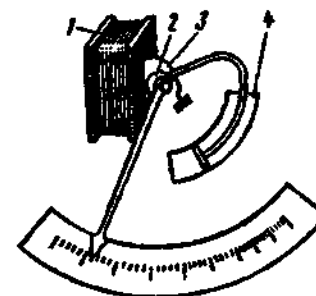


Рис. 11.4. Устройство прибора электромагнитной системы

Карточка № 11.8 (164) Приборы электромагнитной системы

Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии	магнитного поля катушки и ферромагнитного сердечника	218
	постоянного магнита и рамки, по которой проходит ток	241
	проводников, по которым проходит ток	175
Укажите основные детали прибора электромагнитной системы, без которых работа прибора невозможна	Катушка, сердечник, стрелка, шкала	134
	Катушка, сердечник, демпфер, стрелка	155
	Катушка, сердечник, пружина, стрелка	124
	Катушка, сердечник, пружина, демпфер	104
Чему пропорциональны: а) противодействующий момент; б) вращающий момент; в) угол отклонения стрелки?	а) α ; б) I^2 ; в) I^2	24
	а) α ; б) α ; в) I^2	84
	а) I^2 ; б) I^2 ; в) I^2	14

Можно ли прибор электромагнитной системы использовать для измерений: а) в цепях переменного тока; б) в цепях постоянного тока?	а) Можно; б) можно	74
	а) Можно; б) нельзя	165
	а) Нельзя; б) можно	94
	а) Нельзя; б) нельзя	235
Может ли зазор между поршнем и цилиндром в воздушном демпфере: а) быть большим; б) отсутствовать?	а) Может; б) не может	54
	а) Не может; б) не может	44
	а) Не может; б) может	145

§ 11.9. ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Приборы электродинамической системы основаны на принципе механического взаимодействия проводников, по которым проходит ток.

Устройство прибора поясняется рис. 11.5. Катушка 2 неподвижна, катушка 3 помещается на оси и может поворачиваться вместе с закрепленной на ней стрелкой. Ток к подвижной катушке подводится с помощью пружин 1, которые одновременно служат для создания противодействующего момента. Успокоение подвижной системы осуществляется воздушным демпфером 4.

Амперметры и вольтметры электродинамической системы имеют квадратичную шкалу.

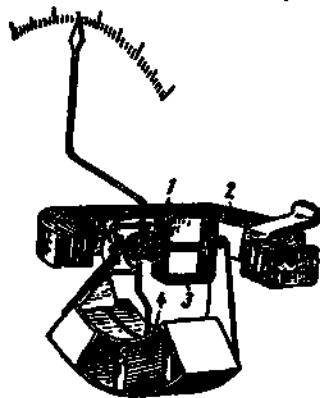


Рис. 11.5. Устройство прибора электродинамической системы

Широко распространены электродинамические ваттметры — приборы для измерения электрической мощности в цепях постоянного и переменного токов. Электродинамические ваттметры имеют равномерную шкалу.

Основное достоинство приборов электродинамической системы — большая точность измерений в цепях постоянного и переменного тока. К недостаткам этих приборов следует отнести значительное собственное потребление энергии и под-

верженность воздействию внешних магнитных полей.

Разновидностью приборов электродинамической системы являются ферродинамические приборы, у которых для повышения вращающего момента магнитный поток неподвижной катушки создается в специальном магнитопроводе.

Конструкция ферродинамического прибора аналогична конструкции прибора магнитоэлектрической системы, у которого постоянный магнит заменен электромагнитом. Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод ферродинамического прибора изготавливают из тонких листов электротехнической стали или прессуют из ферромагнитного порошка с электроизоляционным наполнителем.

Ферромагнитный сердечник вносит дополнительные погрешности в измерения, однако применение высококачественных материалов и совершенной технологии изготовления позволяет получить ферродинамические ваттметры класса точности 0,2.

Существенным недостатком приборов ферродинамической системы является зависимость их параметров от частоты измеряемого тока.

Карточка № 11.9 (127)
Приборы электродинамической системы

Принцип действия приборов электродинамической системы основан на взаимодействии	магнитного поля катушки и ферромагнитного сердечника	114
	проводников, по которым проходит ток	34
	постоянного магнита и рамки, по которой проходит ток	64
Укажите основные детали прибора электродинамической системы, без которых работа прибора невозможна	Подвижная катушка, стрелка, пружина, демпфер	4
	Неподвижная катушка, подвижная катушка, пружина, стрелка	196
	Подвижная катушка, неподвижная катушка, пружина, демпфер	231

Продолжение

Можно ли каркас подвижной рамки прибора с воздушным демпфером сделать пластмассовым?	Нельзя	187
	Можно	208
Какую шкалу имеют: а) ваттметры; б) вольтметры; в) амперметры электродинамической системы?	а) Равномерную; б) квадратичную; в) квадратичную	219
	а) Квадратичную; б) равномерную; в) квадратичную	220
	а) Равномерную; б) равномерную; в) равномерную	242
Можно ли приборы электродинамической системы применять для измерений: а) в цепях переменного тока; б) в цепях постоянного тока?	а) Можно; б) нельзя	176
	а) Можно; б) можно	135
	а) Нельзя; б) можно	156

§ 11.10. ЦИФРОВЫЕ ПРИБОРЫ

В последние годы все большее распространение находят цифровые электронизмерительные приборы. Эти приборы измеряют значения непрерывно изменяющейся величины в отдельные (дискретные) моменты времени и представляют полученный результат в цифровой форме.

Представление непрерывно изменяющейся физической величины в виде последовательности ее дискретных значений, отличающихся друг от друга на небольшую долю, называется квантованием измеряемой величины по уровню и по времени. Обычно интервал времени между соседними измерениями выбирают таким, чтобы отклонение изменяющейся величины от фиксированного измеренного значения не превышало заданной погрешности измерения.

Основное достоинство цифровых приборов заключается в том, что результат измерения может подвергаться дальнейшим физическим и математическим преобразованиям без увеличения погрешности, так как цифровое значение величины может быть с любой степенью точности представлено последовательностью

сигналов (например, импульсов), каждый из которых может иметь существенные искажения.

Основными элементами цифровых электронизмерительных приборов являются триггеры, логические схемы, бесконтактные ключи и цифровые указатели.

Триггеры представляют собой электронные схемы с двумя устойчивыми состояниями, одно из которых соответствует цифре 0, другое — цифре 1. Из этих двух цифр в двончной системе счисления можно построить любое число. Логические схемы позволяют перевести эти числа в десятичную систему и отобразить на цифровых индикаторах в привычной форме.

В качестве цифровых индикаторов широкое применение находят электронные лампы с фигурными электродами, имеющими форму цифр от 0 до 9.

В настоящее время промышленностью выпускаются главным образом цифровые вольтметры. Разработаны и находят применение также цифровые амперметры, омметры, частотомеры, фазометры и другие приборы.

Применение цифровых приборов с дискретным отсчетом позволило создать многоканальные автоматические устройства для централизованного контроля многих параметров, характеризующих сложные технологические процессы. Измерение параметров производится поочередно с заданной дискретностью по времени.

Цифровые электронизмерительные приборы имеют высокую точность (погрешность от 0,1 до 1%), большое быстродействие, широкие пределы измерений, легко комплектуются с цифровыми вычислительными машинами, позволяют передавать результаты без искажения на неограниченные расстояния.

К недостаткам этих приборов следует отнести их сравнительную сложность и высокую стоимость.

Карточка № 11.10 (156)
Цифровые приборы

В чем заключается сущность работы цифрового электронизмерительного прибора?	В цифровом изображении измеряемой величины	105
	В квантовании измеряемой величины по времени и по уровню	125

Продолжение

Измеряются: а) медленно меняющиеся величины; б) быстро меняющиеся величины. В каком случае квант времени должен быть выбран меньшим?	Безразлично	25
	В первом случае	85
	Во втором случае	15
Показания обычного и цифрового вольтметров передаются по проводам на дальнее расстояние. Какой отсчет точнее, если класс точности приборов одинаков?	Обычным вольтметром	75
	Цифровым вольтметром	166
	Точность отсчетов одинакова	95
В какой системе счисления производятся: а) обработка результатов измерений в схеме цифрового прибора; б) представление результатов на индикаторе?	В двоичной	55
	а) В двоичной; б) в десятичной	45
	а) В десятичной; б) в двоичной	146
Какое достоинство не свойственно цифровым электронизмерительным приборам?	Многоканальность	115
	Простота сопряжения с ЭВМ	35
	Простота телензмерений	65
	Простота устройства и небольшая стоимость	5

§ 11.11. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ, ТОКОВ И МОЩНОСТИ

Для измерения тока в какой-либо ветви электрической цепи амперметр включают последовательно с ее элементами. В частности, для измерения тока нагрузки амперметр включают последовательно с потребителем (рис. 11.6, а). Чтобы включение амперметра не искажало режима работы электрической цепи, его сопротивление должно быть возможно малым.

Вольтметр включают параллельно той ветви электрической цепи, напряжение на которой необходимо измерить (рис. 11.6, б). Чтобы включение вольтметра не приводило к изменению токов в цепи, его сопротивление должно быть значительно больше сопротивления ветви, параллельно которой подключен измерительный прибор.

Для измерения мощности в цепях постоянного и однофазного переменного токов используют ваттметры электродинамической системы. Схема включения и внешний вид ваттметра электродинамической системы представлены на рис. 11.7, а, б. Неподвижную (амперметровую) обмотку ваттметра включают в цепь последовательно, подвижную (вольтметровую) — параллельно потребителю. В соответствии с этим на лицевую панель ваттметра выведены четыре зажима, два из которых обозначим символом I (токовые зажимы),

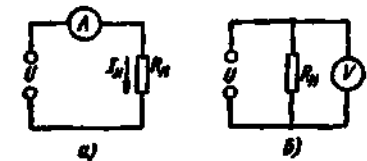


Рис. 11.6. Схемы включения амперметра (а) и вольтметра (б)

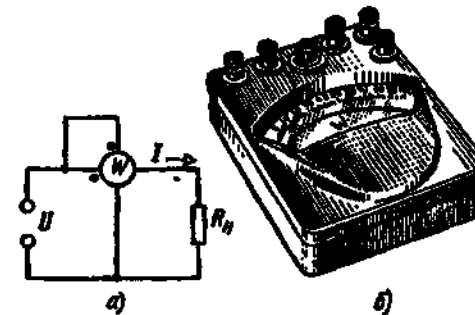


Рис. 11.7. Схема включения (а) и внешний вид (б) ваттметра электродинамической системы

а два других — символом U (зажимы напряжения). Два зажима помечены точками и называются генераторными.

Чтобы понять назначение генераторных зажимов, рассмотрим две возможные схемы включения обмоток ваттметра, изображенные на рис. 11.8. В схеме рис. 11.8, а мощность, измеряемая ваттметром, $P_{\text{изм}} = U_V I_A = (U_n + I_n R_A) I_n = U_n I_n + I_n^2 R_A$ больше мощности нагрузки $P_n = U_n I_n = I_n^2 R_n$ на значение $\Delta P = I_n^2 R_A$. Следовательно,

$$\delta = \frac{\Delta P}{P_n} = \frac{I_n^2 R_A}{I_n^2 R_n} = \frac{R_A}{R_n}.$$

В схеме рис. 11.8, б мощность, измеряемая ваттметром,

$$P_{из} = U_V I_A = U_V (I_N + I_V) = U_V I_N + U_V I_V$$

больше мощности нагрузки $P_N = U_N I_N$ на значение

$$\Delta P = U_V I_V, \text{ т. е. } \delta = \frac{\Delta P}{P_N} = \frac{U_V I_V}{U_N I_N} = \frac{I_V}{I_N} = \frac{R_N}{R_V}.$$

Таким образом, в обоих случаях возникает систематическая погрешность, зависящая от схемы соединения.

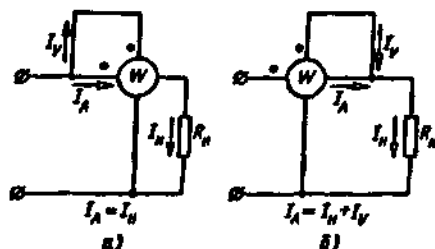


Рис. 11.8. К оценке систематической погрешности ваттметра

Градировку ваттметров производят по схеме рис. 11.8, а. Для получения такой схемы генераторные зажимы (помечены точками) следует объединить и подключить к одному и тому же проводу. Вместе с тем генераторные зажимы являются началами обмоток. При правильном включении ваттметра стрелка будет отклоняться вправо. Чтобы изменить направление отклонения стрелки, необходимо изменить направление тока в любой из обмоток ваттметра.

Карточка № 11.11 (331)
Измерение напряжений, токов и мощности

Как включаются в электрическую цепь: а) амперметр; б) вольтметр?	а) Последовательно с нагрузкой; б) параллельно нагрузке	199
	а), б) Последовательно с нагрузкой	232
	а), б) Параллельно нагрузке	188

Продолжение

Какое сопротивление должны иметь: а) вольтметр; б) амперметр?	а), б) Большое	209
	а), б) Малое	221
	а) Большое; б) малое	243
Какую мощность измеряет электродинамический ваттметр?	Активную	177
	Реактивную	136
	Полную	157
Как включаются: а) подвижная обмотка ваттметра; б) неподвижная обмотка ваттметра?	а), б) Последовательно	106
	а) Последовательно; б) параллельно	126
	а) Параллельно; б) последовательно	26
Сопротивление нагрузки 10 Ом. Сопротивление неподвижной обмотки ваттметра 0,1 Ом, сопротивление подвижной обмотки 1000 Ом. Определить систематическую погрешность измерения мощности	1 %	86
	0,1 %	16
	10 %	76

§ 11.12. РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИБОРОВ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ

Обмотка амперметра рассчитана на небольшие токи. Для увеличения пределов измерения амперметра применяют шунты. Рис. 11.9 поясняет вывод формулы для сопротивления шунта. Обозначения на рисунке: $R_{ш}$ — сопротивление шунта; R_A — сопротивление амперметра; I — измеряемый ток; $I_{ш}$ — ток, проходящий через шунт; I_A — максимально допустимый ток амперметра; $n = I/I_A$ — коэффициент расширения пределов измерения амперметром.

В соответствии с рис. 11.9

$$I_A = I \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_A}; \quad n = \frac{I}{I_A} = \frac{R_{ш} + R_A}{R_{ш}}; \quad R_{ш} = \frac{R_A}{n - 1}.$$

Выведенная для $R_{ш}$ формула позволяет по известному сопротивлению амперметра и заданному коэффициенту расширения пределов измерения подсчитать сопротивление шунта.

Для расширения пределов измерения вольтметра применяют добавочные резисторы, которые включают последовательно с обмоткой вольтметра (рис. 11.10). Обозначения на рисунке: $R_{доб}$ — добавочный резистор, R_V — сопротивление вольтметра; U — измеряемое на-

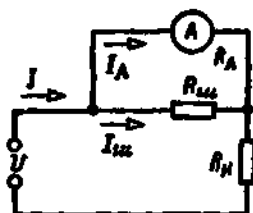


Рис. 11.9. К расчету сопротивления шунта

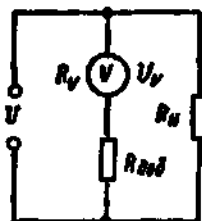


Рис. 11.10. К расчету сопротивления добавочного резистора

пряжение; U_V — максимально допустимое напряжение вольтметра; I_V — ток, проходящий через вольтметр; $m = U/U_V$ — коэффициент расширения пределов измерения вольтметром.

В соответствии с рис. 11.10 получим:

$$U = I_V(R_V + R_{доб}); \quad U_V = I_V R_V;$$

$$m = \frac{U}{U_V} = \frac{R_V + R_{доб}}{R_V};$$

$$R_{доб} = R_V(m - 1).$$

Последняя формула позволяет по заданному коэффициенту расширения пределов измерения и известному сопротивлению вольтметра найти сопротивление добавочного резистора.

Помимо шунтов и добавочных резисторов в схемах переменного тока для расширения пределов измерения применяются измерительные трансформаторы, которые одновременно обеспечивают безопасность операторов при измерениях в высоковольтных цепях.

Первичная обмотка трансформатора тока включается последовательно в ветвь, где измеряется ток, а вторичная обмотка подсоединяется к зажимам амперметра.

Первичная обмотка трансформатора тока содержит

один или несколько витков, вторичная обмотка — большое число витков. Для обеспечения безопасности один конец вторичной обмотки заземлен. Шкала амперметров, включаемых через трансформатор тока, рассчитана на 5 А (реже на 1 А).

Пределы измерений трансформаторами тока расширяются в k раз, где k — коэффициент трансформации.

Трансформатор напряжения изменяет пределы измерения вольтметра также в k раз. Многовитковая первичная обмотка трансформатора напряжения подключается параллельно участку, напряжение на котором измеряется, а вторичная обмотка — к зажимам вольтметра. Число витков вторичной обмотки меньше, чем первичной ($w_2 < w_1$).

Карточка № 11.12 (251)
Расширение пределов измерения приборов
непосредственной оценки

Шкала амперметра 0—30 А. Ток в цепи может достигать 300 А. Сопротивление амперметра 0,09 Ом. Каково должно быть сопротивление шунта?	0,1 Ом	167
	0,01 Ом	96
	0,001 Ом	56
Шкала амперметра 0—10 А. Сопротивление амперметра 0,5 Ом. Сопротивление шунта 0,1 Ом. Какой максимальный ток можно измерить?	60 А	46
	50 А	147
	40 А	116
Шкала вольтметра 0—100 В. Напряжение в цепи может достигать 500 В. Сопротивление вольтметра 500 Ом. Найти добавочное сопротивление вольтметра	25 кОм.	36
	20 кОм	66
	50 кОм	6
Шкала амперметра 0—5 А. Амперметр подключен к трансформатору тока с коэффициентом трансформации 100. Какой максимальный ток можно измерить?	100 А	200
	500 А	233
	1000 А	189
Можно ли ваттметром электродинамической системы измерить мощность: а) в цепи постоянного тока; б) в цепи переменного тока?	Можно	210
	а) Можно; б) нельзя	222
	а) Нельзя; б) можно	244

§ 11.13. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

Мощность симметричной трехфазной цепи находят как утроенную мощность одной фазы. Измерение мощности одной фазы осуществляется ваттметром, включенным по схемам рис. 11.11 при соединении нагрузки звездой (рис. 11.11, а) и треугольником (рис. 11.11, б).

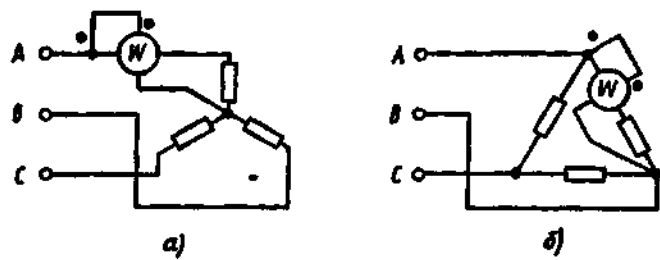


Рис. 11.11. Схема включения ваттметра в симметричную трехфазную цепь при соединении нагрузки звездой (а) и треугольником (б)

Если нулевая точка звезды или ветви треугольника недоступны для непосредственного подключения приборов, то образуют искусственную нулевую точку, как показано на рис. 11.12. При этом необходимо, чтобы каждое из сопротивлений R_V было равно сопротивлению вольтметровой обмотки ваттметра.

Для измерения мощности несимметричной трехфазной цепи используется метод двух ваттметров.

Для доказательства этого метода выразим мощность трехпроводной трехфазной цепи через линейные токи и напряжения.

При соединении звездой без нулевого провода сумма линейных токов равна нулю: $i_A + i_B + i_C = 0$, или $i_C = -i_A - i_B$. Подставив выражение для тока i_C в формулу мощности трехфазной цепи

$$P = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C,$$

получим

$$P = u_A i_A + u_B i_B + u_C (-i_A - i_B) = (u_A - u_C) i_A + (u_B - u_C) i_B = u_{AC} i_A + u_{BC} i_B.$$

При соединении треугольником сумма фазных (линейных) напряжений равна нулю: $u_{AB} + u_{BC} + u_{CA} = 0$

или $u_{AB} = -u_{BC} - u_{CA}$. Подставив выражение для напряжения u_{AB} в формулу мощности

$$P = u_{AB} i_{AB} + u_{BC} i_{BC} + u_{CA} i_{CA},$$

найдем

$$P = u_{BC} (i_{BC} - i_{AB}) + u_{CA} (i_{CA} - i_{AB}) = u_{BC} i_B + u_{CA} (-i_A) = u_{AC} i_A + u_{BC} i_B.$$

Полученным результатам соответствует схема включения двух ваттметров, показанная на рис. 11.13. Мощность несимметричной трехфазной цепи находят

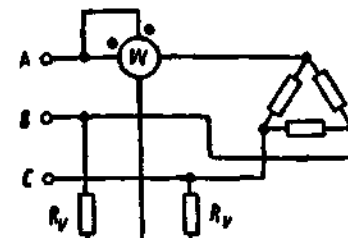


Рис. 11.12. Схема включения ваттметра с искусственной нулевой точкой

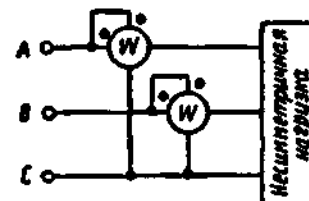


Рис. 11.13. Схема включения ваттметра в трехпроводную трехфазную цепь при несимметричной нагрузке

как сумму показаний этих ваттметров. В некоторых случаях (это зависит от характера нагрузки) стрелка одного из ваттметров будет отклоняться влево, за нуль шкалы. Тогда необходимо изменить направление тока в одной из обмоток этого ваттметра и отсчитать его показания. При этом мощность цепи находят как разность показаний ваттметров.

Мощность четырехпроводной трехфазной цепи измеряют тремя ваттметрами (рис. 11.14) и подсчитывают как сумму их показаний.

Имеются также специальные ваттметры, в которых два (для трехпроводной цепи) или три (для четырехпроводной цепи) измерительных механизма действуют на одну ось. Эти механизмы расположены в одном корпусе. По шкале ваттметра отсчитывают непосредственно мощность трехфазной цепи.

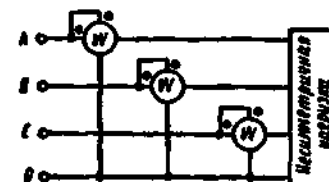


Рис. 11.14. Схема включения ваттметра в четырехпроводную трехфазную цепь при несимметричной нагрузке

Карточка № 11.13 (287)
Измерение мощности в трехфазных цепях

Сколько ваттметров необходимо для измерения мощности трехфазной цепи при симметричной нагрузке?	Один	178
	Два	137
	Три	158
Сколько ваттметров при несимметричной нагрузке нужно для измерения мощности в трехфазной цепи: а) с нулевым проводом; б) без нулевого провода?	Два	107
	а) Два; б) три	127
	а) Три; б) два	27
На какие токи и напряжения включают ваттметр при измерении мощности: а) с одним ваттметром; б) с двумя ваттметрами?	Фазные	87
	Линейные	17
	а) Фазные; б) линейные	77
На какие токи и напряжения включают ваттметры при измерении мощности в трехфазной цепи с нулевым проводом?	Линейные	168
	Фазные	97
	На линейные токи и фазные напряжения	57
Зачем нужна искусственная нулевая точка?	Чтобы измерить линейное напряжение	47
	Чтобы измерить фазное напряжение	148

§ 11.14. ИНДУКЦИОННЫЙ СЧЕТЧИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. УЧЕТ ЭНЕРГИИ В ОДНОФАЗНЫХ И ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

Для подсчета количества электрической энергии, поступившей к потребителю за определенное время, служат электрические счетчики. В цепях переменного тока наибольшее распространение получили индукционные счетчики.

Устройство индукционного счетчика показано на рис. 11.15. Многовитковая обмотка электромагнита 2 (обмотка напряжения) подсоединена параллельно потребителю (нагрузке). Последовательно с нагрузкой включена обмотка электромагнита 1—3, состоящая из нескольких витков (токовая обмотка). Поскольку индуктивность катушки пропорциональна квадрату числа

витков, можно считать, что индуктивность обмотки напряжения значительно больше индуктивности токовой обмотки. Поэтому ток и совпадающий с ним по фазе магнитный поток электромагнита 2 отстают по фазе от тока и магнитного потока электромагнита 1—3 на угол, близкий к 90° (рис. 11.16).

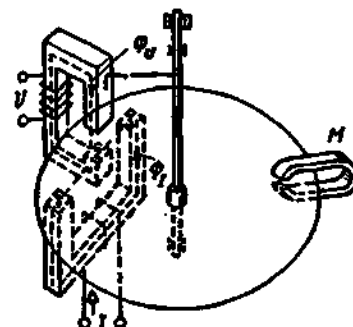


Рис. 11.15. Устройство индукционного счетчика электрической энергии

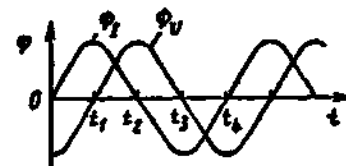


Рис. 11.16. Магнитные потоки токовой обмотки и обмотки напряжения индукционного счетчика

Рассмотрим, как изменяются во времени магнитные потоки на участках 1, 2, 3 (рис. 11.17). Магнитный поток, входящий в диск сверху, пометим буквой N , а снизу — буквой S . В момент времени $t=0$ магнитный поток Φ_1 равен нулю, а магнитный поток Φ_2 отрицателен (рис. 11.16), поэтому участки 1 и 3 (рис. 11.17) помечаем цифрой 0, а участок 2 — буквой S . В момент времени t_1 магнитный поток Φ_1 положителен, а поток $\Phi_2=0$, поэтому участок 1 помечаем буквой N , участок 2 — цифрой 0, а участок 3 — буквой S . Проведя аналогичные рассуждения для последовательных значений времени t_2, t_3, t_4 , проставим буквы на рис. 11.17. Из рис. 11.17 видно, что северный полюс магнитного поля последовательно смещается от участка 1 к участкам 2 и 3, также последовательно смещается и южный полюс.

Рассмотренное магнитное поле, образованное наложением магнит-

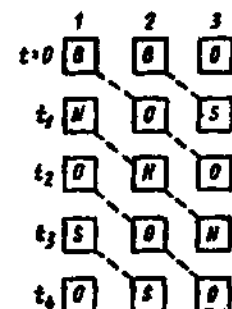


Рис. 11.17. Бегущее магнитное поле

ных полей двух электромагнитов, называется бегущим. Бегущее магнитное поле индуцирует в диске токи, которые, взаимодействуя с полем, создают механическую силу. Сила в соответствии с правилом Ленца стремится устранить причину, ее вызывающую. Она раскручивает диск в направлении бегущего поля. Теоретические выкладки показывают, что при определенных условиях вращающий момент пропорционален мощности:

$$M_{\text{вп}} = k_1 U I \cos \varphi = k_1 P.$$

Тормозной момент, создаваемый вихревыми токами, которые индуцируются в диске постоянным магнитом M (см. рис. 11.15), пропорционален частоте вращения диска n :

$$M_{\text{т}} = k_2 n.$$

В установившемся режиме $M_{\text{вп}} = M_{\text{т}}$, откуда

$$k_1 P = k_2 n.$$

Следовательно,

$$P = kn,$$

где $k = k_2/k_1$.

Умножим левую и правую части последнего равенства на время t :

$$Pt = knl,$$

где $Pt = A$ — потребляемая энергия; $nl = N$ — суммарное число оборотов диска за время t .

Таким образом,

$$A = kN,$$

т. е. потребляемая энергия пропорциональна числу оборотов диска, и шкалу счетного механизма можно градуировать в единицах энергии (кВт·ч).

Принципиальная схема включения счетчика в однофазную цепь не отмечается от схемы включения ваттметра (рис. 11.18). Практическая схема включения однофазного счетчика представлена на рис. 11.19.

Схемы включения индукционных счетчиков для измерения энергии в цепях трехфазного тока аналогичны рассмотренным схемам включения ваттметров. В большинстве случаев для учета энергии в трехфазных цепях пользуются трехфазными счетчиками.

В трехпроводных трехфазных цепях используются

счетчики с двумя измерительными механизмами, размещенными в одном корпусе и связанными общей осью. В счетчиках для измерения энергии в четырехпроводных трехфазных цепях с общей осью связаны три измерительных механизма.

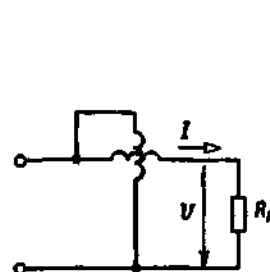


Рис. 11.18. Принципиальная схема включения счетчика в однофазную цепь

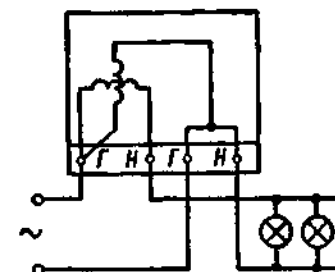


Рис. 11.19. Практическая схема включения однофазного счетчика

Ваттметры и счетчики обычно служат для измерения активных мощности и энергии. Включенные по специальным схемам, они применяются для измерения реактивных мощности и энергии. Выпускаются также специальные реактивные ваттметры и счетчики.

Карточка № 11.14 (238)
Индукционный счетчик электрической энергии.
Учет энергии в однофазных и трехфазных цепях

Как соотносятся по фазе магнитные потоки обмотки напряжения и токовой обмотки индукционного счетчика электрической энергии?	Совпадают по фазе	117
	Сдвинуты на угол, близкий к 90°	37
Чему пропорциональны: а) вращающий; б) тормозной, моменты, действующие на диск счетчика?	а) Мощности; б) углу поворота диска	67
	а) Мощности; б) частоте вращения диска	7
	а) Энергии; б) частоте вращения диска	201
Частота вращения диска счетчика увеличилась в 2 раза. Как изменилась мощность, потребляемая нагрузкой из сети?	Не изменилась	234
	Увеличилась в 2 раза	190

	Сделать выводы относительно мощности нельзя, так как счетчик измеряет энергию	211
Чему пропорциональны: а) мощность; б) энергия, потребляемая нагрузкой из сети?	Частоте вращения диска	223
	а) Частоте вращения диска; б) числу оборотов диска	245
	Числу оборотов диска	179
Сколько зажимов необходимо для включения однофазного счетчика в сеть?	Два	138
	Четыре	159
	Шесть	108

§ 11.15. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Неизвестное сопротивление R_x можно найти, используя закон Ома, если известны ток I , проходящий через сопротивление, и напряжение U на его зажимах:

$$R_x = U/I.$$

На рис. 11.20 изображена схема для измерения сопротивлений с использованием закона Ома.

Сопротивление $R_{изм}$, подсчитанное по показаниям приборов, будет отличаться от действительного R_x :

$$R_{изм} = \frac{U + IR_A}{I} = R_x + R_A.$$

Из этого выражения следует, что схема рис. 11.20 пригодна для измерения больших сопротивлений, когда $R_x \gg R_A$.

Для измерения малых сопротивлений измерительные приборы необходимо включать по схеме рис. 11.21. В этом случае

$$R_{изм} = \frac{U}{I + I_V} = \frac{U}{\frac{U}{R_x} + \frac{U}{R_V}} = \frac{R_x}{1 + \frac{R_x}{R_V}}$$

Из формулы следует, что измерение будет тем точнее, чем сильнее неравенство $R_x \ll R_V$.

Широкое применение для измерения сопротивлений находят специальные приборы — омметры. Принципиальная схема омметра изображена на рис. 11.22. Обозначения на рисунке: E — батарея гальванических

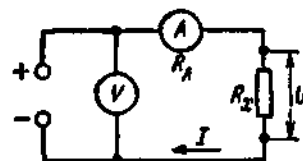


Рис. 11.20. Схема измерения больших сопротивлений с помощью амперметра и вольтметра

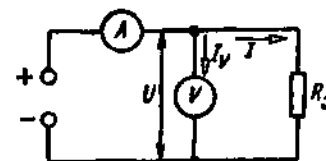


Рис. 11.21. Схема для измерения малых сопротивлений

элементов; I — измеритель тока магнитоэлектрической системы; $R_{огр}$ — ограничительный резистор. Резистор R_x включается между клеммами a и b . При измерениях ключ K разомкнут.

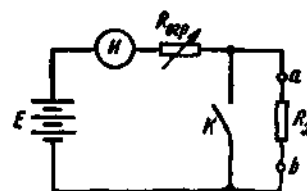


Рис. 11.22. Принципиальная схема омметра



Рис. 11.23. Внешний вид мегаомметра

На основании закона Ома можно написать

$$I = \frac{E}{R_{огр} + R_x}.$$

При постоянных значениях E и $R_{огр}$ ток в цепи I зависит только от сопротивления R_x , поэтому измеритель тока может быть градуирован непосредственно в единицах сопротивления — омах. Шкала прибора обратная: нулевое деление расположено справа; по мере увеличения сопротивления R_x и уменьшения тока I стрелка прибора отклоняется влево. Резистор $R_{огр}$ служит для предохранения измерителя от перегрузок и

для установки омметра на нуль. Перед измерением следует замкнуть ключ K (установить $R_x=0$) и, регулируя $R_{\text{вн}}$ ручкой, выведенной на переднюю панель прибора, установить стрелку измерителя на нуль. Затем ключ K следует разомкнуть. Если в схеме прибора ключ K не предусмотрен, то при установке измерителя на нуль зажимы a и b нужно замкнуть накоротко толстым проводом.

Разновидностью омметров являются мегаомметры. Они предназначены для измерения больших сопротивлений, например сопротивлений изоляции проводов. Вместо гальванической батареи в них устанавливается динамомашина с ручным приводом, вырабатывающая напряжение 500 В при частоте вращения ручки около 90 об/мин. Внешний вид мегаомметра показан на рис. 11.23.

Характер повреждения обесточенной электрической сети можно выявить, проверив отдельные линии сети с помощью мегаомметра. Если провод оборван, то мегаомметр покажет очень большое сопротивление изоляции (порядка 10^6 — 10^7 Ом). При коротком замыкании линии показания мегаомметра будут близки к нулю. В нормальной линии мегаомметр покажет сопротивление нагрузки.

Качество изоляции характеризуется ее электрическим сопротивлением и электрической прочностью. Для измерения сопротивления изоляции сети применяют мегаомметры с высоким напряжением (порядка 500 В и выше), что позволяет не только измерить сопротивление изоляции, но одновременно проверить ее электрическую прочность.

Перед проверкой изоляции сети какого-либо объекта (например, корабля) необходимо полностью обесточить сеть, выключить генераторы, аккумуляторы и отключить провода и штепсельные разъемы от всех потребителей электроэнергии так, чтобы электрическая сеть была полностью изолирована от корпуса. Конденсаторы также надо отключить от сети во избежание пробоя их высоким напряжением мегаомметра.

Сопротивление изоляции всей сети относительно корпуса корабля в значительной степени зависит от условий эксплуатации и влияния внешней среды (влажность, загрязнение, температура, срок службы). При всех условиях это сопротивление, измеренное мегаомметром, не должно быть ниже $3 \cdot 10^5$ Ом.

Карточка № 11.15 (322)
Измерение сопротивлений

В схеме, изображенной на рис. 11.20, вольтметр показывает 1 В, амперметр 0,1 А. Сопротивление амперметра 0,1 Ом. Определить сопротивление R_x .	10 Ом	128
	10,1 Ом	28
	9,9 Ом	88
Для измерения каких сопротивлений целесообразно применить схему, рассмотренную выше?	Больших	18
	Малых	78
	Значительно превышающих внутреннее сопротивление амперметра	169
Для измерения каких сопротивлений целесообразно применить рассмотренную выше схему, если вольтметр подключить непосредственно к резистору?	Малых	98
	Сопротивлений, значительно превышающих внутреннее сопротивление амперметра	58
	Сопротивлений, которые значительно меньше внутреннего сопротивления вольтметра	48
Почему шкала омметра градуируется справа налево (нуль шкалы расположен справа)?	Потому что при увеличении сопротивления уменьшается ток в цепи и стрелка измерителя движется влево	149
	Потому что это удобно при установке стрелки омметра на нуль	118
Для чего предназначен в омметре ключ, закорачивающий зажимы, к которым подключается резистор с измеряемым сопротивлением?	Для градуировки прибора	38
	Для установки стрелки на нуль перед началом измерений	68

§ 11.16. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МОСТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для точных измерений сопротивлений в лабораторных условиях широкое применение находят мосты постоянного тока. Мостовая схема изображена на рис. 11.24. Сопротивления R_1 , R_2 , R_3 , R_4 называются пл

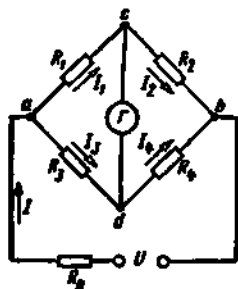


Рис. 11.24. Мостовая схема

по гальванометру: при $\varphi_c = \varphi_d$ ток в измерительной диагонали отсутствует и стрелка гальванометра стоит на нуле.

Для уравновешенного моста справедливы следующие соотношения:

$$I_1 R_1 = I_3 R_3; \quad I_2 R_2 = I_4 R_4;$$

$$I_1 = I_2; \quad I_3 = I_4.$$

Разделив почленно первое уравнение на второе, получим

$$\frac{I_1 R_1}{I_2 R_2} = \frac{I_3 R_3}{I_4 R_4}, \text{ или } \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}.$$

Таким образом, в уравновешенном мосту произведения сопротивлений противоположных плеч равны между собой:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3.$$

Если плечи R_1, R_2, R_3 образованы магазинами сопротивлений, а плечо $R_4 = R_x$ — неизвестным измеряемым сопротивлением, то, получив равновесие моста за счет изменения R_1, R_2 или R_3 и отсчитав эти сопротивления, неизвестное сопротивление подсчитывают по формуле

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1}.$$

Уравновешенный мост позволяет измерять сопротивление с большой точностью.

Карточка № 11.16 (202) Измерение сопротивлений с помощью моста постоянного тока

При каком условии потенциалы точек, к которым подсоединен гальванометр, будут одинаковыми (см. рис. 11.24)?	$I_1 R_1 = I_2 R_2$	8
	$I_1 R_1 = I_3 R_3$	202
При каком условии ток гальванометра равен нулю?	$I_1 = I_3$	191
	$I_1 = I_2$	212
	$I_1 = I_4$	224
Как изменится ток в измерительной диагонали уравновешенного моста, если напряжение питания уменьшится?	Уменьшится	246
	Увеличится	180
	Останется равным нулю	139
Дано: $R_1 = 10 R_2$. Мост оказался уравновешенным при $R_3 = 10$ Ом. Определить R_4	1 Ом	160
	10 Ом	109
	100 Ом	129
Укажите основное достоинство уравновешенного измерительного моста	Малое потребление энергии из-за отсутствия тока в измерительной диагонали	29
	Большая точность измерений	89
	Возможность градуировки измерителя непосредственно в единицах измеряемой величины	19

§ 11.17. Магнитоэлектрический осциллограф

Осциллографы предназначены для исследования быстропротекающих процессов.

Рассмотрим устройство и принцип действия магнитоэлектрического осциллографа, с помощью которого осуществляется запись процессов на фотопленку.

Конструктивно магнитоэлектрические осциллографы выполняются различным образом, но в любом из них можно выделить следующие основные узлы:

измерительный элемент (вибратор), светооптическое устройство, устройство для фотографирования и наблюдения исследуемых процессов.

Вибратор представляет собой магнитоэлектрический измеритель тока. Его работа основана на взаимодействии контура с током (шлейфа) и магнитного поля постоянного магнита.

Конструкция магнитоэлектрического вибратора показана на рис. 11.25. В воздушном зазоре подковообразного магнита 1 расположена петля 2, которая опирается на изолирующие призмы 3. Натяжение петли осуществляется пружиной 4. К средней части петли приклеено зеркальце 5.

При прохождении по петле измеряемого тока возникает вращающий момент. Противодействующий момент при малых углах закручивания петли пропорционален углу поворота зеркальца. Для получения оптимального демпфирующего момента вибратор помещают в герметический корпус и заливают жидкостью требуемой вязкости.

Для измерения угла отклонения зеркальца вибратора служит светооптическое устройство, принципиальная схема которого изображена на рис. 11.26. Свет лампы 1 через конденсор 2 и диафрагму 3 с помощью призмы 4 узким пучком отбрасывается на зеркальце вибратора 5. Отраженный от зеркальца пучок лучей призмой 8 делится на две части. Одна часть пучка с помощью зеркального барабана 9 направляется на матовый экран 10 для визуального наблюдения, другая часть фокусируется цилиндрической линзой 6 на поверхность фотопленки или фотобумаги, намотанной на барабан 7.

Вследствие значительной длины отраженного луча небольшие колебания зеркальца вибратора вызывают значительные перемещения конца луча на матовом экране и на поверхности светочувствительного материала.

Зеркальный барабан и матовый экран позволяют получить неподвижный светящийся график исследуемого периодического процесса. Кроме того, как периодический, так и непериодический процессы могут быть записаны в виде осциллограммы на светочувствительном материале.

Зеркальный барабан 9 и барабан 7 приводится от специального электродвигателя. Изменяя частоту

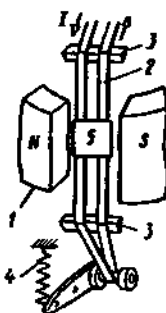


Рис. 11.25. Устройство магнитоэлектрического вибратора

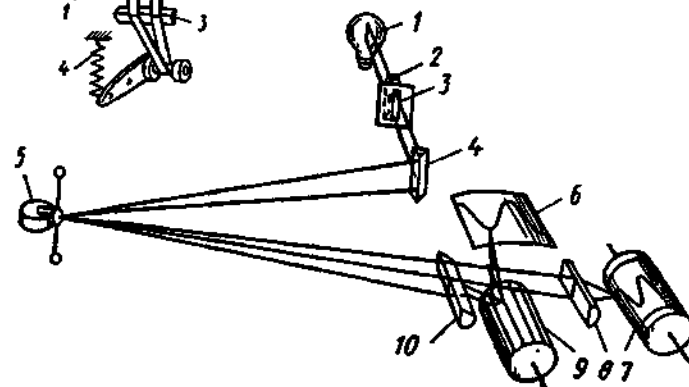


Рис. 11.26. Схема светооптического устройства осциллографа

вращения электродвигателя, можно менять масштаб времени на осциллограмме.

Карточка № 11.17 (312)
Магнитоэлектрический осциллограф

Будет ли работать осциллограф, если в измерительном элементе постоянный магнит заменить электромагнитом?	Будет	79
	Не будет	170
Как изменится отклонение светового пятна на экране, если увеличить длину светового луча от лампы до экрана?	Увеличится	99
	Не изменится	59
	Не уменьшится	49
Можно ли наблюдать на экране магнитоэлектрического осциллографа: а) непериодический процесс; б) периодический процесс?	Можно	150
	Нельзя	119
	а) Нельзя; б) можно	39

Через шлейф вибратора пропустили ток 3 А. При этом луч на экране отклонился на 3 см. Найти масштаб тока	3 А/см	69
	0,1 А/см	9
	1 А/см	203
При наблюдении синусоидального тока на экране осциллографа измерено расстояние между соседними амплитудами 2 мм. Масштаб времени — 0,01 с/мм. Рассчитать частоту тока	100 Гц	236
	50 Гц	192
	200 Гц	213

ГЛАВА 12

ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

§ 12.1. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, ИХ УСТРОЙСТВО И ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

Электрическая энергия универсальна: она удобна для дальних передач, легко распределяется по отдельным потребителям и с помощью сравнительно несложных устройств преобразуется в другие виды энергии.

Эти задачи решает энергетическая система, где осуществляются преобразование энергии топлива или падающей воды в электрическую энергию, трансформация токов и напряжений, распределение и передача электрической энергии потребителям.

Часть энергетической системы, включающую трансформаторные подстанции (ТП) и линии электропередачи (ЛЭП), называют электрической сетью. Таким образом, электрическая сеть служит для передачи электрической энергии от мест производства к местам потребления и для распределения ее по группам и отдельным потребителям.

Электрические сети классифицируют по различным признакам.

В зависимости от напряжения между проводами линии различают сети напряжением до 1000 и свыше 1000 В.

По роду тока различают электрические сети постоянного, однофазного и трехфазного токов.

В зависимости от конструктивных особенностей бывают воздушные и кабельные сети, а также сети внутри зданий и объектов.

Основные требования, предъявляемые к электрическим сетям, сводятся к экономии электротехнических материалов и снижению первоначальных затрат при гарантированной надежности электросети и высоком качестве электроэнергии. Для удовлетворения этих требований разработан ряд мероприятий, к которым относятся, в частности, применение повышенных напряжений, стальных проводов, регулирование напряжения.

В настоящее время сети трехфазного тока напряжением 220/127 В вытесняются сетями напряжением 380/220 В, сети напряжением 6 кВ — сетями 10 кВ и т. д.

При прокладке и эксплуатации электрических сетей большое внимание должно быть уделено обеспечению безопасности обслуживающего персонала.

Расчет электрических сетей производят на основании исходных данных и нормативов ГОСТа, определяющего типовые элементы сети и ее характеристики.

К исходным данным относятся напряжение источника, напряжение и мощность потребителей, вид линии (однофазная, трехфазная, воздушная, кабельная), ее конфигурация (распределение потребителей вдоль линии, схема соединений), длина проводов (расстояние между источником электроэнергии и потребителями), условия окружающей среды и требования эксплуатации (техники безопасности).

В результате электрического расчета необходимо: 1) рассчитать площади поперечного сечения всех проводов так, чтобы потери напряжения в них и температура нагрева проводов не превышали допустимых норм; выбрать тип и стандартные площади сечения проводов; 2) определить требуемые характеристики плавких вставок и выбрать соответствующие предохранители; 3) выбрать схемы заземления, вычислить число и размеры заземлителей.

При расчете электрических сетей обычно используют так называемые однолинейные схемы. Многолинейная и соответствующая ей однолинейная схемы

электрической цепи представлены на рис. 12.1, а, б.

На однолинейной схеме указывают: напряжение источника U_1 (напряжение в начале линии), напряжение потребителя U (напряжение в конце линии), мощность P и коэффициент мощности $\cos \varphi$ потреби-

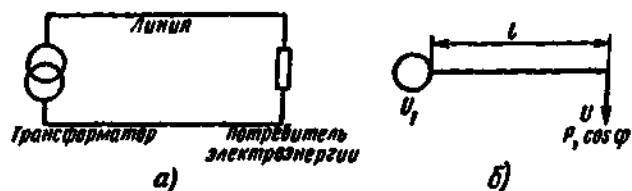


Рис. 12.1. Многолинейная (а) и однолинейная (б) схемы электрической цепи

теля, длину линии l . Число проводов в линии определяют по числу черточек, поставленных у источника. В качестве примера на рис. 12.2 изображена однолинейная схема трехпроводной линии.

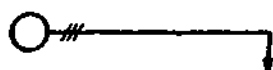


Рис. 12.2. Однолинейная схема трехпроводной линии

Карточка № 12.1 (112)

Назначение и классификация электрических сетей, их устройство и графическое изображение

Какие задачи решаются с помощью электрической сети?	Производство электроэнергии	184
	Передача электроэнергии	26
	Потребление электроэнергии	218
	Все перечисленные задачи	58
Какие сети используются для передачи электроэнергии?	Сети напряжением до 1000 В	187
	Сети напряжением выше 1000 В	91
	Оба названных вида сетей	221

Продолжение

Какие сети не используются для передачи электроэнергии?	Сети постоянного тока	212
	Сети однофазного тока	192
	Сети трехфазного тока	20
	Сети многофазного тока	227
Какие сети используются для передачи электроэнергии?	Воздушные сети	52
	Кабельные сети	199
	Внутренние сети объектов	87
	Все перечисленные сети	233
Какая сеть требует меньшего расхода металла на провода при равной длине и одинаковой передаваемой мощности?	Сеть напряжением 220/127 В	116
	Сеть напряжением 380/220 В	205
	Расход металлов на провода в названных выше сетях практически одинаков	7

§ 12.2. Провода, кабели, электроизоляционные материалы в сетях напряжением до 1000 В

Для прокладки воздушных линий используют различные виды голых проводов.

Стальные однопроволочные провода изготовляют диаметром не более 5 мм. В очень редких случаях применяют медные однопроволочные провода диаметром 5 мм (в районах повышенной влажности, химически загрязненной атмосферы).

Наибольшее распространение находят многопроволочные провода, которые имеют высокую прочность и гибкость. Их изготовляют из одинаковых проволок, число которых может достигать 37. Диаметр проволок и их число подбирают таким образом, чтобы обеспечить наибольшую плотность упаковки проволок в проводе. Обычно 6, 11, 18 проволок располагают вокруг одной центральной и слабо закручивают. В качестве

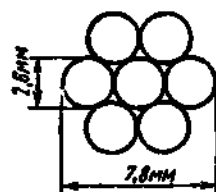


Рис. 12.3. Поперечное сечение провода ПС-35

примера на рис. 12.3 показано поперечное сечение провода ПС-35.

Многопроволочные провода бывают стальными, алюминиевыми, сталеалюминиевыми и из биметаллических проволок. Для предохранения от ржавчины стальные провода делают из оцинкованной проволоки, иногда применяют нержавеющую сталь. В стале-

алеалюминиевых проводах часть проволок — стальная, часть — алюминиевая. Этим обеспечивается механическая прочность при повышенной электропроводности. Биметаллические проволоки изготовляют электролитическим способом: стальную жилу покрывают слоем меди или алюминия.

Рассмотрим маркировку голых проводов для воздушных линий.

Медные провода обозначают буквой *М*, алюминиевые — *А*, сталеалюминиевые — буквами *АС*, стальные — *ПС*.

Однопроволочные провода обозначают буквой *О*. Цифры, следующие за буквами, указывают диаметр провода в миллиметрах (у однопроволочных проводов) или площадь поперечного сечения в миллиметрах в квадрате (у многопроволочных проводов). Например, ПСО5 — провод стальной однопроволочный диаметром 5 мм; ПС35 — провод стальной многопроволочный площадью поперечного сечения 35 мм²; А25 — провод алюминиевый многопроволочный площадью поперечного сечения 25 мм² и т. д. Допустимые токовые нагрузки проводов при различных условиях приводятся в справочниках. Например, вне помещений при температуре нагрева провода 70° С и температуре окружающей среды 25° С для провода А16 допускается токовая нагрузка 105 А, для провода ПСО4—30 А и т. д.

Для сравнительной характеристики голых проводов различных марок приведем некоторые выборочные данные:

Марка провода	М25	А25	АС25
Удельное активное сопротивление, Ом/км	0,74	1,28	1,38
Удельная масса провода, кг/км	221	68	92

Отсюда следует, что при равных площадях попе-

речного сечения стальной и сталеалюминиевый провода имеют близкие по значению активные сопротивления. Активное сопротивление медного провода примерно в 1,5 раза меньше, однако медь является дорогостоящим материалом и для проводов электрических сетей применяется редко.

Для электропроводки внутри помещений, как правило, используют изолированные провода из меди или алюминия. Изолированные однопроволочные провода имеют большую жесткость и площадь поперечного сечения не выше 10 мм².

Многопроволочные провода изготовляют из луженых медных или алюминиевых жил. Они удобны при монтаже и эксплуатации.

Для прокладки скрытых безопорных линий, а также для канализации электроэнергии, подводимой к подвижным объектам, служат электрические кабели. В кабеле провода двух- или трехфазной линии заключены в прочную герметическую многослойную оболочку, что повышает надежность линий электропередачи. Кабели можно прокладывать под землей и под водой. Подземные кабели — основное средство канализации электроэнергии в крупных городах. Недостаток кабельных линий — их высокая стоимость.

В качестве электроизоляционных материалов используют вулканизированную резину, хлопчатобумажную пряжу, пропитанную специальными составами, промасленную бумагу. В последнее время широкое распространение получили поливинилхлоридные оболочки.

Карточка № 12.2 (270)
Провода, кабели, электроизоляционные материалы
в сетях напряжением до 1000 В

В каких проводах высокая прочность совмещается с высокой электропроводностью?	В стальных	239
	В алюминиевых	45
	В сталеалюминиевых	121
Укажите площадь поперечного сечения: а) однопроволочного стального провода ПСО4; б) многопроволочного сталеалюминиевого провода АС50	а) 4 мм ² ; б) 50 мм ²	82
	а) 4 мм ² ; б) 50 мм ²	154
	а) 4 мм ² ; б) 6,25 см ²	111
	а) 4 мм ² ; б) 6,25 см ²	127

Продолжение

Какой из проводов прочнее, А25 или АС25?	А25	1
	АС25	158
	Площадь поперечного сечения и прочность этих проводов одинаковы	41
Какую линию целесообразно использовать для подвода энергии к электрокомбайну?	Воздушную линию из голых проводов	134
	Линию из изолированных проводов	75
	Кабельную линию	165
Укажите материал, который не используется для изоляции проводов и кабелей	Хлопчатобумажная пряжа	106
	Вулканизированная резина	141
	Поливинилхлорид	100
	Слюда	172

§ 12.3. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В Советском Союзе в основном закончено создание Единой энергетической системы (ЕЭС СССР).

Источниками электрической энергии ЕЭС служат тепловые (ТЭС), гидравлические (ГЭС) и атомные (АЭС) электростанции, имеющие общий режим производства энергии. Линии электропередачи, трансформаторные и распределительные устройства обеспечивают совместную работу электростанций и распределение энергии между потребителями.

ЕЭС обладает рядом преимуществ по сравнению с региональными энергосистемами: 1) максимальной надежностью электроснабжения; 2) возможностью маневрирования мощностью; 3) высоким качеством энергии (прежде всего стабильностью напряжения и частоты тока); 4) возможностью максимальной концентрации мощности источников энергии (при этом существенно снижаются затраты на строительство и

эксплуатацию электростанций, а также расход топлива на 1 кВт·ч).

Около $\frac{2}{3}$ всей электроэнергии ЕЭС потребляется промышленностью. Схема электроснабжения промышленных предприятий строится по ступенчатому принципу, число ступеней зависит от мощности предприятия и схемы размещения отдельных потребителей электроэнергии. На первой ступени напряжение энергосистемы подводится к главной подстанции, где оно от 10—220 кВ снижается до 10—6 кВ. Сети второй ступени подводят это напряжение к цеховым трансформаторным подстанциям, где оно понижается до напряжения потребителей. Третью ступень составляют сети, распределяющие напряжение цеховой подстанции между отдельными потребителями.

На крупных предприятиях с большим потреблением электроэнергии (химические, металлургические заводы) питание потребителей может осуществляться при напряжении 660 В. Большинство предприятий использует трехфазные сети 380/220 В. На некоторых (старых) предприятиях применяют систему 220/127 В.

В помещениях с повышенной опасностью допустимое напряжение питания потребителей не должно превышать 36 В, в особо опасных условиях (котлы, металлические резервуары) — 12 В.

По требуемой надежности питания потребители электрической энергии делят на три категории. К первой категории относятся такие потребители, перерыв в снабжении которых электроэнергией связан с опасностью для людей или влечет за собой большой материальный ущерб (доменные цехи, котельные производственного пара, подъемные и вентиляционные установки шахт, аварийное освещение и др.). Они должны работать непрерывно. Для потребителей второй категории (самых многочисленных) допускаются перерывы в питании на ограниченное время. К потребителям третьей категории относятся вспомогательные цехи и другие объекты, для которых допускается перерыв в электроснабжении до одних суток.

Для повышения надежности энергоснабжения предусматривается питание потребителей от двух независимых сетей и автоматически включаемого резервного источника электроэнергии. Различают «горячий» и «холодный» резервные источники. «Горячий» резервный источник обеспечивает немедленное аварийное

питание, его используют для безаварийной остановки потребителя.

Дальнейшее улучшение систем электроснабжения промышленных предприятий связано с повышением напряжения питания (с 220 до 380 В, с 6 до 10 кВ и т. д.) при максимально возможном приближении высокого напряжения к потребителям (глубокий ввод) и уменьшении числа ступеней трансформации.

Карточка № 12.3 (220)
Электроснабжение промышленных предприятий

Что составляет основу ЕЭС СССР?	ТЭС	35
	ГЭС	148
	АЭС	69
	ЛЭП	178
Какое свойство не относится к достоинствам ЕЭС?	Надежность питания потребителей	94
	Возможность менять направление потоков энергии в течение суток	13
	Постоянство напряжения и частоты	63
	Возможность получения высоких и сверхвысоких напряжений	243
Какое напряжение допустимо в особо опасных условиях?	660 В	29
	36 В	185
	12 В	27
	380/220 В	219
К какой категории потребителей следует отнести компрессорные установки шахт?	К первой категории	59
	Ко второй категории	188
	К третьей категории	92
Какое электропитание обеспечивает безаварийную остановку агрегата?	От резервного источника, подготовленного к запуску	222
	От резервного источника, работающего вхолостую	213

§ 12.4. ПАДЕНИЕ И ПОТЕРЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В проводах возникает падение напряжения, пропорциональное току и сопротивлению линии. Напряжение на зажимах потребителя U меньше напряжения на зажимах источника U_1 . Разность $\Delta U = U_1 - U$ называют потерей напряжения.

Потерю напряжения часто выражают в процентах от номинального значения напряжения потребителя:

$$\frac{\Delta U}{U} \cdot 100.$$

При заданном напряжении источника от потери напряжения зависит напряжение на зажимах потребителя, поэтому значение потери напряжения строго регламентируется. В линиях, по которым осуществляется питание силовой (электродвигатели, гальванические ванны и др.) нагрузки, допускается потеря напряжения, не превышающая 6% от номинального напряжения потребителя. В осветительных сетях допускается потеря напряжения не более 2,5%. В зависимости от конкретных условий могут быть установлены и другие предельные значения потери напряжения.

Несоблюдение норм потери напряжения приводит к нарушению работы потребителей, уменьшению пусковых и вращающих моментов двигателей, изменению светового потока осветительных установок. Например, при уменьшении напряжения на 10% световой поток ламп накаливания уменьшается на $1/3$. Незначительное превышение напряжения относительно номинального приводит к резкому сокращению срока службы ламп накаливания.

Нетрудно видеть, что в цепях постоянного тока понятия падения и потери напряжения совпадают: $\Delta U = IR_{\text{пр}}$, где I — ток в линии; $R_{\text{пр}}$ — сопротивление провода линии.

Несколько сложнее выглядят эти зависимости в цепях переменного тока.

Рассмотрим векторную диаграмму токов и напряжений, изображенную на рис. 12.4. Проходящий по линии ток нагрузки I сдвинут по фазе относительно напряжения U на угол φ , определяемый коэффициентом мощности нагрузки. Падение напряжения на активном сопротивлении линии IR совпадает по фазе

с током I , а падение напряжения на реактивном сопротивлении линии I_X опережает по фазе ток I на 90° (считаем, что емкостное сопротивление линии меньше ее индуктивного сопротивления). В этом случае падением напряжения считают векторную разность напряжений в начале и конце линии: $\Delta U = \dot{U}_1 - \dot{U} = \dot{I}Z$, где Z — комплекс полного сопротивления линии.

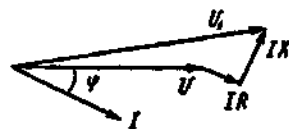


Рис. 12.4. Связь векторов напряжений на входе и выходе линии

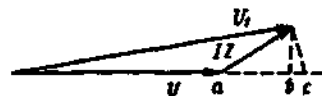


Рис. 12.5. Приближенное выражение потери напряжения отрезком ab

Для потребителя важно значение напряжения, поэтому целесообразно ввести понятие потери напряжения ΔU как разности действующих значений напряжений U_1 и U .

Потерю напряжения ΔU можно выразить через модуль вектора $\Delta \dot{U}$. В практических расчетах принимают потерю напряжения (отрезок ac на рис. 12.5) равной проекции вектора падения напряжения $\Delta \dot{U} = \dot{I}Z$ на вектор $\dot{U}$ (отрезок ab).

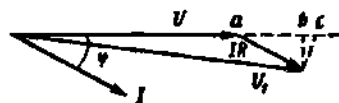


Рис. 12.6. Вид векторной диаграммы, если пренебречь реактивным сопротивлением линии

При расчете сетей напряжением до 1000 В считают, что реактивное сопротивление линии мало по сравнению с ее активным сопротивлением и им можно пренебречь. Векторная диаграмма токов и напряжений для этого случая представлена на рис. 12.6. Полагая $ab \approx ac$, находим $\Delta U \approx ab = IR \cos \varphi$, где ΔU — потеря напряжения в линии; I — ток нагрузки, проходящий в проводах линии; $R = R_{np}$ — активное сопротивление проводов линии; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности потребителя электроэнергии.

Карточка № 12.4 (183)
Падение и потеря напряжения в линиях электроснабжения

Напряжение на зажимах источника электроэнергии в сети постоянного тока 26 В. Напряжение на зажимах потребителя 25 В. Определить потерю напряжения в процентах	1%	193
	2%	21
	4%	228
Сопротивление одного провода двухпроводной линии постоянного тока 0,05 Ом. Через нагрузку течет ток 10 А. Рассчитать потерю напряжения	0,5 В	53
	1 В	200
	2 В	88
	Для решения задачи недостаточно данных	234
Напряжение источника сети переменного тока 230 В, напряжение на зажимах потребителя 220 В. Определить: а) потерю напряжения; б) падение напряжения	а) 10 В; б) определить нельзя	117
	а) Определить нельзя; б) 10 В	206
	а) 10 В; б) 10 В	8
Активное сопротивление одного провода двухпроводной линии переменного тока 0,05 Ом. Реактивным сопротивлением пренебречь. Через нагрузку течет ток 10 А. Найти потерю напряжения	0,5 В	240
	1 В	46
	2 В	122
	Для решения задачи недостаточно данных	83
В условиях предыдущей задачи сдвиг фаз между током и напряжением равен 60° . Определить потерю напряжения	0,5 В	155
	1 В	112
	2 В	128
	Для решения задачи недостаточно данных	2

§ 12.5. РАСЧЕТ ПРОВОДОВ ПО ДОПУСТИМОЙ ПОТЕРЕ НАПЯЖЕНИЯ В ЛИНИЯХ ПОСТОЯННОГО, ОДНОФАЗНОГО И ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Схема цепи постоянного тока изображена на рис. 12.7. Выразим потерю напряжения через ток в линии и сопротивление проводов:

$$\Delta U = U_1 - U = IR_{np}.$$

Сопротивление проводов

$$R_{\text{пр}} = 2l / (\delta S),$$

где l — длина линии, м; S — площадь поперечного сечения провода, мм²; δ — удельная электропроводность материала провода, м/(Ом·мм²).

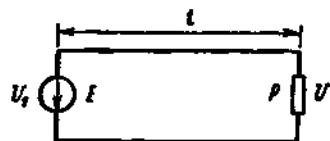


Рис. 12.7. Схема сети постоянного тока

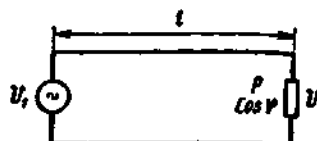


Рис. 12.8. Схема сети однофазного переменного тока

Для меди $\delta_m = 53$ м/(Ом·мм²), для алюминия $\delta_a = 32$ м/(Ом·мм²). Поскольку линия двухпроводная, то в формулу введен коэффициент 2.

Таким образом,

$$\Delta U = I R_{\text{пр}} = 2lI / (\delta S),$$

откуда $S = 2lI / (\delta \Delta U)$.

Для удобства расчетов последнюю формулу преобразуют, для чего числитель и знаменатель умножают на напряжение U :

$$S = \frac{2lI U}{\delta \Delta U U} = \frac{2lP}{\delta \Delta U U},$$

Здесь потеря напряжения ΔU выражена в вольтах. Кроме того, в формулу вводят процентную потерю напряжения. В результате получают

$$S = \frac{200lP}{\delta \Delta U U^2},$$

где S — в мм²; l — в м; P — в Вт, U — в В; ΔU — в %.

На рис. 12.8 изображена электрическая цепь однофазного тока. Реактивное сопротивление линии не учитываем. Согласно § 12.4, $\Delta U = I R_{\text{пр}} \cos \varphi$.

Введем процентную потерю напряжения:

$$\frac{\Delta U U}{100} = \frac{I R_{\text{пр}} \cos \varphi}{100}.$$

Отсюда

$$S = \frac{2l \cos \varphi \cdot 100}{\delta \Delta U U},$$

где ΔU — в %.

Умножив числитель и знаменатель на U , получим

$$S = \frac{200lU \cos \varphi}{\delta \Delta U U^2} = \frac{200lP}{\delta \Delta U U^2},$$

где $P = UI \cos \varphi$ — активная мощность потребителя.

На рис. 12.9 изображена трехфазная цепь переменного тока с симметричной нагрузкой, для которой $\Delta U_{\phi} = U_{\phi 1} - U_{\phi} = I R_1 \cos \varphi$, где I — линейный ток; $R_1 = 1 / (\delta S)$ — сопротивление одного провода трехпроводной линии.

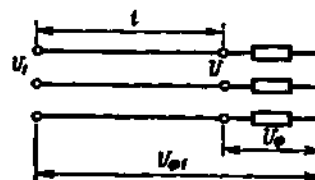


Рис. 12.9. Схема трехфазной сети переменного тока

В справочных таблицах обычно указывается потеря линейного напряжения, которая в $\sqrt{3}$ раз больше потерн фазного напряжения. Таким образом, $\Delta U = \sqrt{3} \Delta U_{\phi} = \sqrt{3} I R_1 \cos \varphi = \sqrt{3} I \frac{l}{\delta S} \cos \varphi$. Следовательно,

$$S = \frac{100l \sqrt{3} I \cos \varphi}{\Delta U \delta U}, \text{ где } \Delta U \text{ — в \%}.$$

Умножив числитель и знаменатель последнего выражения на линейное напряжение U , окончательно найдем $S = \frac{100lP}{\delta \Delta U U^2}$, где $P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$ — активная мощность, потребляемая симметричной трехфазной нагрузкой.

Карточка № 12.5 (259)

Расчет проводов по допустимой потере напряжения в линиях постоянного, однофазного и трехфазного тока

Определить площадь сечения медных проводов линии постоянного тока напряжением 110 В. Длина линии 53 м. Передаваемая мощность 12,1 кВт. Допускается потеря напряжения 5%	10 мм ²	159
	20 мм ²	42
	40 мм ²	135
	400 мм ²	76
Рассчитать площадь сечения алюминиевых проводов однофазной линии напряжением 220 В. Длина линии 320 м. По линии передается активная мощность 2,42 кВт. Допускается потеря напряжения 2,5%	10 мм ²	166
	20 мм ²	107
	40 мм ²	142
	400 мм ²	101
В условиях предыдущей задачи площадь сечения проводов выбрана равной 50 мм ² . Какой будет потеря напряжения в линии?	2%	173
	20%	36
	25%	149
	0,2%	70

Продолжение

Определить площадь сечения алюминиевых проводов трехфазной линии напряжением 380 В. Длина линии 144,4 м. Линия питает асинхронный двигатель, потребляющий активную мощность 16 кВт. Допускается потеря напряжения 5%	10 мм ²	179
	20 мм ²	96
	40 мм ²	14
	100 мм ²	64
Рассчитать площадь сечения проводов в условиях предыдущей задачи, если допускаемая потеря напряжения уменьшилась в 2 раза	10 мм ²	244
	20 мм ²	30
	40 мм ²	186
	100 мм ²	28

§ 12.6. СОПОСТАВЛЕНИЕ ДВУХПРОВОДНОЙ ОДНОФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ С ТРЕХФАЗНЫМИ СИСТЕМАМИ ПО РАСХОДУ ЦВЕТНОГО МЕТАЛЛА

Сравним две линии, изображенные на рис. 12.10, по расходу цветного металла, если длины линий, напряжения источников питания, напряжения, мощности и коэффициенты мощности потребителей одинаковы.

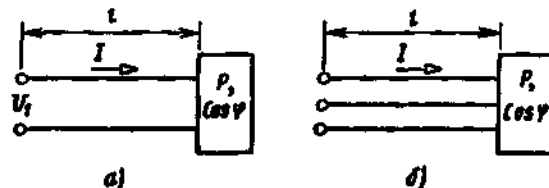


Рис. 12.10. Схема однофазной (а) и трехфазной (б) линий переменного тока

Для двухпроводной линии переменного тока

$$S_{дв} = \frac{200IP}{\delta \Delta U U^2}$$

Для трехфазной трехпроводной линии

$$S_{тр} = \frac{100IP}{\delta \Delta U U^2}$$

Сравнив эти выражения, найдем, что площадь сечения каждого провода трехпроводной линии в два раза меньше площади сечения провода двухпроводной линии:

$$S_{тр} = S_{дв}/2$$

Обозначим массу одного провода трехпроводной линии через q . Тогда масса одного провода двухпроводной линии равна $2q$. Масса трех проводов трехпроводной линии равна $3q$, а масса двух проводов двухпроводной линии — $2 \cdot 2q = 4q$. Следовательно, масса трехпроводной линии составляет 0,75 от массы двухпроводной линии; экономия металла составляет 25%.

Условия работы потребителей в сетях, изображенных на рис. 12.10, будут одинаковы только в том случае, когда трехфазная нагрузка соединена треугольником. Действительно, только при этом потребители, включенные в однофазную сеть, будут находиться под тем же напряжением, что и потребители, включенные в трехфазную сеть.

Если потребители в трехфазной сети соединить звездой, то они окажутся под напряжением, в $\sqrt{3}$ меньшим. Чтобы напряжение довести до номинального, требуется в $\sqrt{3}$ раз увеличить напряжение на передающем (и на приемном) конце трехпроводной линии (рис. 12.11). При этом площадь сечения провода

$$S'_{тр} = \frac{100IP}{\delta \Delta U (\sqrt{3}U)^2} = \frac{1}{3} \frac{100IP}{\delta \Delta U U^2} = \frac{1}{3} S_{тр}$$

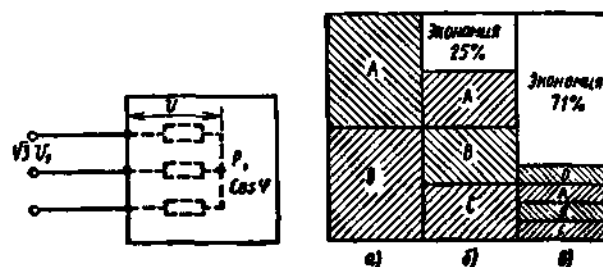


Рис. 12.11. Соединение фаз нагрузки звездой

Рис. 12.12. Диаграмма, иллюстрирующая расход металла:
а — двухпроводная линия;
б — трехфазная трехпроводная;
в — трехфазная четырехпроводная линия

Следовательно, площадь сечения и масса проводов при соединении нагрузки звездой уменьшаются в три раза.

Если при соединении треугольником масса трехпроводной линии составляет $3/4$ от массы двухпровод-

ной, то при соединении звездой он будет равен $1/4$, а экономия в массе составит 75%.

Чтобы обеспечить постоянство и симметрию напряжений на фазах звезды при несимметричной нагрузке, необходим нулевой провод. Площадь сечения нулевого провода берут равной половине площади сечения линейного провода. Можно подсчитать, что при наличии такого провода экономия в массе составит 71%.

Все сказанное иллюстрируется диаграммой, представленной на рис. 12.12. Столь значительная экономия в весе при использовании четырехпроводной системы объясняется тем, что в этой системе передача энергии происходит при повышенном напряжении (например, при линейном напряжении 380 В), а потребление — при заданном напряжении (например, 220 В). Причем такое соотношение напряжений достигается без использования трансформатора, за счет свойств самой трехфазной системы. Конечно, повышенное напряжение в линии ужесточает требования к изоляции и эксплуатационной безопасности.

Карточка № 12.6 (195)
Сопоставление двухпроводной однофазной системы передачи энергии с трехфазными системами по расходу цветного металла

При равных условиях мощность P передается по однофазной и трехфазной трехпроводной линиям. Масса одного провода двухпроводной линии 100 кг. Чему равна масса трехпроводной линии?	150 кг	220
	200 кг	60
	300 кг	189
При прочих равных условиях напряжение на зажимах потребителя увеличено в 2 раза. Как изменилась масса линии электропередачи?	Увеличилась в 2 раза	93
	Не изменилась	223
	Уменьшилась в 2 раза	214
	Уменьшилась в 4 раза	194
Три одинаковых потребителя электроэнергии в первом случае соединены треугольником, во втором — звездой. Все другие условия одинаковы. Что можно сказать о массе линий электропередачи?	В первом случае масса в 3 раза больше, чем во втором	22
	Во втором случае масса в 3 раза больше, чем в первом	229

Продолжение

	Массы линий электропередачи одинаковы	54
	Во втором случае масса в 3 раза меньше, чем в первом	201
При прочих равных условиях три одинаковых потребителя в первом случае соединены параллельно и подключены к двухпроводной линии, во втором соединены звездой и подключены к трехпроводной линии. Что можно сказать о массе линий?	В первом случае масса в 3 раза больше, чем во втором	89
	Во втором случае масса в 3 раза больше, чем в первом	235
	В первом случае масса в 4 раза больше, чем во втором	118
	Массы линий одинаковы	207
При равных прочих условиях мощность P передается по однофазной и трехфазной четырехпроводной линиям. Масса одного провода двухпроводной линии 100 кг. Чему равна масса четырехпроводной линии?	71 кг	9
	58 кг	241
	29 кг	47
	142 кг	23

§ 12.7. РАСЧЕТ ПРОВОДОВ ПО ДОПУСТИМОМУ НАГРЕВУ

Тепловой режим провода определяется уравнением теплового равновесия

$$I^2 R t = c F (\theta - \theta_0) t,$$

где F — площадь поверхности провода; c — коэффициент теплоотдачи (количество теплоты, отводимой в 1 с с 1 м^2 поверхности при разности температур 1°C поверхности провода и окружающей среды); θ — температура провода; θ_0 — температура окружающей среды.

Левая часть этого уравнения выражает количество теплоты, выделяемой током I за время t в проводе, сопротивление которого равно R (закон Джоуля — Ленца). Правая часть уравнения определяет количество теплоты, отдаваемой проводом в окружающую среду за время t . Очевидно, что в установившемся

режиме количество выделяющейся теплоты равно количеству теплоты, переходящей в окружающую среду.

Произведя в исходном уравнении подстановки

$$R = l/(\delta S); F = \pi d l; d = \sqrt{4S/\pi},$$

получим

$$I^2 \frac{l}{\delta S} t = c \pi \sqrt{4S/\pi} l (\theta - \theta_0) t,$$

где l — длина провода; S — площадь поперечного сечения провода; δ — удельная проводимость провода.

Последнее равенство преобразуют к виду

$$I = k S^{3/4} \sqrt{\delta(\theta - \theta_0)},$$

где $k = \sqrt{2c/\pi}$.

Температура поверхности голого провода не должна превышать 70°C , а провода с резиновой или поливинилхлоридной изоляцией — 65°C . За расчетное значение температуры окружающей среды принимают максимальную среднемесячную температуру, которая колеблется от 15°C в северных районах до 35°C в южных.

Подставив в последнюю формулу площадь поперечного сечения провода, находят максимально допустимый ток, соответствующий заданным условиям. Так как формула довольно громоздка, то обычно пользуются заранее составленными таблицами. Если выбрана площадь сечения провода, то таблица позволяет определить максимально допустимый ток; если известен ток, проходящий по проводу, то таблица позволяет найти площадь сечения провода.

Площадь поперечного сечения провода S рассчитывается сначала по допустимой потере напряжения, а затем по допустимому нагреву. Из полученных значений S берут большее и округляют его до ближайшего стандартного значения, определяемого ГОСТом.

Карточка № 12.7 (177)
Расчет проводов по допустимому нагреву

При прочих равных условиях диаметр провода увеличился в 2 раза. Как изменились: а) левая часть; б) правая часть уравнения теплового равновесия провода?	а) Уменьшилась в 2 раза;	84
	б) увеличилась в 2 раза	
	а) Уменьшилась в 4 раза;	156
	б) увеличилась в 2 раза	

Продолжение

	а) Увеличилась в 2 раза;	113
	б) увеличилась в 2 раза	
При прочих неизменных условиях площадь поперечного сечения провода увеличилась в 4 раза. Как изменилась электропроводность провода?	Увеличилась в 2 раза	129
	Увеличилась в 4 раза	3
	Уменьшилась в 2 раза	160
Как должна измениться температура поверхности провода, чтобы в условиях предыдущей задачи не нарушилось тепловое равновесие?	Разность $\theta - \theta_0$ должна увеличиться в 4 раза	43
	Эта разность должна уменьшиться в 8 раз	136
	Эта разность должна уменьшиться в 2 раза	77
Как изменится температура провода, нагреваемого током, если при прочих равных условиях увеличить длину провода?	Увеличится	167
	Не изменится	108
	Уменьшится	143
Площадь поперечного сечения провода увеличилась в 2 раза. Как должен измениться проходящий по проводу ток, чтобы при прочих равных условиях температура поверхности провода не изменилась?	Увеличиться в 2 раза	102
	Увеличиться в $\sqrt[4]{8}$ раз	174
	Увеличиться в 4 раза	37
	Уменьшится	150

§ 12.8. ПЛАВКИЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

Предохранители предназначены для защиты электрических сетей от перегрузок и коротких замыканий. Наибольшее распространение получили плавкие предохранители. Они дешевы и просты по устройству.

Плавкий предохранитель состоит из двух основных частей: корпуса (патрона) из электроизоляционного материала и плавкой вставки. Концы плавкой вставки соединены с клеммами, с помощью которых предохранитель включается в линию последовательно с защищаемым потребителем или участком цепи. Плавкая вставка выбирается с таким расчетом, чтобы она плавилась раньше, чем температура проводов линии достигнет опасного уровня или перегруженный потребитель выйдет из строя.

По конструктивным особенностям различают пластинчатые, патронные, трубчатые и пробочные предохранители. Сила тока, на который рассчитана плавкая вставка, указывается на ее корпусе. Оговаривается также максимально допустимое напряжение, при котором может использоваться предохранитель.

Основной характеристикой плавкой вставки является зависимость времени ее перегорания от тока (рис. 12.13). Эта кривая снимается экспериментально:

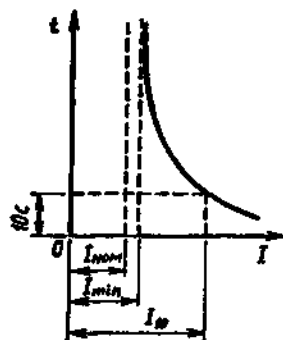


Рис. 12.13. Зависимость времени перегорания плавкой вставки от силы тока

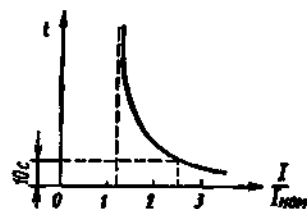


Рис. 12.14. Зависимость времени перегорания плавкой вставки от силы тока в относительных единицах

берется партия одинаковых предохранителей, которые последовательно пережигаются при разных токах. Замеряются время, по истечении которого вставка перегорает, и ток, проходящий через вставку. Каждому току соответствует определенное время перегорания вставки. По этим данным и строится временная характеристика.

На этой кривой особо выделяются следующие токи, которые используются для выбора плавких вставок: I_{min} — наименьший из токов, расплавляющих вставку [при этом токе вставка еще плавится, но в течение неопределенно продолжительного времени (1—2 ч); при меньших токах вставка уже не расплавляется]; I_{10} — ток, при котором плавление вставки и отключение сети происходит через 10 с после установления тока; I_{nom} — номинальный ток вставки, т. е. ток, при котором вставка длительно работает, не нагреваясь

выше допустимой температуры; токи связаны простым соотношением $I_{nom} = I_{10}/2,5$.

При графическом изображении зависимости времени перегорания вставки от тока по оси абсцисс иногда откладывают не абсолютное значение тока, а отношение тока к его номинальному значению (рис. 12.14).

Номинальный ток плавкой вставки можно определить и по следующей эмпирической формуле:

$$I_{nom} = k\sqrt{d^3}/2,5,$$

где d — диаметр проволоки, мм; k — коэффициент, зависящий от материала плавкой вставки (для меди $k=80$). Минимальный ток определяют из приближенного соотношения $I_{min} \approx (1,3 \div 1,5)I_{nom}$.

Карточка № 12.8 (310)
Плавкие предохранители

Температура плавления меди выше температуры плавления алюминия. Можно ли предохранитель с медной плавкой вставкой использовать для защиты линий из алюминиевых проводов?	Можно	71
	Нельзя	180
Может ли временная характеристика тока пересечь: а) ось токов (ось абсцисс); б) ось времени (ось ординат)?	Может	96
	а) Может; б) не может	15
	Не может	65
	а) Не может; б) может	245
Минимальный ток плавкой вставки $I_{min} = 10$ А. Расплавится ли вставка при токах: а) 9 А; б) 11 А?	Да	31
	а) Нет; б) расплавится	61
	а) Расплавится; б) нет	190
	Нет	224
При силе тока 25 А вставка расплавляется через 10 с. Определить номинальный ток плавкой вставки	4 А	215
	6 А	195
	10 А	23
	15 А	230

Найти номинальный ток медной плавкой вставки диаметром 1 мм	19 А	55
	26 А	202
	32 А	90
	54 А	236

§ 12.9. ВЫБОР ПЛАВКИХ ВСТАВОК

На выбор плавких вставок существенное влияние оказывает характер нагрузки. Если при включении нагрузки не возникает токов, превышающих рабочий ток потребителей I_p , что характерно для осветительных и нагревательных приборов, то вставка выбирается из условия $I_{ном} \geq I_p$. При этом берется вставка с ближайшим к рабочему току стандартным значением номинального тока. Стандартные значения номинальных токов задаются ГОСТом.

При выборе вставки для защиты двигателя необходимо учитывать пусковой ток: $I_{ном} > I_{пуск}/\alpha$. При выполнении этого условия двигатель не будет отключаться от сети при пуске. Коэффициент α зависит от длительности пуска. Если длительность пуска не превышает 10 с, то $\alpha = 2,5$, если превышает это значение, то $\alpha = 1,8$.

Если одним предохранителем защищается группа потребителей, то следует учитывать коэффициент одновременности их работы.

Для селективной защиты различных участков сети необходимо, чтобы номинальные токи последовательно включенных вставок отличались на одну-две ступени, увеличиваясь по мере приближения к источнику питания. Нужно следить за тем, чтобы номинальный ток выбранной плавкой вставки был меньше тока провода, допустимого из условий нагрева. В противном случае при перегрузках провод будет перегреваться, а плавкая вставка его не отключит.

Отметим также особенности установки предохранителей в четырехпроводных сетях трехфазного тока. В таких сетях установка предохранителей для защиты от перегрузок и коротких замыканий допускается только в трех линейных проводах.

Установка предохранителей в нулевом проводе запрещается, так как его отключение само приводит к

аварийному режиму работы четырехпроводной сети. При отключении нулевого провода нарушаются симметрия фазных напряжений и нормальная работа всех потребителей, включенных между линейным и нулевым проводом. В частности, при осветительной нагрузке в одной или двух фазах лампы будут гореть вполнакала, в других окажутся под повышенным напряжением и быстро перегорят.

Карточка № 12.9 (221)
Выбор плавких вставок

Участок осветительной сети потребляет ток 12 А. Найти номинальный ток плавкой вставки предохранителя, защищающего этот участок	6 А	119
	10 А	208
	15 А	10
	25 А	242
Определить номинальный ток плавкой вставки, которую следует выбрать для защиты двигателя, рабочий ток которого 6 А, пусковой ток 30 А. Длительность пуска 5 с	6 А	48
	10 А	124
	15 А	85
	35 А	157
Укажите номинальный ток плавкой вставки, которую следует выбрать для защиты двигателя, у которого рабочий ток 30 А, а пусковой ток 180 А. Длительность пуска 15 с	60 А	114
	80 А	130
	100 А	4
	200 А	161
Двигатель, рассмотренный во втором вопросе, включен параллельно со световой нагрузкой, равной 20 А. Определить номинальный ток плавкой вставки, которую следует выбрать для защиты этой групповой нагрузки	6 А	44
	25 А	137
	35 А	78
	60 А	168
Двигатель, рассмотренный в третьем вопросе, включен параллельно со световой нагрузкой, равной 20 А. Укажите номинальный ток плавкой вставки, которую следует выбрать для защиты этой групповой нагрузки	60 А	109
	80 А	144
	100 А	103

§12.10. ВЫБОР ПЛОЩАДИ СЕЧЕНИЯ ПРОВОДОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСТАНОВЛЕННЫХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

В коротких линиях, где потеря напряжения невелика, иногда целесообразно начинать расчет с выбора предохранителей по формулам, рассмотренным в предыдущем параграфе.

Площадь сечения проводов определяется по рабочим токам потребителей или номинальным токам выбранных плавких вставок следующим образом.

1. Сеть защищена только от коротких замыканий. Площадь сечения проводов выбирают из условия $I_{\text{доп}} \geq I_p$, где $I_{\text{доп}}$ — максимально допустимый по условиям нагрева ток выбранного провода (берут из справочных таблиц); I_p — рабочий ток потребителей. Если это условие выполнено, то провод не будет перегреваться при нормальной работе потребителей.

Площадь сечения провода уточняют из условия $I_{\text{ном}} \leq 3I_{\text{доп}}$. Выполнение этого условия гарантирует в случае короткого замыкания перегорание плавкой вставки раньше, чем провод нагреется до опасной температуры. Если это условие не выполняется, то берут провод с большей площадью сечения и с большим допустимым током.

2. Сеть защищена от перегрузок и коротких замыканий. Такая защита требуется для осветительных сетей в жилых и промышленных помещениях, а также для защиты электросетей на взрывоопасных объектах.

Площадь сечения провода выбирают из условия $I_{\text{доп}} \geq 1,25I_{\text{ном}}$. В этом случае надежное отключение линии будет происходить при токах, примерно на 30% превышающих допустимый ток проводов. Действительно, наименьший из токов, которые плавят вставку, связан с номинальным током соотношением $I_{\text{пл}} = 1,5I_{\text{ном}}$; $I_{\text{ном}} = I_{\text{пл}}/1,5$. Следовательно, $I_{\text{доп}} \geq \frac{1,25}{1,5}I_{\text{пл}} = 0,83I_{\text{пл}}$.

Если через провод будет проходить ток I , примерно на 30% превышающий допустимый, то вставка заведомо расплавится и сеть отключается: $I = 1,3I_{\text{доп}} = 1,3 \cdot 0,83I_{\text{пл}} = 1,08I_{\text{пл}}$.

При перегрузках, меньших 20%, сеть не отключается: $1,2I_{\text{доп}} = 0,996I_{\text{пл}}$.

Карточка № 12.10(425) Выбор площади сечения проводов в зависимости от установленных предохранителей

Для защиты сети от коротких замыканий выбрана плавкая вставка с номинальным током 35 А. Можно ли для питания нагрузки использовать провод с допустимым током 15 А?	Можно	175
	Нельзя	38
Можно ли в предыдущем случае выбрать провод с допустимым током: а) 10 А; б) 20 А?	Можно	151
	а) Можно; б) нельзя	72
	Нельзя	181
	а) Нельзя; б) можно	97
Номинальный ток плавкой вставки, защищающей участок сети от перегрузок и коротких замыканий, равен 60 А. Определить допустимый ток провода	60 А	16
	75 А	66
	180 А	246
Укажите номинальный ток, при котором произойдет отключение линии в условиях предыдущей задачи	75 А	32
	80 А	62
	90 А	191
	100 А	225
Какая защита проще осуществляется, от перегрузок или от коротких замыканий?	От перегрузок	216
	От коротких замыканий	196

§ 12.11. ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА. ПОНЯТИЕ О НАПРЯЖЕНИИ ПРИКОСНОВЕНИЯ. ДОПУСТИМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИКОСНОВЕНИЯ

При прохождении электрического тока через организм человека в первую очередь поражается центральная нервная система, в результате чего нарушается работа сердечной мышцы и органов дыхания. Степень поражения зависит от силы и частоты тока, а также

от пути прохождения тока через организм человека. При прочих равных условиях наибольшее физиологическое воздействие на организм человека оказывают токи частотой 50—60 Гц. Что касается силы тока, то неприятные ощущения возникают уже при токах в несколько миллиампер. При токе 25 мА (0,025 А) наступает судорожное сокращение мышц и человек оказывается не в состоянии самостоятельно разжать пальцы и освободиться от провода, находящегося под током. При токе 100 мА (0,1 А) практически мгновенно наступает паралич дыхания и сердца. Правилами техники безопасности за безусловно опасный принят ток 50 мА (0,05 А).

Значительным электрическим сопротивлением обладает только поверхностный слой кожи человека. Это сопротивление зависит от многих причин (влажности кожи, степени расширения кожных капилляров и др.) и колеблется в широких пределах — от 800 до 100 000 Ом. Сопротивление резко снижается, например, при употреблении алкоголя. Если принять сопротивление тела человека равным 1000 Ом, то опасным будет ток при напряжении $U = IR_{\text{тел}} = 0,05 \cdot 1000 = 50 \text{ В}$.

При этом источник должен отдавать мощность $R = UI = 50 \cdot 0,05 = 2,5 \text{ Вт}$.

Если мощность источника значительно меньше указанной цифры, то высокие напряжения не приводят к общему поражению организма человека, но вызывают неприятные ощущения.

При неисправности изоляции токонесущих частей электротехнических установок неизолированные металлические конструкции могут оказаться под напряжением. Под напряжением окажется и человек, коснувшийся такой металлической конструкции. Назовем это напряжение напряжением прикосновения $U_{\text{пр}}$.

Правила техники безопасности считают опасными для человека следующие напряжения прикосновения: в сухом помещении $U_{\text{пр}} = 65 \text{ В}$; в сырых помещениях с относительной влажностью 75% и токопроводящими полами $U_{\text{пр}} = 36 \text{ В}$; в особо опасных помещениях (металлические кабины, котлы, помещения с относительной влажностью 100%) $U_{\text{пр}} = 12 \text{ В}$.

При погружении в воду сопротивление тела человека значительно снижается вследствие увеличения поверхности соприкосновения тела с проводящей средой и уменьшения удельного сопротивления кожи,

поэтому даже сравнительно невысокие напряжения могут оказаться смертельно опасными. По этой причине, в частности, в ваннных комнатах не устанавливают розеток электропитания и выключателей, а осветительные приборы закрывают прозрачными колпаками.

Карточка № 12.11 (164)

Действие электрического тока на организм человека.

Понятие о напряжении прикосновения.

Допустимые значения напряжения прикосновения

Какой электрический параметр оказывает непосредственное физиологическое воздействие на организм человека?	Напряжение	231
	Мощность	24
	Ток	56
	Напряженность	203
Электрическое сопротивление человеческого тела 8000 Ом. Какой ток проходит через него, если человек находится под напряжением 380 В?	19 мА	237
	38 мА	120
	76 мА	209
	50 мА	11
Какой ток наиболее опасен при прочих равных условиях?	Постоянный	49
	Переменный с частотой 50 Гц	126
	Переменный с частотой 50 МГц	86
	Опасность во всех случаях одинакова	115
Укажите наибольшее и наименьшее допустимые напряжения прикосновения, установленные правилами техники безопасности в зависимости от внешних условий	127 и 6 В	131
	65 и 12 В	5
	36 и 12 В	162
	65 и 6 В	138
Опасен ли для человека источник электрической энергии, ЭДС которого 3000 В, внутреннее сопротивление 1 МОм?	Опасен	79
	Не опасен	169
	Опасен при некоторых условиях	110

§ 12.12. ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ ТРЕХПРОВОДНЫХ ЦЕПЕЙ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Вследствие того что сопротивление изоляции $R_{из}$ проводов электрической сети ограничено (не бесконечно велико), между линейными проводами существуют токи утечки I_y , которые замыкаются через землю. На рис. 12.15 распределенное по длине провода сопротивление изоляции для наглядности условно изображено сосредоточенным.

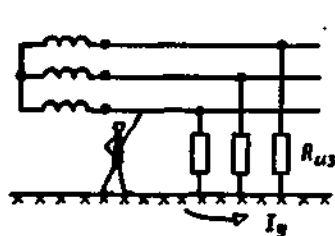


Рис. 12.15. Токи утечки в трехпроводной трехфазной линии

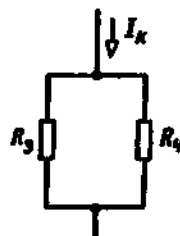


Рис. 12.16. Параллельное соединение сопротивлений изоляции и тела человека

Если человек, стоящий на земле, коснется даже одного оголенного провода линии, то он окажется в опасности, так как почти весь ток утечки пройдет через его тело, а ток утечки в мощных энергосистемах обычно превышает опасное значение 50 мА.

Действительно, согласно рис. 12.16, ток утечки распределяется между параллельными ветвями $R_ч$ и $R_{из}$, а так как $R_{из} \gg R_ч$, то практически весь ток утечки пойдет через человека.

Конечно, случаи, когда стоящий на земле человек касается оголенного провода энергосистемы, редки и должны быть исключены совсем. Для этого токоведущие части электроустановок закрываются кожухами, применяются ограждения и блокировки, автоматически отключающие напряжение, когда человек входит внутрь ограждений. В местах опасности вывешиваются таблицы и плакаты. Обслуживающий персонал проходит курс техники безопасности, инструктируется, снабжается резиновыми перчатками, ботами, изолирующими ковриками и подставками.

Опасность прохождения через тело человека токов утечки возникает в тех случаях, когда вследствие повреждения изоляции под током оказываются металлические части и станины машин, не соединенные с токоведущими деталями.

Для обеспечения безопасности в этом случае применяется защитное заземление металлических частей электротехнических установок, не находящихся под напряжением. Заземление осуществляется с помощью стальных труб, полос, уголков, которые закладываются

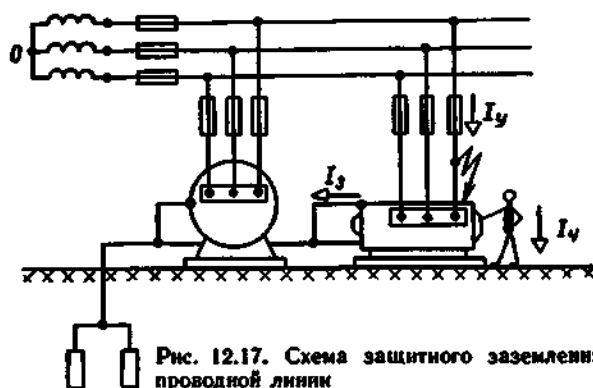


Рис. 12.17. Схема защитного заземления в трехпроводной линии

в почве на достаточной глубине и соединяются с заземляемыми деталями стальными полосами (шинами). Такое защитное заземление показано на рис. 12.17.

Если произойдет повреждение изоляции и корпус двигателя окажется соединенным с проводом сети, то человеку, прикоснувшемуся к заземленному двигателю, не угрожает опасность. Действительно, в этом случае ток утечки распределяется между параллельными ветвями $R_ч$ и $R_з$ (рис. 12.18).

Так как сопротивление человека значительно больше, чем сопротивление заземлителя, то почти весь ток утечки пройдет через заземлитель. Это справедливо, если заземлитель правильно рассчитан и тщательно выполнен. При повышенном сопротивлении заземлителя опасность поражения человека токами утечки остается.

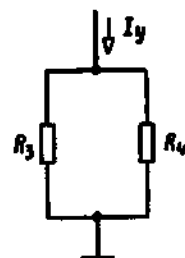


Рис. 12.18. Распределение тока утечки между телом человека и заземлителем

Карточка № 12.12 (201)
Защитное заземление трехпроводных цепей трехфазного тока

Электропроводность изоляции одного метра провода равна 10^{-7} См/м. Определить: а) электропроводность; б) сопротивление изоляции провода длиной 2 км	а) $5 \cdot 10^{-10}$ См; б) $0,2 \cdot 10^{10}$ Ом	145
	а) $2 \cdot 10^{-4}$ См; б) $5 \cdot 10^3$ Ом	104
	а) $2 \cdot 10^{-3}$ См; б) $0,5 \cdot 10^3$ Ом	176
	а) 10 См; б) 0,1 Ом	39
Определить ток утечки рассмотренного выше провода при напряжении 380 В	19 мА	152
	38 мА	73
	76 мА	182
	50 мА	98
Параллельно сопротивлению изоляции рассмотренного выше провода подключено тело человека с сопротивлением 2600 Ом. Какая часть найденного тока утечки проходит через тело человека?	20 мА	17
	30 мА	67
	40 мА	247
	50 мА	33
Какой ток будет проходить через тело человека в условиях, рассмотренных выше, если параллельно человеку подключить заземлитель с сопротивлением 10 Ом?	76 мА	226
	50 мА	217
	5 мА	197
	Значительно меньше 1 мА	25
Какие части электротехнических установок заземляются?	Соединенные с токоведущими деталями	232
	Изолированные от токоведущих деталей	57

§ 12.13. ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНЫХ ЦЕПЕЙ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

В рассмотренных ранее трехпроводных линиях при пробое изоляции и соединении одного из линейных проводов с корпусом двигателя защита из плавких

предохранителей не срабатывает, так как токи утечки недостаточны для пережигания плавкой вставки. Чтобы срабатывала защита, можно было бы точку O (см. рис. 12.17) заземлить, как это показано пунктиром на рис. 12.19. Тогда при пробое изоляции возникло бы короткое замыкание фазы на землю и плавкая вставка перегорела бы. Но такое заземление нулевой точки в трехпроводной сети недопустимо, так как прикосновение человека к корпусу поврежденного двигателя было бы смертельно опасным.

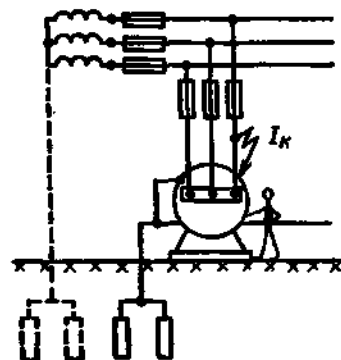


Рис. 12.19. Заземление нулевой точки в трехпроводной линии

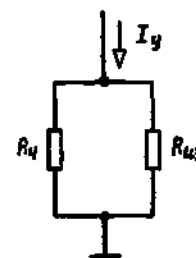


Рис. 12.20. Распределение тока короткого замыкания между телом человека и заземлителем

В этом случае через параллельно соединенные заземлитель и тело человека будет проходить уже не ток утечки, а ток короткого замыкания (рис. 12.20), и, несмотря на то что сопротивление заземлителя много меньше, чем сопротивление человека $R_З \ll R_Ч$, относительно небольшая часть тока короткого замыкания, проходящая через человека, в абсолютном значении может значительно превышать опасный ток 50 мА.

Иначе обстоит дело в четырехпроводных цепях трехфазного тока. Здесь можно построить такую систему защиты, которая надежно срабатывала бы при каждом пробое изоляции и попадании напряжения на корпус двигателя. Для этого достаточно корпус двигателя и другие металлические части электротехнических установок, нормально не находящиеся под на-

пряжением, надежно соединить с помощью стальных полос или проводов с нулевым проводом, как показано на рис. 12.21. Теперь пробой изоляции приводит к короткому замыканию фазы генератора. Соответствующая плавкая вставка в течение долей секунды перегорает и отключает от сети поврежденный участок.

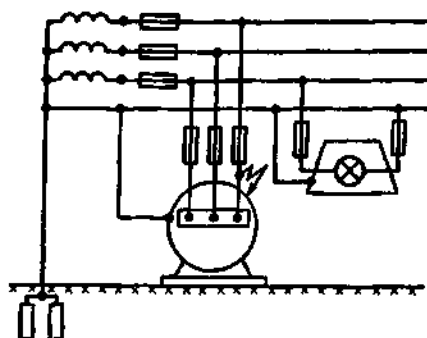


Рис. 12.21. Схема защитного заземления в четырехпроводной линии

Такое соединение металлических частей электротехнических установок с нулевым проводом иногда называют занулением.

Для перегорания плавкой вставки нужно некоторое время. В течение этого времени человек, прикоснувшийся к поврежденному двигателю, будет соединен с линейным проводом и через его тело пройдет ток утечки. Чтобы защитить человека от тока утечки, корпус двигателя (и все металлические части электротехнических установок, не находящиеся под напряжением) нужно заземлить. Однако проще заземлить сам нулевой провод, так как все металлические части уже соединены с ним, и тогда нет необходимости тянуть дополнительные шины к электротехническим установкам. Полученная схема (рис. 12.21) получила широкое распространение. Ее называют четырехпроводной сетью с заземленной нейтралью.

Категорически запрещается в четырехпроводной сети трехфазного тока с заземлением нейтралью заземлять корпуса электротехнических установок, не соединив эти корпуса с нулевым проводом. Если нарушить этот запрет, получим опасную схему, изображенную на рис. 12.19.

Карточка № 12.13 (204)
Защитное заземление четырехпроводных цепей трехфазного тока

Допустимо ли заземление средней точки генератора или питающего трансформатора для повышения безопасности в трехпроводной трехфазной цепи?	Допустимо	204
	Такое заземление нецелесообразно, так как не влияет на условия безопасности	238
	Такое заземление недопустимо, так как резко увеличивает вероятность поражения током	210
Через параллельно соединенные заземлитель и тело человека проходит ток короткого замыкания 30 А. Сопротивление заземлителя 10 Ом. Сопротивление тела человека 2890 Ом. Определить ток, проходящий через тело человека	10 мА	12
	29 мА	50
	50 мА	126
	100 мА	132
Можно ли для повышения безопасности корпус двигателя, соединенный с заземленной нейтралью, заземлить при помощи специального заземлителя?	Можно	6
	Нельзя	163
	Можно, но нецелесообразно	139
Можно ли заземлить корпус двигателя, не соединенный с заземленной нейтралью?	Можно	80
	Нельзя	170
	Можно, но нецелесообразно	146
Сработает ли защита из плавких предохранителей при пробое на корпус двигателя: а) в трехпроводной; б) в четырехпроводной сетях трехфазного тока?	Да	105
	Нет	177
	а) Да; б) нет	40
	а) Нет; б) да	153

§ 12.14. УСТРОЙСТВО И ПРОСТЕЙШИЙ РАСЧЕТ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

При выборе схемы заземления прежде всего следует оценить возможности использования в качестве заземлителей близко расположенных металлических конструкций: каркасов зданий, водопроводных труб, отопительных систем и др. В электрических сетях напряжением до 1000 В общее сопротивление заземлителей не должно превышать 4 Ом при мощности сети 100 кВт и более и 10 Ом при мощности сети менее 100 кВт.

Если естественные заземлители отсутствуют или имеют сопротивление больше указанных значений, устанавливают искусственные заземлители, в качестве которых применяют:

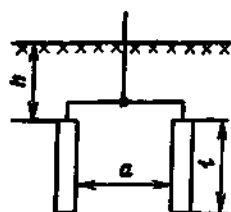


Рис. 12.22. Схема заземлителя

1. Вертикально погруженные в почву стальные трубы длиной 3 м, с толщиной стенок 3,5 мм и диаметром 50 мм.

2. Угловую сталь или стальные полосы толщиной 4 мм и площадью поперечного сечения не менее 48 мм², расположенные вертикально или горизонтально.

Наименьшее количество заземлителей — два. Расстояние между заземлителями не менее половины их длины, глубина погружения не менее трети длины заземлителя (рис. 12.22).

Если в качестве заземлителя используется труба, то ее сопротивление подсчитывается по формуле $R_{тр} = 0,9\rho/l$. Аналогичная формула для полосы имеет вид $R_{пол} = 2,1\rho/l$. Здесь ρ — удельное сопротивление почвы, приходящееся на каждый метр длины заземлителя (для суглинка $\rho = 100$ Ом·м, для песка — $\rho = 700$ Ом·м). Более точные данные для ρ указаны в справочниках.

Число труб или полос, используемых в качестве заземлителей, подсчитывается по формуле

$$n = R_{тр} / (\eta R_z),$$

где $R_{тр}$ — сопротивление трубы (полюсы); R_z — сопротивление заземления; η — коэффициент использования трубы (полюсы). При $n=2$ $\eta=0,9$; при $n=22$ $\eta=0,6$.

Карточка № 12.14 (201) Устройство и простейший расчет заземлителей

В каких случаях допускается сопротивление заземлителя больше 4 Ом, но меньше 10 Ом?	При мощности сети, превышающей 100 кВт	74
	При мощности сети, меньшей 100 кВт	183
	При мощности сети, равной 100 кВт	39
Можно ли при мощности сети, меньшей 100 кВт, использовать естественные заземлители с общим сопротивлением 1 Ом?	Можно	18
	Нельзя	68
В суглинистую почву погружен заземлитель в виде трубы длиной 2 м. Определить сопротивление заземлителя	45 Ом	248
	50 Ом	34
	55 Ом	198
	60 Ом	211
Найти примерное количество труб (без учета коэффициента использования), необходимое для заземления нулевого провода сети мощностью меньше 100 кВт	3	51
	5	133
	7	164
	9	140
Сколько рассмотренных выше труб надо разместить в суглинистой почве на расстоянии 2 м друг от друга, чтобы осуществить заземление нулевого провода сети мощностью меньше 100 кВт?	9	81
	3	171
	5	147
	6	19

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

§ 13.1. ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Электроприводом называется электромеханическое устройство, предназначенное для электрификации и автоматизации рабочих процессов.

Электропривод состоит из преобразующего, электродвигательного, передаточного и управляющего устройств (рис. 13.1). Преобразующее устройство *ПрУ* преобразует напряжение, ток или частоту напряжения.

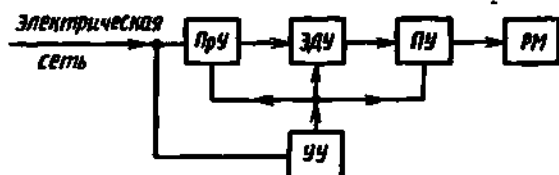


Рис. 13.1. Структурная схема электропривода

Оно может быть выполнено в виде магнитного усилителя, магнитного усилителя с выпрямлением, управляемого выпрямителя на тиристорах и т. д.

В электродвигательном устройстве *ЭДУ* происходит преобразование электрической энергии в механическую. Передаточное устройство *ПУ* служит для изменения скорости до значения, необходимого рабочему механизму *РМ*. Оно может быть выполнено в виде редуктора, т. е. быть неуправляемым. Управляемое *ПУ* представляет собой коробку передач с электромагнитными муфтами, изменяющими ее передаточное число.

Управляющее устройство *УУ* регулирует работу всех блоков электропривода, изменяя мощность на валу рабочего механизма, значение и частоту напряжения, схему включения электродвигателя, передаточное число коробки передач, направление вращения электродвигателя и т. д.

На практике электропривод бывает автоматизированный и неавтоматизированный. В автоматизированном электроприводе человек создает только начальное управляющее воздействие (пуск электропривода).

В неавтоматизированном человек периодически управляет работой электропривода в зависимости от отклонений от заданного режима.

Электроприводы делят на три группы: 1) групповые; 2) одиночные; 3) многодвигательные.

В групповых электроприводах электродвигатель с помощью механической передачи (трансмиссии) приводит в действие несколько рабочих механизмов.

В одиночных электроприводах механизм приводится в действие индивидуальным электродвигателем. При этом все элементы рабочего механизма соединяются с приводным двигателем соответствующими передачами.

В многодвигательных электроприводах каждый орган рабочего механизма снабжен своим двигателем. Так, например, на расточном станке вращение фрезы производится с помощью одного двигателя, продольное перемещение детали — другого, поперечное перемещение — третьего.

Карточка № 13.1 (243)
Понятие об электроприводе

Что входит в состав электропривода?	Электродвигатель и рабочий механизм	3
	Электродвигатель, рабочий механизм и управляющее устройство	31
	Преобразующее устройство, электродвигатель, редуктор, управляющее устройство и рабочий механизм	15
	Электродвигатель, редуктор, управляющее устройство и рабочий механизм	25
Какую роль играет преобразующее устройство в электроприводе?	Преобразует постоянное напряжение в переменное	14
	Преобразует переменное напряжение в постоянное	19
	Преобразует напряжение, ток или частоту напряжения	51

Какую функцию выполняет передаточное устройство в электроприводе?	Повышает частоту вращения вала рабочего механизма	61
	Понижает частоту вращения вала рабочего механизма	54
	Служит для изменения частоты вращения вала до значения, необходимого рабочему механизму	59
Какие функции выполняет управляющее устройство электропривода?	Изменяет мощность на валу рабочего механизма	18
	Изменяет значение и частоту напряжения	67
	Изменяет схему включения электродвигателя, передаточное число, направление вращения	72
	Выполняет все функции, перечисленные выше	70
Сколько электродвигателей входит в электропривод?	Один	65
	Несколько	41
	Количество электродвигателей зависит от типа электропривода	44

§ 13.2. НАГРЕВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Работа электродвигателя, как и любого другого механизма, сопровождается потерями части энергии, которые превращаются в теплоту. При этом мощность потерь ΔP определяется как

$$\Delta P = P (1/\eta - 1), \quad (13.1)$$

где P — мощность на валу двигателя; η — КПД двигателя. Отсюда следует, что с ростом нагрузки температура двигателя и его изоляции возрастает и может достигнуть недопустимых значений.

Температура двигателя определяется не только

нагрузкой, она зависит и от температуры окружающей среды. При расчетах температуру окружающей среды принимают равной $+40^\circ \text{C}$. Разность между температурами двигателя и окружающей среды называют температурой перегрева t . Так, например, для изоляции класса А (пропитанные волокнистые материалы) допустимая температура перегрева 65°C . В процессе нагревания двигателя часть теплоты идет на его нагревание, а часть излучается в окружающее пространство. Когда температура двигателя достигает установившегося значения, процесс нагревания прекращается и вся теплота, выделяющаяся в двигателе, излучается в окружающее пространство. Установившаяся температура перегрева определяется по формуле

$$\tau_{\text{уст}} = \Delta P / A,$$

где A — коэффициент теплоотдачи, Вт/град. Изменение температуры двигателя при его нагревании и охлаждении происходит по закону экспоненты:

$$\tau = \tau_{\text{уст}} (1 - e^{-t/\tau_{\text{уст}}}); \quad (13.2)$$

при охлаждении

$$\tau = \tau_{\text{нач}} e^{-t/\tau_{\text{охл}}}, \quad (13.3)$$

где $\tau_{\text{нач}}$ — начальная температура перегрева; $\tau_{\text{охл}} = C/A_{\text{охл}}$ — постоянная времени охлаждения двигателя; C — теплоемкость двигателя, Вт·с/град.

На рис. 13.2 приведены кривые нагревания и охлаждения, соответствующие формулам (13.2) и (13.3).

Практически нагревание двигателя заканчивается через время $t_n = (3 \div 5) \tau_n$, а охлаждение — через время $t_{\text{охл}} = (3 \div 5) \tau_{\text{охл}}$. Скорость охлаждения зависит от способа вентиляции и ее интенсивности. В двигателе с самовентиляцией условия охлаждения значительно хуже, чем в двигателе с принудительным охлаждением. Поэтому $\tau_{\text{охл}}$ в двигателях с самовентиляцией в 2—3 раза больше τ_n .

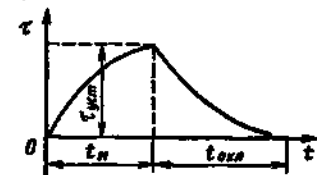


Рис. 13.2. Кривые нагревания и охлаждения двигателя

От каких факторов зависит температура нагрева двигателя?	От мощности на валу двигателя	9
	От КПД двигателя	39
	От температуры окружающей среды	63
	От всех трех факторов	57
Какой принимается температура окружающей среды при расчетах двигателей?	20° C	34
	0° C	54
	40° C	38
Каким температурным параметром пользуются при расчетах двигателя?	Температурой нагрева двигателя	69
	Температурой перегрева	4
Каково соотношение между временем нагрева двигателя t_n и постоянной времени нагрева T_n ?	$t_n = T_n$	12
	$t_n < T_n$	29
	$t_n = (3 \div 5) T_n$	64
Каково соотношение между постоянными времени нагревания и охлаждения T_n и $T_{охл}$ в двигателе с самовентиляцией?	$T_n = T_{охл}$	68
	$T_{охл} = (2 \div 3) T_n$	52
	$T_n = (2 \div 3) T_{охл}$	62

§ 13.3. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. ВЫБОР МОЩНОСТИ

Характер изменения нагрузки рабочего механизма определяет режим работы двигателя. Чтобы учесть эти изменения, рассчитывают и строят нагрузочные диаграммы, представляющие собой зависимость мощности, тока или вращающего момента двигателя от времени.

Различают следующие режимы работы электродвигателей: 1) длительный; 2) кратковременный; 3) повторно-кратковременный.

Длительный режим. Рассмотрим этот режим при постоянной и переменной нагрузках.

При *постоянной нагрузке* (рис. 13.3) температура перегрева двигателя τ постепенно достигает установившегося значения, при котором двигатель может работать неограниченно долгое время (вентиляторы, центробежные насосы, транспортеры). При заданных

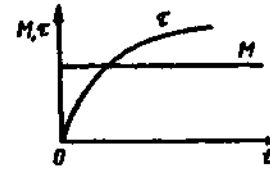


Рис. 13.3. Диаграмма работы двигателя в длительном режиме с постоянной нагрузкой

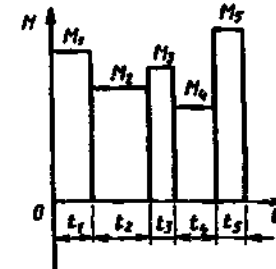


Рис. 13.4. Диаграмма работы двигателя в длительном режиме с переменной нагрузкой

момента сопротивления механизма M_m и частоте вращения ω_m выбирают передаточный механизм и соответствующее передаточное число i этого механизма. Передаточное число i рассчитывается на основании заданной частоты вращения механизма ω_m и предполагаемой номинальной частоты вращения двигателя: $i = \omega_{д ном} / \omega_m$. Для выбранного передаточного механизма с известным КПД η и заданным моментом M_m находят мощность двигателя:

$$P = M_m \omega_m / \eta.$$

При этом необходимо, чтобы номинальная мощность двигателя $P_{ном} \geq P$.

При *переменной нагрузке* (рис. 13.4) температура двигателя колеблется, но приблизительно может считаться неизменной. Частота вращения вала двигателя может также считаться практически постоянной. Мощность двигателя определяют на основании нагрузочной диаграммы, приведенной на рис. 13.4. Из этой диаграммы находят среднеквадратичный (эквивалентный по нагреву) момент:

$$M_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + \dots + M_3^2 t_3}{t_1 + \dots + t_3}}$$

Затем определяют требуемую мощность двигателя: $P = M_{\text{эк}} \omega_{\text{д ном}}$. Необходимо также проверить выбранный двигатель по перегрузочной способности. Максимальный момент не должен превышать допустимого для данного двигателя:

$$M_{\text{max}} \leq M_{\text{ном}} \lambda_{\text{м}}$$

где $M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \omega_{\text{д ном}}$ — номинальный момент двигателя; $\lambda_{\text{м}} = M_{\text{доп}} / M_{\text{ном}}$ — допустимая перегрузочная способность двигателя.

Кратковременный режим. В этом режиме двигатель работает ограниченное время t_k (рис. 13.5), в течение которого температура перегрева τ не успе-

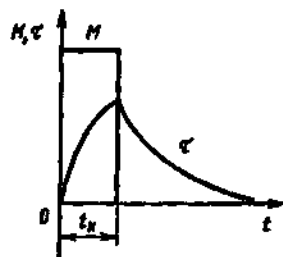


Рис. 13.5. Диаграмма работы двигателя в кратковременном режиме

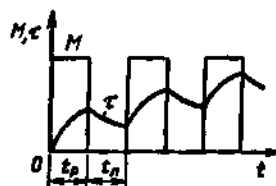


Рис. 13.6. Диаграмма работы двигателя в повторно-кратковременном режиме

вает достигнуть установившегося значения. За время отключенного состояния двигатель охлаждается до температуры окружающей среды. К механизмам, работающим в кратковременном режиме, относятся зажимные устройства металлорежущих станков, разводные мосты, шлюзовые устройства гидротехнических сооружений. Двигатели, работающие в кратковременном режиме, выпускают на стандартное время включения, равное 10, 30, 60 и 90 мин. Необходимо, чтобы энергия потерь, выделяющаяся в двигателе за время его работы, не превосходила энергии потерь, выделяющейся за номинальное (паспортное) время работы $t_{\text{ном}}$:

$$W_{\text{д ном}} = (P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} - P_{\text{ном}}) t_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} t_{\text{ном}} (1 - \eta_{\text{ном}}) / \eta_{\text{ном}}$$

Необходимо, чтобы выбранный двигатель был проверен на перегрузочную способность:

$$M_{\text{max}} \leq M_{\text{ном}} \lambda_{\text{ном}}$$

Повторно-кратковременный режим. В этом режиме время нагрузки t_p (время работы) чередуется с паузами t_n (рис. 13.6). За время нагрузки температура перегрева не успевает достигнуть установившегося значения, а за время паузы двигатель не успевает полностью охладиться. Через определенное число циклов среднее значение температуры достигает некоторого установившегося значения. Повторно-кратковременный режим характеризуется (в процентах) продолжительностью включения (ПВ), определяемой по формуле

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_p + t_n} \cdot 100.$$

Этот режим применяется в электроприводах кранов, подъемников, холодильных установках и т. д.

Для повторно-кратковременного режима работы выбирают специально рассчитанные двигатели с продолжительностью включения, равной 15, 25, 40 и 60%.

Расчет двигателя в этих случаях производится в следующем порядке.

1. По аналогии с имеющимися приводами производят предварительный выбор двигателя.

2. Для выбранного двигателя строят реальную нагрузочную диаграмму (рис. 13.7).

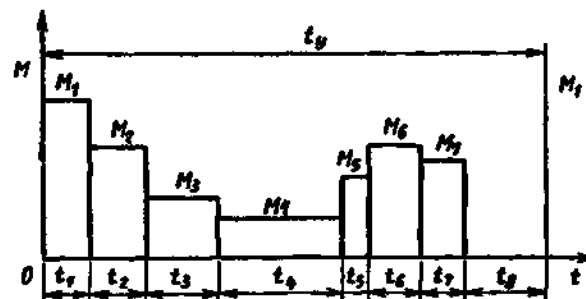


Рис. 13.7. Реальная нагрузочная характеристика двигателя

3. По нагрузочной характеристике определяют фактическую продолжительность включения двигателя:

$$ПВ_{\phi} = \frac{t_1 + \dots + t_7}{t_7} \cdot 100.$$

4. По нагрузочной характеристике находят эквивалентный момент двигателя за время его работы:

$$M_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + \dots + M_7^2 t_7}{t_1 + \dots + t_7}}.$$

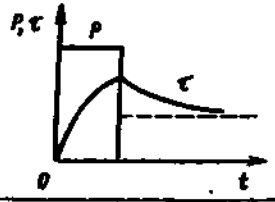
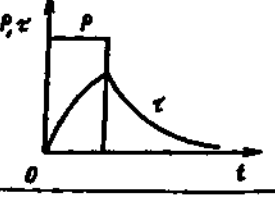
5. Приводят найденный эквивалентный момент к паспортному значению:

$$M'_{\text{эк}} = M_{\text{эк}} \sqrt{ПВ_{\phi} / ПВ_{\text{пасп}}}$$

6. Сравнивают полученное значение $M'_{\text{эк}}$ с номинальным моментом двигателя $M_{\text{ном}}$. Должно выполняться условие $M'_{\text{эк}} \leq M_{\text{ном}}$.

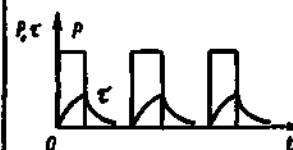
7. Проверяют двигатель на перегрузочную способность: $M_{\text{max}} \leq M_{\text{ном.л.}}$. Если одно или оба условия не выполняются, производят повторный выбор двигателя и повторяют расчет.

Карточка № 13.3 (163)
Режимы работы электродвигателей. Выбор мощности

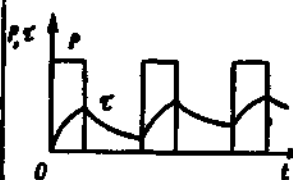
При каком режиме работы двигателя должен рассчитываться на максимальную мощность?	Повторно-кратковременном	26
	Длительном	1
	Кратковременном	23
Выберите график, правильно отражающий кратковременный режим работы двигателя		45
		42

Продолжение

Выберите график, правильно отражающий повторно-кратковременный режим работы двигателя



6



49

Двигатель работает в длительном режиме при мощности $P = 120$ кВт и КПД механизма $\eta = 80\%$. Выбрать двигатель по каталогу, если в нем указаны следующие мощности: 120, 140, 160, 180 кВт

120 кВт

24

140 кВт

7

160 кВт

47

Выбор правильного соотношения между допустимым моментом двигателя $M_{\text{доп}}$ и максимальным моментом M_{max}

$M_{\text{max}} \geq M_{\text{доп}}$

22

$M_{\text{max}} \leq M_{\text{доп}}$

27

$M_{\text{max}} < M_{\text{доп}}$

56

§ 13.4. РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

Назначение релейно-контакторного управления. Релейно-контакторное управление позволяет осуществить автоматический, дистанционный пуск, изменение частоты вращения, останов, реверсирование, торможение и защиту двигателя. Этот вид управления относится к разомкнутым системам в том смысле, что он не охвачен обратными связями. В результате этого возмущающее воздействие (например, изменение нагрузки на валу двигателя) изменяет заданный режим, т. е. приводит к изменению частоты вращения вала двигателя. Для сложных приводов применяют замкнутые системы, т. е. системы автоматического регулирования, охваченные обратными связями. В таких системах поддерживается заданный режим работы при

наличии возмущающих воздействий (изменение нагрузки, напряжения питания и т. д.).

Изображение схем релейно-контакторного управления. Схемы релейно-контакторного управления вычерчивают как совмещенные или как элементные (развернутые). В совмещенных схемах все элементы аппарата размещают на чертеже так, как они расположены в натуре. Монтажные схемы вычерчивают как совмещенные. Совмещенные схемы громоздки и сложны для чтения. При проектировании электропривода используют развернутые схемы, облегчающие понимание работы установки. На развернутой схеме элементы силовой цепи и управления показаны разнесенными, так же как контакты и обмотки реле. При этом контакты аппаратов изображают в положении, которое соответствует обесточенному состоянию обмоток. В соответствии с этим все контакты делят на нормально открытые, или замыкающие (З), и нормально закрытые, или размыкающие (Р). Когда катушка обесточена, цепь замыкающих контактов разомкнута, а цепь размыкающих контактов замкнута.

Схема управления и защиты асинхронного двигателя с помощью реверсивного магнитного пускателя. Магнитный пускатель состоит из одного или двух контакторов, смонтированных на общем основании и помещенных в металлический корпус. Пускатели, как правило, снабжают встроенным тепловым реле. Магнитный пускатель с одним контактором называют *нереверсивным*. С его помощью осуществляют пуск, останов, защиту электродвигателя от самопроизвольных включений и перегрузок. Магнитный пускатель с двумя контакторами называют *реверсивным*; он помимо перечисленных функций обеспечивает реверсирование двигателя.

Рассмотрим работу реверсивного магнитного пускателя (рис. 13.8). Пускатель содержит два контактора: один для пуска «вперед» (Вп), другой — для пуска «назад» (Нз). Защита двигателя от токов короткого замыкания осуществляется тремя плавкими предохранителями, а от перегрузок — двумя тепловыми реле: 1РТ и 2РТ. Обмотки статора двигателя подключают к сети через плавкие предохранители, рабочие контакты Вп или Нз контакторов и нагревательные элементы тепловых реле 1РТ и 2РТ (для двух фаз). Работа схемы при пуске «вперед» происходит

так. При нажатии кнопки Вп замыкаются контакты 3, 4 и к обмотке контактора Вп подводится напряжение от зажимов сети Л₁ — Л₃. Контакт Вп срабатывает и замыкающие контакты Вп силовой цепи замыкаются, подключая обмотку статора к сети. Одновременно замыкающий блок-контакт контактора Вп замыкает

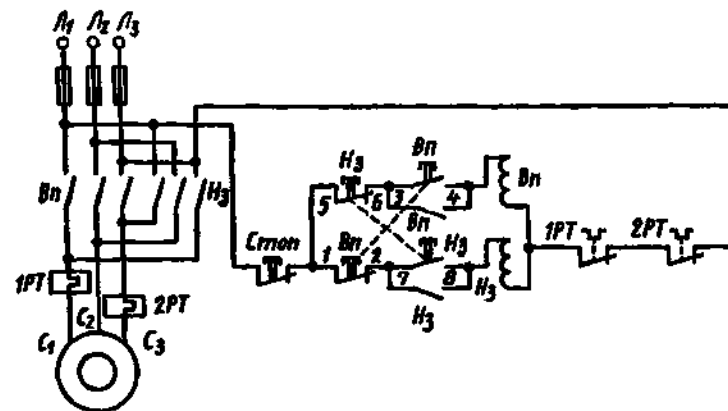


Рис. 13.8. Схема реверсивного магнитного пускателя

ся и цепь кнопки Вп шунтируется. Таким образом, кнопку Вп можно отпустить. Для останова двигателя необходимо нажать кнопку «Стоп». При этом снимается напряжение с обмотки контактора Вп, в результате чего размыкаются его главные контакты и со статорных обмоток двигателя снимается напряжение. Одновременно размыкаются блок-контакты Вп, шунтирующие кнопку Вп. Так же работает схема и при пуске двигателя «назад» после нажатия кнопки Нз, с той лишь разницей, что срабатывает контактор Нз и последовательность подключения фаз статора становится обратной. Это приводит к изменению направления вращения ротора двигателя. Размыкающие контакты кнопки Вп 1, 2 и кнопки Нз 5, 6 размыкаются раньше, чем соответствующие замыкающие контакты 3, 4 и 7, 8. Это обеспечивает их взаимную блокировку и не позволяет подавать напряжение на обмотки контакторов Вп и Нз одновременно.

Карточка № 13.4 (254)
Схема управления и защиты асинхронного двигателя
с помощью реверсивного магнитного пускателя

Какая последовательность фаз обеспечивается нажатием кнопки <i>Нз</i> в схеме рис. 13.8?	<i>Л₃—Л₂—Л₁</i>	33
	<i>Л₁—Л₂—Л₃</i>	50
	<i>Л₂—Л₃—Л₁</i>	40
Что произошло бы при одновременном нажатии кнопок <i>Вл</i> и <i>Нз</i> при отсутствии взаимной блокировки?	Выход из строя двигателя	11
	Срабатывание тепловых реле	21
	Перегорание плавких вставок предохранителей	60
Как включены обмотки контакторов <i>Вл</i> и <i>Нз</i> ?	Последовательно	5
	Параллельно	58
К какой категории контакторов относятся блок-контакты <i>Вл</i> и <i>Нз</i> ?	Замыкающих	32
	Размыкающих	30
В каком случае реверсирование двигателя произойдет быстрее: а) сначала нажимается кнопка «Стоп», а затем <i>Нз</i> ; б) сразу нажимается кнопка <i>Нз</i> ?	В случае а)	16
	В случае б)	71
	Время реверсирования в обоих случаях будет одинаковым	20

Схема автоматического пуска асинхронного двигателя с контактными кольцами. Рассмотрим работу схемы рис. 13.9. Обмотки статора двигателя присоединены к сети через замыкающие контакты линейного контактора *ЛК*. К обмоткам ротора подключены три одинаковых резистора, соединенных звездой. Схема управления пуском состоит из реле ускорения *1У* и *2У*.

токовых реле ускорения *1РТ* и *2РТ* и реле времени *РВ*.

При нажатии на кнопку «Пуск» к контактору *ЛК* подводится напряжение сети, контактор срабатывает, его главные контакты *ЛК* и блок-контакты *БК* замыкаются. В результате к обмоткам статора подводится напряжение, а кнопка «Пуск» оказывает заблокированную. В фазных обмотках ротора двигателя возникают ЭДС и ток, а ротор начинает вращаться. Под действием

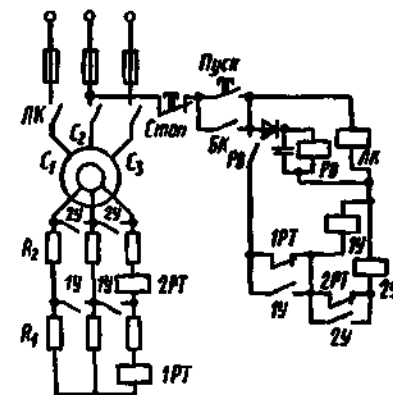
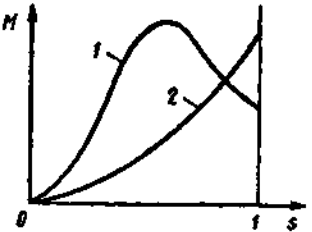


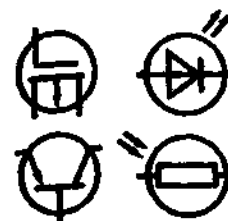
Рис. 13.9. Схема автоматического пуска асинхронного двигателя с контактными кольцами

тока ротора, проходящего через сопротивление $R_1 + R_2$ и обмотки реле *1РТ* и *1РТ*, эти реле срабатывают и размыкают свои контакты *1РТ* и *1РТ*. Одновременно с подачей напряжения на статор двигателя подается питание на обмотку реле времени *РВ*, которое замыкает свои контакты спустя некоторое время после размыкания контакторов *1РТ* и *2РТ*, готовя цепь для подключения обмоток реле ускорения *1У* и *2У*. По мере увеличения частоты вращения ротора его фазный ток уменьшается и достигает тока отпущения реле *1РТ*, которое замыкает свои контакты, и к обмотке реле *1У* подводится напряжение. Реле *1У* срабатывает и замыкает свои главные контакты *1У*, шунтирующие сопротивления. В результате ток в роторе увеличивается скачком и реле *2РТ* продолжает удерживать свои контакты в разомкнутом состоянии. Блок-контакты *1У* блокируют цепь контактов реле *1РТ*. Частота вращения ротора продолжает нарастать и ток в роторе уменьшается, достигая тока отпущения реле *2РТ*. Контакты реле *2РТ* замыкаются и на обмотку реле *2У* подается напряжение. Последнее срабатывает, замыкая свои контакты *2У*, которые шунтируют резисторы R_2 . Блок-контакты *2У* замыкаются, блокируя контакты реле *2РТ*.

Рассмотренная последовательность работы схемы обеспечивает плавный разгон двигателя.

Карточка № 13.5 (211)
Схема автоматического пуска асинхронного двигателя
с контактными кольцами

Какая из приведенных кривых соответствует пуску двигателя с пусковыми сопротивлениями? 	Кривая 2	37
	Кривая 1	13
Какое соотношение должно быть между временем срабатывания реле РВ t_{PB} и временем срабатывания реле IPT t_{IPT}?	$t_{PB} > t_{IPT}$	10
	$t_{PB} < t_{IPT}$	36
	$t_{PB} = t_{IPT}$	8
Что произойдет, если реле времени сработает раньше, чем разомкнутся контакты реле IPT?	Двигатель выйдет из строя	2
	Сгорят плавкие вставки предохранителя	35
	Произойдет пуск двигателя без подключения пусковых резисторов	66
Каким должно быть соотношение между токами отпускания реле IPT и 2PT?	$I_{отп1} > I_{отп2}$	55
	$I_{отп1} < I_{отп2}$	46
	$I_{отп1} = I_{отп2}$	28
Что произойдет, если соотношение между токами отпускания реле IPT и 2PT будет неправильным?	Произойдет пуск двигателя без подключения пусковых резисторов	48
	Двигатель выйдет из строя	17
	Пуск двигателя будет не двух-, а одноступенчатым	43



Электроника

2

Глава 14
Электронные лампы

•

Глава 15
Газоразрядные приборы

•

Глава 16
Полупроводниковые приборы

•

Глава 17
Фотоэлектрические приборы

•

Глава 18
Электронные выпрямители

•

Глава 19
Электронные усилители

•

Глава 20
Электронные генераторы и измерительные приборы

•

Глава 21
Интегральные схемы микроэлектроники

•

Глава 22
Цифровые электронные вычислительные машины.
Микропроцессоры и микроЭВМ

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ

§ 14.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электронные лампы входят в группу приборов, которые называются **электровакuumными**.

Электровакuumные приборы — это электронные приборы, в которых проводимость осуществляется посредством электронов или ионов, движущихся между электродами через вакуум или газ.

Электровакuumные приборы подразделяют на электронные и ионные. В электронных приборах, к которым относятся электронные лампы, прохождение электрического тока осуществляется только за счет свободных электронов, в ионных — как за счет свободных электронов, так и за счет ионов.

Электронные лампы применяют в выпрямительных, усилительных и генераторных устройствах, а также в автоматике, вычислительной и измерительной технике. В настоящее время масштабы применения электронных ламп ограничены в связи с бурным развитием полупроводниковой техники и особенно микроэлектроники. Однако при больших частотах и мощностях электронные лампы еще находят широкое применение.

Во всех электронных лампах источником свободных электронов является специальный электрод, называемый **катодом**. Катод испускает электроны за счет явления **электронной эмиссии**.

§ 14.2. ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Металлы характеризуются наличием большого количества свободных электронов, которые беспорядочно перемещаются в междоатомном пространстве. При обычных условиях только отдельные электроны выходят из металла, преодолевая притягивающее действие его положительно заряженных ионов. В результате на поверхности металла формируется **двойной электрический слой** (рис. 14.1). Этот слой образует электрическое поле, препятствующее дальнейшему выходу электронов из металла. Разность потенциалов в этом поле между электрическими слоями называют **потенциальным барьером**.

Для преодоления этого барьера электроны металла должны получить извне определенную энергию, равную работе, которую надо совершить, чтобы преодолеть потенциальный барьер. Эта работа называется **работой выхода** и обозначается W_a . Отношение работы выхода к заряду электрона называется **потенциалом выхода** $\phi_a = W_a/q_0$.

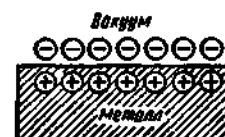


Рис. 14.1. Двойной электрический слой на поверхности металла

Существуют различные способы сообщения дополнительной энергии электронам металла и в зависимости от этого различные виды электронной эмиссии. Остановимся на двух: **термоэлектронной** и **вторичной**.

Термоэлектронной эмиссией называют явление испускания электронов нагретым металлом (**катодом**). При нагревании катода скорости хаотического движения электронов увеличиваются, что приводит к возрастанию их кинетической энергии. В результате число электронов, выходящих из металла, увеличивается. Эти электроны скапливаются около катода за счет притягивающего действия положительных ионов металла. Таким образом, вокруг катода образуется **электронное облако**, внутри которого электроны перемещаются в различных направлениях. При этом определенная часть их возвращается обратно на катод. С увеличением числа вышедших электронов плотность облака растет и дальнейший выход их затрудняется, а число возвращающихся на катод электронов увеличивается до тех пор, пока не наступит **динамическое равновесие**: число вышедших электронов окажется равным числу возвратившихся.

Плотность электронного облака (**объемного заряда**) зависит от температуры катода. Если на электронное облако действует внешнее ускоряющее поле, то электроны облака перемещаются от катода, т. е. появится ток I_e , называемый **током эмиссии**.

Вторичной эмиссией называется явление выхода электронов из «холодного» металла под действием бомбардировки его первичными электронами. Первичные электроны, обладающие относительно большой скоростью, встречая на своем пути поверхность металла, тормозятся и отдают свою энергию его электронам (например, аноду электронной лампы).

Электроны анода, получив дополнительную энергию, выходят за его пределы, образуя ток вторичной эмиссии.

Карточка № 14.1 (315)
Электронная эмиссия

Какие материалы при прочих равных условиях обеспечивают максимальную электронную эмиссию?	Полупроводниковые	57
	Металлические	68
	Диэлектрические	29
Существует ли ток термоэлектронной эмиссии с катода при динамическом равновесии в электронном облаке?	Не существует	76
	Существует	99
	Это зависит от наличия ускоряющего поля	86
Каков характер движения электронов в процессе термоэлектронной эмиссии?	Упорядоченный	39
	Хаотический	107
Каково соотношение между скоростью первичных и вторичных электронов v_1 и v_2 ?	$v_1 \approx v_2$	22
	$v_1 > v_2$	73
	$v_1 < v_2$	63
Как зависит количество эмиттированных электронов от температуры и потенциала выхода металла ϕ_0 ?	Возрастает с увеличением температуры и ϕ_0	16
	Возрастает при уменьшении температуры и ϕ_0	108
	Возрастает с увеличением температуры и уменьшением ϕ_0	81
	Возрастает с уменьшением температуры и увеличением ϕ_0	43

§ 14.3. КАТОДЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП

Катодом называют специальный электрод электровакуумного прибора, который является источником электронной эмиссии. Их различают по видам эмиссии. В данной главе рассмотрим термокатоды и будем их называть просто катодами.

В зависимости от способа подогрева различают катоды прямого и косвенного накала. Нагревание катодов прямого накала происходит за счет тока, проходящего по самому катоду (рис. 14.2), который обычно изготавливают из тугоплавких материалов (вольфрам, тантал). Несмотря на простоту конструкции, эти катоды имеют существенный недостаток: имея малую массу, они обладают очень малой тепловой инерцией и поэтому их необходимо питать только постоянным током.

Катоды косвенного накала представляют собой полый цилиндр из тугоплавкого металла. Нагрев его осуществляют нитью накала (подогревателем), помещенной внутрь катода и изолированной от него (рис. 14.3). Эти катоды благодаря относительно большой массе имеют заметную тепловую инерцию и, следовательно, их можно питать переменным током.

Катоды, выполненные из чистого металла (простые), имеют малую экономичность H , которая определяется как отношение тока эмиссии в миллиамперах к одному ватту накальной мощности $H = I_e / P_n$ при высокой рабочей температуре. Например, у вольфрамовых катодов $H = 2 \div 10$ мА/Вт при рабочей температуре порядка 2300—2600 К.

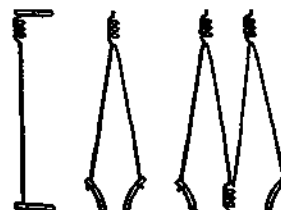


Рис. 14.2. Устройство катодов прямого накала

Рис. 14.3. Устройство катодов косвенного накала

14 я-808

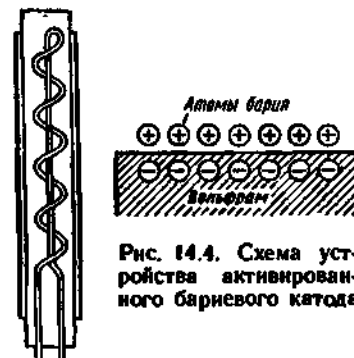


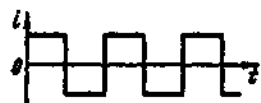
Рис. 14.4. Схема устройства активированного бариевого катода

Для увеличения экономичности и понижения рабочей температуры применяются активированные катоды. На поверхность таких катодов наносят слой активных металлов (например, бария). Активированный слой создает ускоряющее поле (рис. 14.4) и потенциал выхода уменьшается. Экономичность бариевых катодов $H=50 \div 150$ мА/Вт при рабочей температуре порядка 800—900 К.

Наряду с бариевыми катодами широко применяют оксидные, в которых активный слой состоит из оксидов щелочно-земельных металлов: бария, стронция и кальция. Большим недостатком оксидных катодов является испарение с их поверхности активного слоя. При этом атомы активного слоя осаждаются на других электродах лампы, нарушая ее нормальную работу.

Карточка № 14.2 (100)
Катоды электронных ламп

Какое соотношение между временем нагрева катодов прямого и косвенного накала $t_{пр}$ и $t_{косв}$?	$t_{пр} \approx t_{косв}$	122
	$t_{косв} > t_{пр}$	21
	$t_{косв} < t_{пр}$	137
Почему недопустим нагрев катодов прямого накала переменным током?	Из-за колебания температуры катоды	80
	Из-за уменьшения средней температуры	127
	Из-за пульсации тока эмиссии	132
Можно ли применять для нагрева катодов прямого накала выпрямленный ток данной формы?	Можно	62
	Нельзя	28
	Это зависит от амплитуды тока	37
Какие катоды можно нагревать током данной формы?	Косвенного накала	89
	Прямого накала	59
	Любые	140



Продолжение

Назовите главное достоинство активированных катодов	Возможность нагрева переменным током	30
	Низкая рабочая температура	55
	Высокая экономичность	45

§ 14.4. ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

В электронных лампах для ускорения электронов и управления электронным потоком используют электрическое поле.

Рассмотрим движение электронов в однородном электрическом поле, действующем между двумя параллельными электродами (рис. 14.5). Допустим, что в начальный момент времени электрон массы m_0 с

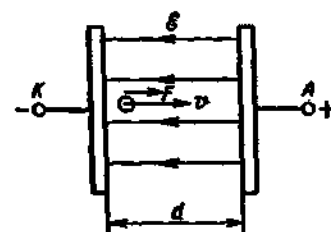


Рис. 14.5. Движение электрона в однородном электрическом поле

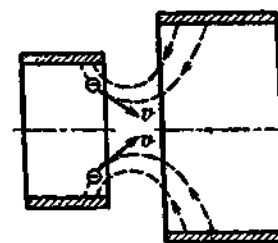


Рис. 14.6. Движение электронов в неоднородном поле

зарядом q_0 находится у поверхности катода, а его начальная скорость $v_0=0$. Под действием ускоряющей силы $F=q_0 \mathcal{E}$ электрон будет двигаться равноускоренно. Определим скорость, с которой электрон достигает анода, разгоняясь в поле с напряжением U , приложенным между анодом и катодом.

Работа, которую совершает поле, разгоняя электрон на участке пути d между электродами, $A = Fd$, но $F = q_0 \mathcal{E}$. Так как электрическое поле в данном случае однородно, то $\mathcal{E} = U/d$ и, следовательно, $A = q_0 U$ (отметим, что здесь работа выражается в электрон-вольтах; $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$). Энергия электрического поля преобразуется в кинетическую энергию движущегося электрона $W = m_0 v^2/2$.

Приравняв выражения для A и W , получим $q_0 U = m_0 v^2/2$, откуда скорость электрона $v = \sqrt{2 \frac{q_0}{m_0} U}$.

Учитывая, что $q_0/m_0 \approx 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$, имеем $v = 600 \sqrt{U}$:

Таким образом, конечная скорость электрона определяется напряжением между анодом и катодом. Так, например, при анодном напряжении $U = 200 \text{ В}$ конечная скорость электрона при $v_0 = 0$ достигнет $v = 600 \sqrt{200} \approx 845 \text{ км/с}$.

Найдем время пролета электрона между катодом и анодом. Так как $d = v_{\text{ср}} t$ (где $v_{\text{ср}} = (v_0 + v)/2 = v/2$) при $d = 5 \text{ мм}$, то $t = 2d/v = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-6}/845 \approx 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$.

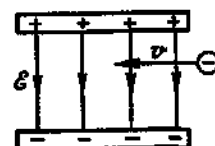
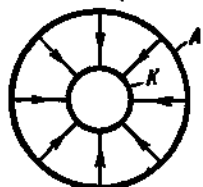
Если электроны двигаются против поля, что может иметь место при явлении вторичной эмиссии, то их скорость постепенно уменьшается в результате его тормозящего действия. Если начальная энергия электрона W_0 меньше, чем $q_0 U$, он потеряет скорость, не достигнув катода, и вернется на анод.

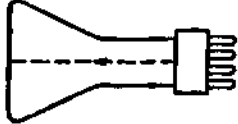
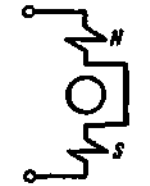
В случае неоднородного криволинейного электрического поля, что, например, имеет место между двумя цилиндрическими анодами в электронно-лучевой трубке (рис. 14.6), скорости электронов направлены по касательным к силовым линиям поля. Такое поле может быть использовано для фокусировки электронного потока. В некоторых электронных приборах, в том числе электронно-лучевых трубках, для управления электронами используется магнитное поле. Как было показано ранее, на электрон, движущийся в магнитном поле, действует сила Лоренца, направление которой определяется по правилу левой руки. Поэтому, например, для отклонения электронного луча по горизонтали и вертикали в электронно-лучевых трубках нужно применять поперечное магнитное поле, которое изменяется по пилообразному закону.

Карточка № 14.3 (256)

Движение электронов в электрическом и магнитном полях

На данном рисунке приведен поперечный разрез электронного анода. Является ли электрическое поле между анодом и катодом однородным?	Поле почти однородно	42
	Поле однородное	129
	Поле неоднородное	34
Чем определяется конечная скорость электрона (скорость столкновения с анодом), когда $v_0 = 0$, при движении в поле, приведенном в предыдущем вопросе?	Напряжением и расстоянием между электродами	85
	Напряжением между электродами и конфигурацией поля	6
	Только напряжением между электродами	92
Электрон влетает под прямым углом в однородное электрическое поле. По какой траектории он будет двигаться в дальнейшем?	Будет двигаться прямолинейно	36
	Будет двигаться по окружности	61
	Будет двигаться по параболе	75



На рисунке схематично показан продольный разрез электронно-лучевой трубки с электронным лучом. Как надо расположить отклоняющие катушки, чтобы обеспечить горизонтальное отклонение луча в правую сторону экрана? (На рисунках справа трубка повернута экраном к наблюдателю.) 		66
		141
		48
		58
Известно, что электрическое поле в электронных приборах используют для ускорения электронов. Можно ли использовать для этой цели магнитное поле?	Да	35
	Нет	114
	Можно в отдельных случаях	24

§ 14.5. ДИОДЫ

Устройство и принцип действия. Диод представляет собой электронную лампу, имеющую два электрода: катод и анод.

Диод, применяемый как выпрямитель переменного тока, называют кенотроном. Он может выполнять ряд других важных преобразовательных функций, на которых не будем останавливаться в данном учебном пособии.

Конструктивно вакуумный диод оформлен в виде стеклянного или металлического баллона (рис. 14.7), внутри которого создан высокий вакуум (10^{-6} Па $\approx 10^{-7}$ мм рт. ст.). В баллоне размещают два электрода: анод (А) и катод (К). Катод, как было установлено, является источником свободных электронов,

анод служит приемником испускаемых катодом электронов. Его изготавливают из никеля, молибдена или тантала.

Для выяснения принципа действия диода воспользуемся схемой (рис. 14.8, а). С потенциометра R_p

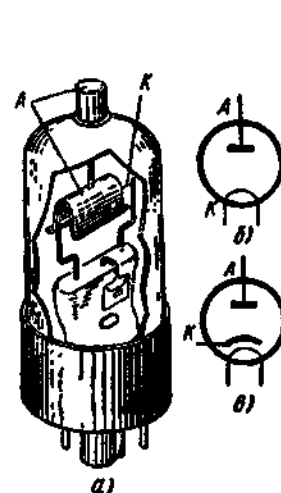


Рис. 14.7. Устройство (а) и условное обозначение электронного диода с катодом прямого накала (б) и косвенного накала (в)

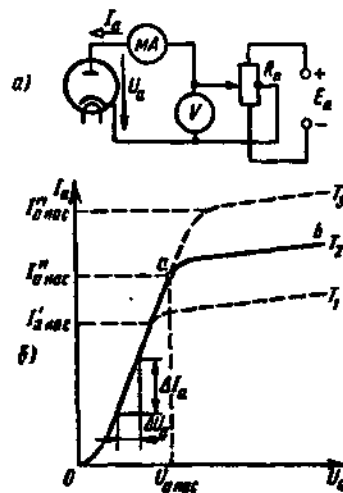


Рис. 14.8. Схема для снятия вольт-амперной характеристики диода (а), вольт-амперная характеристика диода с активированным катодом при различных температурах катода (б)

на участок анод — катод диода подается напряжение U_a , называемое анодным. Когда это напряжение положительно, между анодом и катодом создается ускоряющее электрическое поле. Под его действием электроны, испускаемые катодом, устремляются на анод, замыкая цепь анодного тока I_a . Необходимо иметь в виду, что здесь использовано условное направление тока.

Если анодное напряжение отрицательно, электрическое поле между анодом и катодом становится для электронов тормозящим и практически ни один электрон электронного облака, возникающего вокруг катода, не попадает на анод. Цепь анодного тока разорвана, и $I_a = 0$. Отсюда следует важный вывод: диод обладает свойством односторонней проводимости.

Для расчета схем, в которых применяют диоды, необходимо использовать вольт-амперные характеристики (рис. 14.8, б). Ход характеристики объясняется следующим. При отсутствии анодного напряжения анодный ток лампы равен нулю, хотя вокруг катода и существует электронное облако. С увеличением анодного напряжения U_a анодный ток увеличивается и электронное облако рассасывается. Точка а характеристики соответствует такому режиму работы, когда анодный ток оказывается равным эмиссионному току, т. е. электронное облако полностью рассосалось. Для диодов с простыми катодами этот ток называется током насыщения. Ему соответствует анодное напряжение $U_{a \text{ нас.}}$.

Для изменения тока насыщения необходимо менять температуру катода. Активированные катоды не имеют ярко выраженного участка насыщения характеристики (участок *ab*, рис. 14.8, б).

Параметры диодов. Внутреннее сопротивление $R_i = \Delta U_a / I_a$, т. е. отношение приращения анодного напряжения к приращению анодного тока на рабочем участке характеристики (участок *Oa*, рис. 14.8, б). Для выпрямительных ламп (кенотронов) его значения порядка нескольких сотен ом.

Допустимая мощность рассеяния на аноде $P_{a \text{ доп}}$ выделяется при бомбардировке его электронами и при разогревании анода до некоторой допустимой температуры. Превышение $P_{a \text{ доп}}$ может привести к расплавлению анода. Для современных анодов $P_{a \text{ доп}}$ колеблется в пределах от долей ватт до десятков ватт.

Максимальный анодный ток $I_{a \text{ max}}$ ограничен током эмиссии катода, а также перегревом катода и анода. Значения $I_{a \text{ max}}$ обычно лежат в пределах от 0,01 до 1 А.

Максимальное обратное напряжение $U_{обр \text{ max}}$ — это такое максимальное анодное напряжение обратной полярности, при котором еще не наступает пробой промежутка между анодом и катодом. Оно зависит от электрической прочности диода и лежит в пределах от десятков вольт до десятков киловольт.

Типы ламповых баллонов и система обозначений электронных ламп. По размерам и типу баллоны подразделяются на обычные с октальным цоколем и без

цоколя, а также на миниатюрные пальчиковые и сверхминиатюрные бесцокольные (рис. 14.9). Обычные цокольные лампы снабжены восьмиштырьковым (октальным) цоколем, служащим для соединения лампы с панелью (рис. 14.10, а). Выводы от электродов лампы припаиваются к штырькам цоколя, которые равномерно расположены по периферии. Правильное соедине-

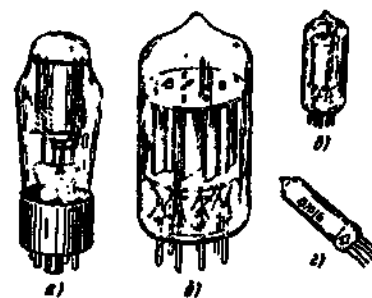


Рис. 14.9. Общий вид современных ламп:
а — с октальным цоколем; б — обычная бесцокольная; в — пальчиковая бесцокольная; г — сверхминиатюрная



Рис. 14.10. Цоколевка диодов:
а — октальный цоколь; б — ламповая панель — октальная;
в — нумерация штырьков на октальном цоколе; г — расположение штырьков у бесцокольной лампы; д — двойного диода 6Х6С

ние лампы с панелью обеспечивается ключом. Ключ — пластмассовый штырь с выступом, укрепленный в центре цоколя. В центре ламповой панели имеется отверстие соответствующей конфигурации (рис. 14.10, б). Штырьки нумеруются от выступа по часовой стрелке (рис. 14.10, в).

Контактные штырьки бесцокольных ламп впрессованы в плоское стеклянное донышко баллона и расположены по окружности (рис. 14.10, г).

Правильное соединение лампы с панелью обеспечивается увеличенным интервалом между первым и последним штырьками.

У сверхминиатюрных ламп контактные штырьки отсутствуют, и соединение со схемой обеспечивается гибкими проводниками, идущими от электродов лампы (рис. 14.9, г).

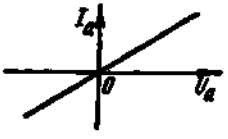
Электроды лампы соединяются со штырьками согласно цоколевке (рис. 14.10, д), которая приводится в справочниках по электронным лампам.

Обозначение диодов состоит из четырех элементов: первый — число, округленно указывающее напряжение накала лампы в вольтах; второй — буква условного обозначения типа лампы, например диод — Д; третий — число, указывающее порядковый номер разработки данного типа лампы; четвертый — буква, определяющая тип баллона, например С — стеклянный, К — керамический, П — пальчиковая лампа со стеклянным баллоном, Б — сверхминиатюрная лампа со стеклянным баллоном диаметром не более 5 мм, отсутствие четвертого элемента означает, что баллон лампы металлический.

Например: лампа 6Х6С. Это означает, что напряжение накала 6,3 В (6); Х — двойной диод, тип 6; С — баллон стеклянный обычных размеров.

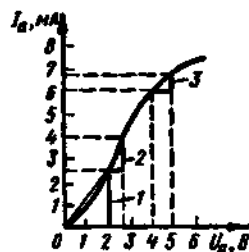
Карточка № 14.4 (212)

Диоды

Сколько выводов должен иметь диод с катодом косвенного накала?	4	143
	2	64
	3	106
Является ли диод линейным элементом цепи?	Да	40
	Нет	136
	Это зависит от значения приложенного напряжения	49
Какая из приведенных характеристик соответствует диоду с простым катодом?		25
		13
		83
		139

Продолжение

Каково обратное сопротивление диода постоянному току?	Близко к нулю	65
	Близко к бесконечности	124
	Зависит от значения обратного напряжения	18
Выберите треугольник приращений напряжения и тока, который правильно определяет R_i	3	52
	1	120
	2	70



§ 14.6. ТРИОДЫ

Устройство и принцип работы. Триодом называется электронная лампа, у которой в пространстве между анодом и катодом помещен третий электрод (управляющий) — сетка. Триоды служат для усиления и генерирования переменных напряжений и токов, а также для усиления медленно меняющихся напряжений (усилитель постоянного тока).

Конструктивно триод оформлен, как и диод, в виде стеклянного или металлического баллона с высоким вакуумом. Внутри баллона помещены электроды: анод А, катод К и управляющая сетка С (рис. 14.11, а). Управляющая сетка, как правило, выполняется в виде спирали из тонкой тугоплавкой проволоки и служит для управления плотностью потока электронов, летящих от катода к аноду. На рис. 14.11, б приведено условное обозначение триода.

Для выяснения принципа действия триода рассмотрим работу схемы, изображенной на рис. 14.12. С потенциометра $R_{на}$ на участок анод — катод лампы подают положительное напряжение $U_{на}$. С потенциометра $R_{сн}$ на участок сетка — катод лампы подают сеточное напряжение, полярность которого может изменяться. Таким образом, на электроны потока действу-

ют результирующее электрическое поле анода и сетки. Однако действие поля сетки гораздо сильнее, так как расстояние между сеткой и катодом в сто раз меньше, чем расстояние между анодом и катодом. Следовательно, при изменении сеточного напряжения в

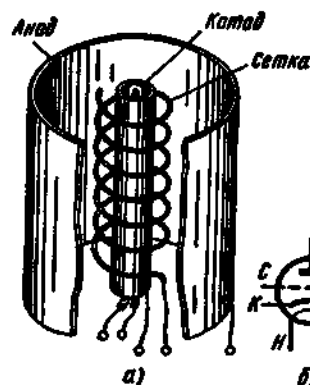


Рис. 14.11. Устройство (а) и условное обозначение (б) электронного триода

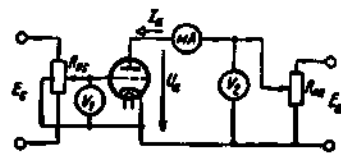


Рис. 14.12. Схема для снятия характеристики триода

небольших пределах количество электронов, попадающих на анод, а значит, и анодный ток I_a , сильно изменяются. Для расчетов схем с применением триодов, а также для определения их параметров используют характеристики триодов.

Характеристики триодов. Анодно-сеточная характеристика — это зависимость анодного тока I_a от сеточного напряжения U_c при анодном напряжении $U_a = \text{const}$ (рис. 14.13). Характеристику снимают с помощью установки, схема которой показана на рис. 14.12. При фиксированном значении U_a , например $U_a = 150$ В, изменяют значение U_c с помощью потенциометра $R_{\text{н}}$, снимая показания приборов V_1 и mA . При некотором отрицательном напряжении $U_{c\text{зап}}$ (рис. 14.13) $I_a = 0$, т. е. триод заперт по анодному току. При уменьшении отрицательного напряжения на сетке анодный ток растет в результате компенсации действия отрицательного объемного заряда суммарным полем анода и сетки. При некотором положительном напряжении на сетке действие пространственного заряда полностью нейтрализуется и наступает режим насыщения, аналогичный режиму насыщения диода.

Установив другое значение анодного напряжения U_a , (например, $U_a = 200$ В) и снова изменяя на-

пряжение U_c , получим еще одну характеристику. Совокупность таких характеристик образует семейство анодно-сеточных характеристик.

Анодная характеристика — это зависимость I_a от U_a при $U_c = \text{const}$ (рис. 14.14). Характе-

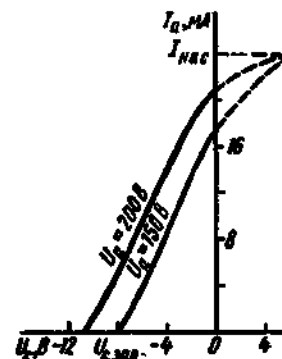


Рис. 14.13. Семейство анодно-сеточных характеристик

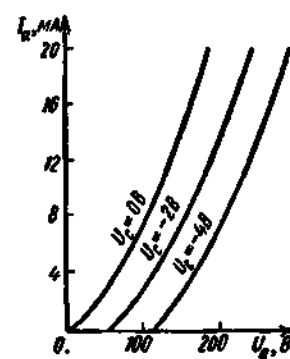


Рис. 14.14. Семейство анодных характеристик

ристику также снимают с помощью установки, показанной на схеме (см. рис. 14.12). Но теперь фиксируется U_c , а U_a меняется потенциометром $R_{\text{на}}$. Несколько характеристик, снятых при различных значениях U_c , образуют семейство анодных характеристик. Анодные характеристики определяют управляющее действие анодного напряжения на анодный ток лампы.

Карточка № 14.5а (230)
Триоды (устройство, принцип действия, характеристика)

Обладает ли триод свойством односторонней проводимости?	Да	130
	Нет	31
	Это зависит от напряжения на сетке	133
Как повлияет увеличение плотности витков сетки на напряжение запирания лампы	Напряжение станет более отрицательным	88
	Напряжение не изменится	27
	Напряжение станет менее отрицательным	113

Продолжение

Как изменится положение анодной характеристики при данном сеточном и анодном напряжении, если расстояние между анодом и катодом уменьшить?	Положение характеристики не изменится	8
	Характеристика сдвинется вправо	11
	Характеристика сдвинется влево	94
В результате чего изменится анодный ток при изменении напряжения на сетке?	В результате изменения скорости электронов	23
	В результате изменения количества электронов в потоке	115
	В результате изменения как скорости, так и количества электронов в потоке	47
Какое поле сильнее влияет на анодный ток лампы?	Анодное	32
	Сеточное	78
	Это зависит от взаимного расположения анода и сетки	2

Параметры триодов. Крутизна анодно-сеточной характеристики S определяется на линейном участке анодно-сеточной характеристики триода (рис. 14.15) и показывает, на сколько миллиампер изменится анодный ток лампы при изменении сеточного напряжения на 1 В при неизменном анодном напряжении:

$$S = \Delta I_a / \Delta U_c \text{ при } U_a = \text{const.}$$

Крутизна характеристики количественно определяет управляющие способности сетки и зависит в основном от следующих факторов: эмиссионной способности катода, плотности витков сетки, расстояния между сеткой и катодом. У современных триодов S лежит в пределах от 1 до 30 мА/В.

Внутреннее сопротивление переменному току R_i определяется на линейном участке анодной характеристики триода (рис. 14.16) и показывает, на сколько вольт надо изменить анодное напря-

жение, чтобы анодный ток изменился на 1 А при неизменном сеточном напряжении:

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I_a \text{ при } U_c = \text{const.}$$

Величина, обратная внутреннему сопротивлению, количественно определяет управляющие действия ано-

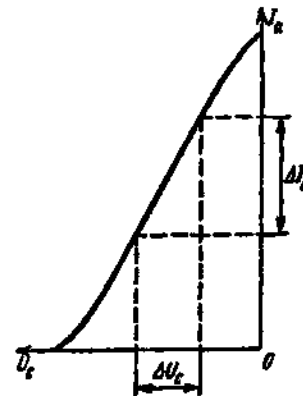


Рис. 14.15. Характеристика для определения S

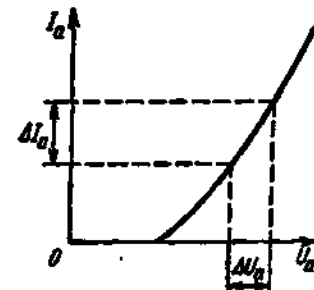


Рис. 14.16. Характеристика для определения R_i

да. Внутреннее сопротивление R_i зависит от электрических и конструктивных параметров лампы, в частности от плотности управляющей сетки, расстояния между анодом и катодом. У современных триодов R_i лежит в пределах от 0,5 до 100 кОм.

Коэффициент усиления лампы определяется числом μ , которое показывает, на сколько изменение сеточного напряжения действует на анодный ток сильнее, чем изменение анодного напряжения:

$$\mu = -\Delta U_a / \Delta U_c \text{ при } I_a = \text{const.}$$

Так как ток I_a должен оставаться неизменным, увеличению U_c соответствует уменьшение U_a и поэтому в формуле (14.4) появился знак минус.

Коэффициент усиления можно определить как по семейству анодных, так и по семейству анодно-сеточных характеристик. Определим μ по семейству анодно-сеточных характеристик (рис. 14.17). При данном напряжении на сетке U'_c переходим из точки А в точку В. Это соответствует изменению анодного напряжения от U'_a до значения U''_a и соответственно при-

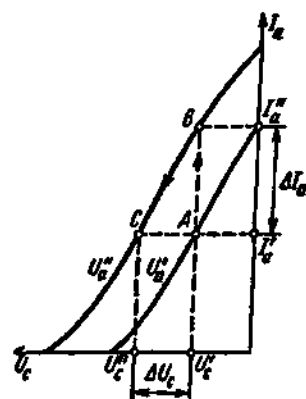


Рис. 14.17. Характеристики для определения μ

ращению анодного тока $\Delta I_a = I_a' - I_a$. Теперь из точки B переходим в точку C , т. е. изменяем сеточное напряжение, не меняя анодного, так чтобы анодный ток принял прежнее значение I_a .

В результате получим

$$\mu = -(U_a' - U_a) / (U_g' - U_g).$$

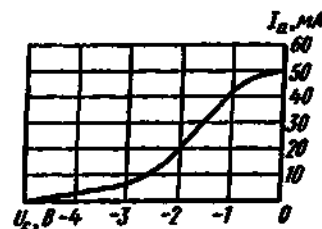
Для современных триодов $\mu = 10 \div 30$.

Рассмотренные параметры триодов связаны соотношением $\mu = SR_i$, так как, подставив выражения для μ , S и R_i , получим тождество

$$\frac{\Delta U_a}{\Delta U_g} = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}.$$

Карточка № 14.56 (176)
Триоды (параметры)

Определить крутизну характеристики S на основании приведенной здесь анодно-сеточной характеристики



По каким из указанных характеристик нельзя определить R_i ?

7 мА/В	90
4 мА/В	67
20 мА/В	103
Семейство анодно-сеточных характеристик	119
Семейство анодных характеристик	82
Анодно-сеточная характеристика (одна)	56
Анодная характеристика (одна)	131

Продолжение

Какая из приведенных мер не окажет влияния на крутизну анодно-сеточной характеристики лампы?	Изменение плотности витков лампы	112
	Изменение расстояния между сеткой и катодом	19
	Изменение размеров катода	9
	Изменение напряжения на аноде	4
От чего зависит коэффициент усиления лампы μ ?	Только от S	38
	Только от R_i	91
	И от S , и от R_i	60
Как повлияет увеличение расстояния между анодом и катодом на значение R_i ?	R_i уменьшится	95
	R_i не изменится	15
	R_i увеличится	53

Понятие о динамическом режиме работы триода. На рис. 14.18 показана схема каскада, который служит для усиления входного напряжения по амплитуде. Источником входного напряжения может быть, например, звукосниматель, микрофон и т. д. Для простоты будем считать входное напряжение синусоидальным. На участке сетка — катод лампы с момента t_1 действует пульсирующее отрицательное напряжение u_c (рис. 14.19, а), постоянная составляющая которого — E_c создается специальным источником и обеспечивает работу лампы в пределах линейной части анодно-сеточной характеристики. Сеточных токов, возникающих при положительном напряжении на сетке за счет перехвата отдельных электронов, в данном случае нет.

При отсутствии входного напряжения $u_{вх}$ до момента времени t_1 — на сетке действует только — E_c и в анодной цепи проходит постоянный ток I_{a0} (рис. 14.19, б), что соответствует режиму покоя.

С момента t_1 на сетку лампы подается входное напряжение $u_{вх}$ и усилитель работает в колебательном режиме. В результате этого анодный ток лампы пульсирует (рис. 14.19, б), повторяя при этом форму сеточного напряжения.

Проходя по резистору R_n , анодный ток i_a выделяет пульсирующее напряжение u_{Ra} (рис. 14.19, в). Переменная составляющая этого напряжения с амплитудой

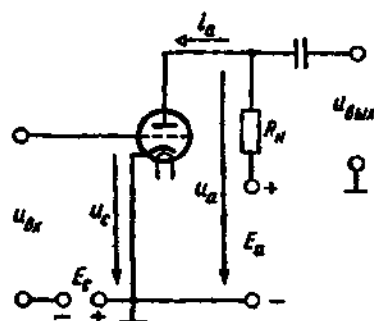


Рис. 14.18. Простейшая схема усилителя на триоде

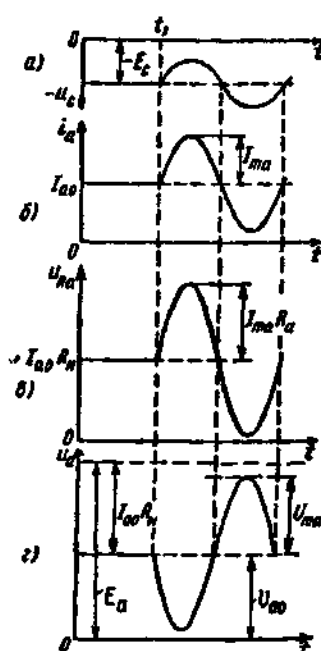


Рис. 14.19. Временная диаграмма усилителя на триоде

$U_{ma} = I_{ma} R_n$ представляет собой полезное усиленное напряжение $u_{вых}$. Действительно,

$$U_{ma} = U_{m \text{ вых}} = I_{ma} R_n = S U_{m \text{ вх}} R_n,$$

откуда $U_{m \text{ вых}} / U_{m \text{ вх}} = S R_n$. При соответствующем выборе R_n значение $S R_n$ может превышать единицу на порядок и более.

В процессе изменения анодного тока меняется анодное напряжение u_a , так как $u_a = E_a - i_a R_n$ (рис. 14.19, г). При этом, когда напряжение на сетке увеличивается, анодное напряжение уменьшается. Это очень важное обстоятельство, так как анодный ток зависит не только от сеточного, но и от анодного напряжения. В результате того что анодное и сеточное напряжения находятся в противофазе, поле анода оказывает на анодный ток деуправляющее действие, т. е. пульсация анодного тока уменьшается, а следо-

вательно, уменьшается и амплитуда выходного напряжения.

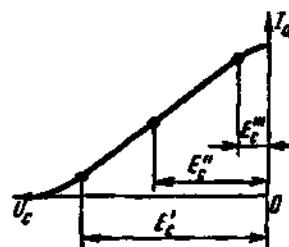
Недостатки триода. Во-первых, недостатком триода является относительно малый коэффициент усиления μ . Это объясняется большим деуправляющим действием анода, так как управляющая сетка слабо экранирует пространство между сеткой и катодом от действия поля анода на электронный поток.

Во-вторых, триоды имеют большую междузлектронную емкость C_{ac} (емкость между анодом и управляющей сеткой), которая вредно влияет на работу триода на высоких частотах за счет образования паразитной обратной связи между анодной и сеточной цепями. Такая связь является причиной самовозбуждения усилителя. Это означает, что вместо усиления полезного сигнала каскад начинает генерировать вредные колебания.

Условное обозначение триодов аналогично принятому для диодов. В качестве примера приведем условное обозначение лампы 6С15П: напряжение накала 6,3 В, С — одиночный триод типа № 15, П — баллон стеклянный пальчиковый.

Карточка № 14.5а (230)
Триоды (понятие о динамическом режиме триода).
Недостатки триода

Выберите постоянное отрицательное напряжение E_c , чтобы обеспечить режим работы усиления без искажений	E_c	69
	E_c''	79
	E_c'	138
	Любое	97
Выберите правильное и оптимальное соотношение между I_{ma} и I_{a0} (рис. 14.19)	$I_{ma} > I_{a0}$	121
	$I_{ma} < I_{a0}$	71
	$I_{ma} \approx I_{a0}$	84



С какого участка схемы (см. рис. 14.18) снимают усиленное напряжение?	Только с участка анод — катод	102
	Только с сопротивления нагрузки	100
	Оба способа эквивалентны	111
Увеличение плотности витков сетки приводит к увеличению усилительных свойств лампы. Однако эта мера приводит к некоторому существенному недостатку. Какому?	Уменьшению анодного тока	7
	Смещению анодно-сеточных характеристик вправо и появлению сеточных токов	125
	Ослаблению действия поля анода на электронный поток	116
Какой фактор обуславливает малый коэффициент усиления триода μ ?	Слабое действие управляющей сетки	51
	Сильное деуправляющее действие анодного поля	72
	Невозможность получения большого анодного тока	1

§ 14.7. ТЕТРОДЫ

Четырехэлектродная лампа (тетрод) имеет две сетки: управляющую и экранирующую. Экранирующая расположена между анодом и управляющей сеткой и выполнена в виде плотной спирали. На рис. 14.20 она обозначена C_2 , а управляющая сетка — C_1 .

Для того чтобы уяснить роль экранирующей сетки, рассмотрим работу схемы усилителя на тетроде (рис. 14.21). На экранирующую сетку подается постоянное положительное напряжение, составляющее примерно $0,5 E_a$. По переменному напряжению экранирующая сетка заблокирована емкостью $C_{\text{ан}}$. Переменное электрическое поле анода в основном замыкается на экранирующую сетку. В результате его деуправляющее действие на электронный поток резко снижено и, следовательно, усилительные свойства тетрода значительно выше, чем у триода.

Одновременно с этим значительно уменьшается вредная емкость анод — управляющая сетка, так как

число силовых линий анодного поля, попадающих на управляющую сетку, также сокращается.

Таким образом, недостатки, присущие триоду, в тетроде отсутствуют. Однако появление экранирующей сетки приводит к возникновению нового недостатка, связанного с династическим эффектом, суть которого заключается в следующем.

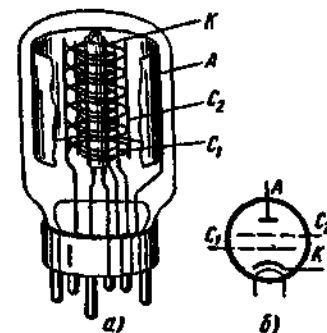


Рис. 14.20. Устройство (а) и условное обозначение (б) тетрода

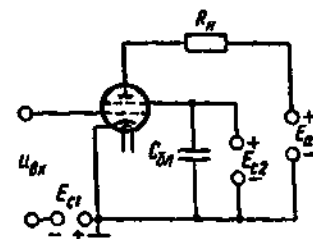


Рис. 14.21. Схема усилителя на тетроде

При некоторой скорости электронов, летящих на анод, из анода выбиваются вторичные электроны. При определенном соотношении между напряжением на аноде и экранирующей сетке вторичные электроны притягиваются этой сеткой. Это вызывает уменьшение анодного тока при одновременном увеличении тока экранирующей сетки, т. е. на анодной характеристике тетрода появляется провал (рис. 14.22). Это приводит к искажению формы усиливаемого сигнала, что весьма нежелательно.

В результате практическое применение тетродов в качестве усилительных ламп ограничено.

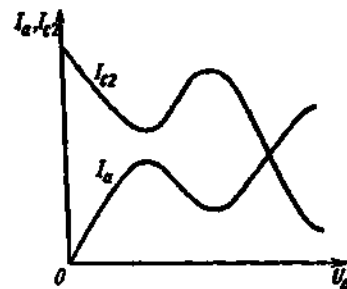


Рис. 14.22. Анодная характеристика и характеристика тока экранирующей сетки

Карточка № 14.6 (150)
Тетроды (динатронный эффект)

Какова роль второй сетки в тетроде?	Управлять анодным током	105
	Перехватывать часть электронов, летящих на анод	5
	Экранировать электронный поток от действия анодного поля	14
За счет чего происходит увеличение коэффициента усиления в тетроде?	За счет увеличения крутизны S	142
	За счет увеличения внутреннего сопротивления R_i	110
	За счет увеличения μ и S , и R_i	101
К каким последствиям приведет устранение $C_{\text{вн}}$ в схеме усилителя на тетроде (рис. 14.21)?	К уменьшению экранирующего действия C_2	26
	Поле экранной сетки будет оказывать вредное деуправляющее действие на анодный ток	98
	К уменьшению анодного тока	87
При каком соотношении U_a и U_{c2} динатронный эффект не возникает?	$U_a < U_{c2}$	74
	$U_a > U_{c2}$	104
	$U_a \approx U_{c2}$	54
Каким способом можно было бы устранить динатронный эффект?	Уменьшить напряжение на экранной сетке	59
	Сделать витки экранирующей сетки как можно реже	17
	Ввести еще одну сетку между анодом и экранирующей сеткой, соединив ее с катодом	33

§ 14.8. ПЕНТОДЫ. ЛУЧЕВЫЕ ТЕТРОДЫ

Для того чтобы устранить динатронный эффект, необходимо создать тормозящее поле в пространстве между анодом и экранирующей сеткой. Это поле обеспечит возвращение вторичных электронов на анод.

Существует два способа создания тормозящего поля в пространстве между анодом и экранирующей сеткой. Первый заключается в том, что между анодом и экранирующей сеткой размещается еще одна сетка (рис. 14.23), соединенная, как правило, с катодом и поэтому обладающая отрицательным потенциалом относительно анода. Третья сетка называется защитной или антидинатронной и конструктивно выполняется так же, как управляющая или экранирующая.

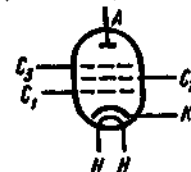


Рис. 14.23. Условное изображение пентода

В пентоде вторичные электроны, летящие от анода с малой скоростью, возвращаются тормозящим полем защитной сетки обратно на анод. Следовательно, динатронный эффект полностью отсутствует. Наряду с этим наличие дополнительной сетки приводит к еще большему экранированию от анодного поля электронного потока в пространстве между катодом и управляющей сеткой. Это вызывает значительное увеличение внутреннего сопротивления R_i , а следовательно, и коэффициента усиления μ . Одновременно с этим значительно снижается емкость между анодом и управляющей сеткой C_{ac1} . У пентодов значения R_i обычно порядка 1—2 м·Ом; μ достигает 1000 и более; $C_{ac1} = 0,002 \div 0,005$ пФ.

В лучевых тетроды динатронный эффект устраняют вторым способом, который основан на использовании пространственного заряда большей плотности, создаваемого электронным потоком между экранной сеткой и анодом. Электронный поток большой плотности создают за счет особой конструкции лампы. Во-первых, управляющая и экранирующая сетки имеют одинаковый шаг, причем их витки расположены друг против друга (рис. 14.24, а). В результате этого электроны летят от катода к аноду уплотненными «лучами», как показано на рис. 14.24, а. Во-вторых, в лампе имеются специальные экраны Э (рис. 14.24, б, в), соединенные с катодом, в результате чего электронный поток сжимается в два сектора, как это показано на

рис. 14.24, б, и его плотность значительно увеличивается. Таким образом, попадание вторичных электронов на экранирующую сетку практически исключено.

Необходимо заметить, что экранирующая сетка в лучевом тетроде не может быть очень плотной.

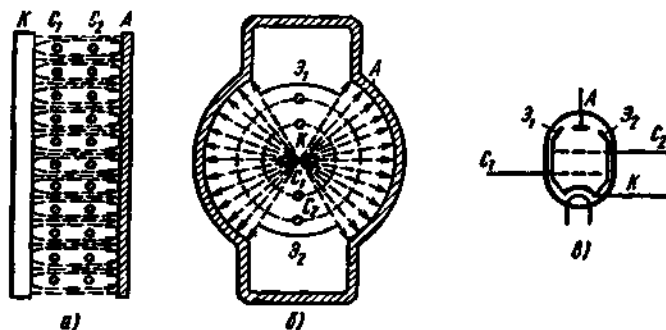


Рис. 14.24. Лучевой тетрод:
а — взаимное расположение сеток; б — поперечный разрез лампы;
в — условное изображение

Поэтому емкость $C_{ак1}$ относительно большая, порядка 0,3—1 пФ. По этой же причине невелики внутреннее сопротивление R_i и коэффициент усиления μ . Внутреннее сопротивление R_i имеет значения порядка десятков килоом, μ около 100.

В заключение приведем условные обозначения: лампа 6К7 — напряжение 6,3 В; К — пентод, тип № 7, баллон металлический; 6П45С — напряжение 6,3 В; П — лучевой тетрод, тип № 45; С — баллон стеклянный.

Карточка № 14.7 (243)
Пентоды. Лучевые тетроды

Каково соотношение между скоростью первичных и вторичных электронов v_1 и v_2 ?	$v_1 \gg v_2$	118
	$v_1 > v_2$	41
	$v_1 \approx v_2$	77
	$v_1 < v_2$	12
Какое следствие, вызванное увеличением плотности и защитной сетки, не является вредным?	Уменьшение анодного тока	44
	Эффект отталкивания первичных электронов	46

Продолжение

Какое воздействие оказывает плотный электронный поток в лучевой тетроде на вторичные электроны?	Увеличение внутреннего сопротивления R_i	93
	Механическое	128
	Электрическое	134
Укажите правильное соотношение между внутренними сопротивлениями пентода R_{in} и лучевого тетрода R_{it}	И механическое, и электрическое	126
	$R_{in} \approx R_{it}$	135
	$R_{in} < R_{it}$	109
Какая из ламп, рассмотренных нами, составляет принципиальную основу всех других?	$R_{in} > R_{it}$	10
	Дюда	20
	Тетрод	3
	Пентод	117
	Триод	96
	Лучевой тетрод	123

§ 14.9. МНОГОЭЛЕКТРОДНЫЕ И КОМБИНИРОВАННЫЕ ЛАМПЫ

Многоэлектродные лампы имеют четыре сетки и более. При этом две сетки являются управляющими, т. е. позволяют осуществлять одновременно двойное управление анодным током. Такое управление используют, например, в преобразователях частоты приемных устройств. На рис. 14.25 показано условное обозначение пятисеточной лампы — гептода, в котором сетки C_1 и C_3 являются управляющими, C_2 и C_4 — экранирующими, а C_5 — защитная.

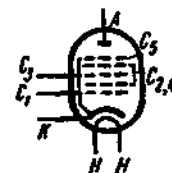


Рис. 14.25. Условное изображение пентода

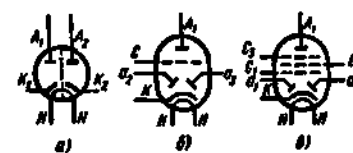


Рис. 14.26. Условное изображение комбинированных ламп:
а — двойной дюда; б — двойной дюда—триод; в — двойной дюда—пентод

Широко применяются также комбинированные лампы, использование которых дает возможность уменьшать габариты электронных устройств. При этом упрощается монтаж и снижается стоимость всего устройства. Комбинированная лампа состоит из нескольких ламп, размещенных в одном баллоне, причем каждая лампа выполняет самостоятельные функции. На рис. 14.26 приведены условные обозначения некоторых комбинированных ламп.

Для комбинированных ламп установлены следующие обозначения: Х — двойной диод, Н — двойной триод, Г — двойной диод — триод, Б — двойной диод — пентод, А — гектод.

ГЛАВА 15

ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ

§ 15.1. ОСНОВНЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ГАЗЕ

Принцип действия газоразрядных или ионных приборов основан на физических процессах, протекающих при прохождении электрического тока через газ. Прохождение тока через газовую среду называют газовым разрядом. При этом ток создается не только направленным перемещением электронов, но и встречным движением ионов.

Различают несамостоятельный и самостоятельный газовые разряды. Если заряженные частицы в разрядном промежутке образуются за счет внешних факторов (нагрев катода, радиоактивное облучение и т. д.), то газовый разряд называют *несамостоятельным*. Если газовый разряд поддерживается только за счет энергии электрического поля, возникающего при подаче напряжения на электроды, то разряд называют *самостоятельным*.

Возникновение и особенности основных видов газового разряда удобно проследить, анализируя зависимость между напряжением на электродах и током в цепи газоразрядной трубки (вольт-амперную характеристику). Схема для получения такой зависимости приведена на рис. 15.1, а вольт-амперная характеристика газового разряда — на рис. 15.2.

С увеличением напряжения, подводимого к электродам газоразрядной трубки, ток протекающий

через нее, увеличивается, так как все большее количество свободных электронов и ионов, образующихся, например, при космическом облучении, достигает поверхности электродов. При напряжении в несколько вольт (точка *a*) уже все носители зарядов участвуют

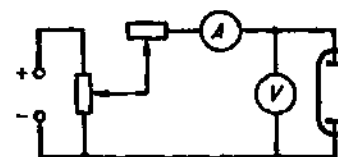


Рис. 15.1. Принципиальная схема установки для получения вольт-амперной характеристики газового разряда

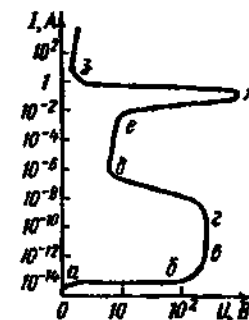


Рис. 15.2. Вольт-амперная характеристика газового разряда

в образовании тока и дальнейшее повышение напряжения до сотни вольт (участок *аб*) не приводит к увеличению *I*. Этот ток, называемый *током насыщения*, зависит от интенсивности ионизирующих факторов и конструктивных особенностей газоразрядной трубки. Его значение порядка 10^{-14} А. При дальнейшем увеличении напряжения скорость дрейфа электронов навстречу электрическому полю (к аноду) возрастает и они приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул газа при столкновениях. Количество заряженных частиц в газовой среде растет, что приводит к новому увеличению тока (участок *бв*). При этом скорость дрейфа положительных ионов к катоду возрастает настолько, что ионы, попадая на катод, могут, в свою очередь, выбить из него электроны. Точка *в* соответствует такому состоянию процесса, когда излученные катодом электроны порождают столько ионов, что они, падая на катод, вновь выбивают не меньшее количество электронов. При этом разряд из несамостоятельного переходит в самостоятельный и способен поддерживаться в отсутствие внешней ионизации.

Напряжение, при котором возникает самостоятель-

ный разряд, зависит от многих факторов. Чтобы снизить это напряжение, в некоторых ионных приборах катод покрывают веществами, уменьшающими работу выхода электронов (оксидами бария, цезия и др.).

На участке *вг* ток возрастает при постоянном напряжении только за счет размножения носителей заряда. На участке *гд* лавинообразный рост количества заряженных частиц приводит к тому, что увеличение тока сопровождается снижением напряжения на электродах.

Участок *абвг* соответствует темному разряду, который можно наблюдать только по показаниям амперметра.

На участке *гд* осуществляется переход к тлеющему разряду. Насыщение разрядного промежутка большим количеством положительных ионов вызывает большой перепад потенциалов в небольшой области, непосредственно примыкающей к катоду. Это создает большую напряженность электрического поля вблизи поверхности катода. Именно в этой области электроны приобретают значительную энергию и интенсивно ионизируют газ. Одновременно с ионизацией идет процесс рекомбинации: часть ионов захватывает электроны и превращается в нейтральные молекулы. Процесс рекомбинации сопровождается излучением квантов света, и газ начинает светиться.

Поверхность катода всегда имеет небольшие структурные неоднородности, вблизи которых интенсивность ионизации газа несколько различна. Локальное увеличение ионизации вызывает некоторое повышение температуры малого участка катода, что приводит к дальнейшему возрастанию количества ионов над этим участком. В результате разряд «стягивается» в трубку, основание которой размещается на ограниченном (рабочем) участке катода. Тонкий слой светящегося газа над этим участком образует катодное пятно.

Интервал *де* вольт-амперной характеристики соответствует нормальному тлеющему разряду. Особенность этого разряда заключается в том, что рост тока происходит только за счет увеличения площади катодного пятна (при постоянной плотности тока).

В точке *е* катодное пятно захватывает всю площадь катода и для дальнейшего роста тока необходимо снова увеличивать напряжение (участок *еж*). Разряд, соответствующий этому интервалу вольт-амперной

характеристики, называется аномальным тлеющим разрядом.

В точке *ж* напряженность электрического поля вблизи катода достигает значений порядка 10^8 В/м, при этом становится возможной автоэлектронная эмиссия, т. е. вырывание электрическим полем электронов из анода. Возникает дуговой разряд, сопровождаемый резким увеличением тока при снижении напряжения на электродах до нескольких вольт (точка *з*). Образуется яркое катодное пятно дугового разряда, и последующий рост тока происходит за счет увеличения площади этого пятна.

Если токи тлеющего разряда измеряются единицами миллиампер, то токи дугового разряда — десятками и сотнями ампер. Поэтому при работе в режиме дугового разряда в цепь газоразрядной трубки должно быть включено ограничительное сопротивление (см. рис. 15.1). Без этого сопротивления небольшие колебания питающего напряжения могут привести к такому росту тока, что катод расплавится.

Кроме напряжения на ток газоразрядной трубки существенно влияют состав и плотность газа-наполнителя, размеры и конфигурация электродов, расстояние между электродами и материал, из которого они изготовлены.

Следует отметить, что в технике высоких напряжений в линиях электропередачи существенную роль играют другие виды разрядов, в частности коронный и искровой.

Карточка № 15.1 (200)
Основные разновидности электрических разрядов в газе

Чем принципиально отличается самостоятельный разряд от несамостоятельного?	Причинами, вызывающими появление заряженных частиц в разрядном промежутке	1
	Значением напряжения на электродах	21
	Вольт-амперной характеристикой	41
Почему ток на участке <i>аб</i> (см. рис. 15.2) практически не увеличивается?	Энергия заряженных частиц недостаточна для ионизации молекул газа	61
	Потому, что ток равен току насыщения	81

Почему в точке δ (см. рис. 15.2) ток начинает расти при постоянном и даже снижающемся напряжении?	Вследствие эмиссии электронов из катода	2
	Вследствие размножения заряженных частиц при столкновении с молекулами газа	22
	Вследствие двух указанных выше факторов	42
Почему в точке δ (см. рис. 15.2) газ начинает светиться?	Так как существенно увеличивается интенсивность ионизации молекул газа	62
	Так как существенно увеличивается интенсивность рекомбинации молекул газа	82
Почему после образования катодного пятна (при тлеющем или дуговом разряде) ток увеличивается почти при неизменном напряжении?	Увеличивается скорость ионизации молекул	3
	Увеличивается площадь катодного пятна	23
	Увеличивается плотность тока	43

§ 15.2. ГАЗОТРОН

Газотрон (или газотронный вентиль) представляет собой двухэлектродный газоразрядный прибор, работающий в режиме несамостоятельного дугового разряда.

Если электровакуумные диоды рассчитаны на работу при сравнительно небольших токах, измеряемых единицами или десятками миллиампер, а применение полупроводниковых диодов, способных работать при больших токах, ограничено пробивным напряжением в несколько киловольт, то газотрон может работать при токах в сотни ампер и обратных напряжениях в десятки киловольт.

Катод газотрона подогревается от постороннего источника и обеспечивает термоэмиссию электронов.

Материалом для катода служит тугоплавкий металл (обычно вольфрам), который активируют барием или цезием. Анод изготавливают из металла или графита.

Термоэлектронная эмиссия катода обеспечивает газотрону одностороннюю проводимость: при прямом включении прибора, когда плюс источника напряжения подводят к аноду, а минус — к катоду, эмиттированные электроны устремляются к аноду и в цепи возникает ток; при обратной полярности ток отсутствует, так как анод не подогревается и электронов не излучает.

Электроды размещают в баллоне, заполненном инертным газом или парами ртути. Под действием напряжения, приложенного в проводящем направлении, эмиттированные электроны разгоняются и приобретают энергию, необходимую для ионизации молекул газа. Образовавшиеся при ионизации электроны вместе с эмиттированными движутся к аноду, а положительные ионы — к катоду. Попадая на катод, ионы выбивают вторичные электроны.

Следует отметить, что резкое возрастание ионного тока может привести к разрушению оксидного слоя катода. Чтобы не допустить роста тока выше определенного расчетного значения и предохранить катод от разрушения, последовательно с газотроном включают ограничительное сопротивление (иногда его роль может выполнять внутреннее сопротивление источника питания).

Падение напряжения в проводящем газотроне мало зависит от тока и составляет около 10 В.

Основная область применения газотронов — выпрямление переменных токов в высоковольтных цепях. Срок службы газотронных вентилях с ртутным наполнением достигает 5000 ч. Относительно малое падение напряжения в проводящем направлении (сотые доли процента от выпрямляемого напряжения) и очень малые обратные токи делают эти приборы весьма экономичными.

В схемах двухполупериодного выпрямления удобно применять двойные газотроны, у которых в одном баллоне размещается два анода и два катода.

Существенным недостатком мощных газотронов является большая тепловая инерция, выражающаяся в том, что для разогревания катода до рабочей температуры требуется около 30 мин.

Карточка № 15.2 (184)
Газотрон

Укажите основное преимущество газотрона перед: а) ламповым диодом; б) полупроводниковым диодом	а), б) Большое пробивное напряжение	63
	а) Большой рабочий ток, б) большое пробивное напряжение	83
	а) Большое пробивное напряжение, б) большой рабочий ток	4
За счет чего обеспечивается односторонняя проводимость газотрона?	За счет подогрева катода	24
	За счет активирования катода	44
	За счет двух названных факторов	64
Что произойдет, если из газотрона удалить инертный газ или пары ртути?	Газотрон потеряет выпрямительные свойства	84
	Резко уменьшится выпрямленный ток	5
	Разрушится оксидный слой катода	25
На каком участке вольт-амперной характеристики газового разряда (см. рис. 15.2) работает газотрон?	ае	45
	де	65
	еж	85
	Выше точки з	6
Как изменяется КПД газотрона с повышением выпрямляемого напряжения?	Увеличивается	28
	Уменьшается	46
	Не меняется	66

§ 15.3. ТИРАТРОН

Тиратрон является ионным прибором с тремя или четырьмя электродами, моментом зажигания которого можно управлять.

Различают тиратроны с горячим нагреваемым катодом (несамостоятельным дуговым разрядом) и с

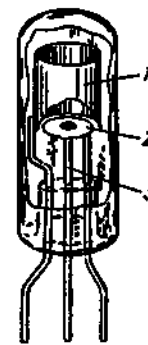
холодным катодом (работающие в режиме самостоятельного тлеющего разряда).

Устройство тиратрона с накаливаемым (горячим) катодом показано на рис. 15.3. В баллоне 6, заполненном разреженным инертным газом, размещают анод 1, ка-

Рис. 15.3.
Устройство тиратрона с накаливаемым катодом:
1 — анод; 2 — сетка; 3 — тепловой экран; 4 — катод; 5 — стеклянное основание; 6 — баллон



Рис. 15.4.
Устройство тиратрона с холодным катодом:
1 — катод; 2 — управляющий электрод; 3 — анод



тод 4 и управляющий электрод 2. Нагревание вольфрамового катода, активированного барием, цезием или их оксидами производится постоянным или переменным током. В последнем случае применяют катод косвенного накала, обладающий достаточной тепловой инерцией, чтобы исключить колебания плотности пучка эмиттированных электронов. Тепловой экран 3 в виде закрытого цилиндра с отверстием в торце уменьшает потери теплоты катодом и направляет электроны к аноду через отверстия в управляющем электроде (сетке). Анод и сетку изготовляют из никеля.

Пусть к аноду тиратрона подведено положительное напряжение, значение которого превышает напряжение зажигания дугового разряда. На сетку подано отрицательное напряжение, создающее потенциальный барьер, непреодолимый для эмиттировавшихся из катода электронов. В таком состоянии тиратрон погашен, анодный ток равен нулю. При подаче на сетку управляющего сигнала, компенсирующего отрицательный потенциал, электроны устремляются от катода к аноду, ионизируя по пути молекулы газа. Вспыхивает дуговой разряд, ток которого практически ограничивается только сопротивлением нагрузки в цепи анода. Возрастание тока от нуля до номинального значения происходит очень быстро, за 10^{-8} с. Таким образом, 15 я-806

с помощью управляющего электрода можно регулировать момент зажигания тиратрона.

Если снова подать на сетку отрицательное напряжение, то это никак не повлияет на ток дугового разряда, так как положительные ионы газа притягиваются к сетке, компенсируя ее отрицательный потенциал. Чтобы погасить тиратрон, надо выключить анодное напряжение.

Устройство тиратрона с холодным катодом представлено на рис. 15.4. Катод 1 в виде полого цилиндра из никеля внутри активирован цезием. Малая работа выхода и большая излучающая поверхность обеспечивают необходимое количество эмиттированных электронов. Анодом служит цилиндрический стержень из молибдена 3. Управляющий электрод 2 в виде шайбы размещен у торца анода.

В исходном положении (тиратрон погашен, анодный ток равен нулю) на анод подано положительное напряжение, меньшее напряжения зажигания, но превышающее напряжение горения. Если подать на управляющий электрод положительный импульс напряжения, вспыхивает тлеющий разряд, обеспечивающий протекание анодного тока. Для гашения тиратрона надо выключить анодное напряжение.

Чтобы улучшить характеристику зажигания тиратрона и снизить импульс тока управляющего электрода, можно ввести дополнительный (четвертый) электрод, к которому подводится часть анодного напряжения. Тиратроны используют как преобразователи тока (выпрямители и инверторы), а также как бесконтактные реле в схемах автоматики, управления, защиты.

Карточка № 15.3 (219)
Тиратрон

В каком режиме работают тиратроны: а) с горячим катодом б) с холодным катодом?	а), б) Тлеющего разряда	86
	а) Дугового разряда; б) тлеющего разряда	7
	а) Тлеющего разряда; б) дугового разряда	27
Какие функции выполняет управляющий электрод?	Зажигает тиратрон	47
	Гасит тиратрон	67

Продолжение

	Зажигает и гасит тиратрон	87
В какой прибор превратится тиратрон с горячим катодом, если из баллона откачать инертный газ?	В ламповый диод	8
	В ламповый триод	28
На каком участке характеристики (см. рис. 15.2) работает тиратрон с горячим катодом?	де	48
	еж	68
	Выше точки з	88
На каком участке характеристики (см. рис. 15.2) работает тиратрон с холодным катодом?	вг	9
	гд	29
	де	49

§ 15.4. СТАБИЛИТРОН

Стабилитрон (рис. 15.5) представляет собой двухэлектродную газонаполненную лампу тлеющего разряда с холодным катодом. Катод 1 в виде полого цилиндра изготавливают из никеля, внутреннюю поверхность катода активируют. Анод 2 в форме стержня

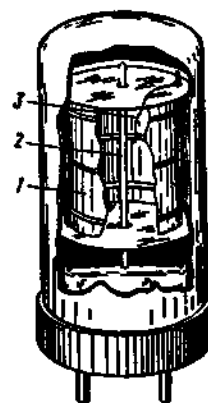


Рис. 15.5. Устройство стабилитрона тлеющего разряда: 1 — катод; 2 — анод; 3 — зажигающий электрод

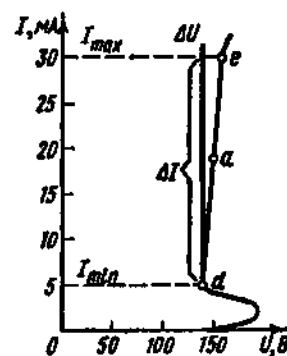


Рис. 15.6. Вольт-амперная характеристика стабилитрона СГ4С

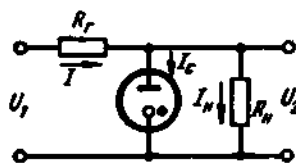


Рис. 15.7. Схема стабилизации напряжения

устанавливают по оси катода. К катоду приваривается проволока, свободный конец которой размещается возле анода, не касаясь его. Эта проволока инициирует процесс разряда и называется поджигающим электродом 3.

Вольт-амперная характеристика стабилитрона показана на рис. 15.6.

Рабочие режимы лампы соответствуют линейному участку вольт-амперной характеристики az , напряжение стабилизации в точке a равно 150 В. Рабочий участок характеризуют дифференциальным сопротивлением $R_c = \Delta U_c / \Delta I_c$, значения которого обычно составляют около 200 Ом.

Схема стабилизации напряжения с помощью стабилитрона представлена на рис. 15.7.

Для оценки эффективности стабилизации найдем отношение $\Delta U_1 / \Delta U_2$. Записав уравнения Кирхгофа для приращений напряжений и токов

$$\Delta U_1 = R_1 \Delta I + \Delta U_2 = R_1 (\Delta I_c + \Delta I_n) + \Delta U_2$$

и приняв во внимание, что $\Delta I_c = \Delta U_c / R_c = \Delta U_2 / R_c$, а $\Delta I_n = \Delta U_2 / R_n$, после подстановок и простых преобразований находим

$$\frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} = \frac{R_n R_r + R_c R_r + R_c R_n}{r_c R_n}$$

Если выбрать $R_n \gg R_c$ и $R_r \gg R_c$, то членами $R_c R_r$ и $R_c R_n$ можно пренебречь по сравнению с произведением $R_n R_r$. Тогда $\Delta U_1 / \Delta U_2 \approx R_n R_r / (R_c R_n) = R_r / R_c$.

Если, например, $R_c = 200$ Ом, а $R_r = 2$ кОм, то $\Delta U_1 / \Delta U_2 \approx 10$, т. е. изменение напряжения на выходе схемы в 10 раз меньше изменения напряжения на ее входе. Промышленность выпускает стабилитроны с расчетным напряжением стабилизации от 70 В до 1 кВ и рабочими токами от 5 до 30 мА.

Стабилитрон обычно применяют для стабилизации напряжения маломощных источников питания переносной радиоаппаратуры.

Карточка № 15.4 (175)
Стабилитрон

Как изменяется ток стабилитрона при увеличении напряжения?	Практически не меняется	69
	Резко увеличивается	10
	Резко уменьшается	30
Почему катод стабилитрона изготавливают в виде цилиндра, охватывающего анод?	Для увеличения площади, с которой эмиттируются электроны	50
	Для защиты анода от перегрева	70
При прочих равных условиях как изменится стабилизирующее действие стабилитрона при уменьшении ΔU_c (см. рис. 15.6)?	Увеличится	11
	Уменьшится	31
	Не изменится	51
$R_n = R_r = 20$ кОм, $R_c = 200$ Ом. Определите $\Delta U_1 / \Delta U_2$ (см. рис. 15.7)	100	71
	101	12
	102	32
При прочих равных условиях как изменится стабилизирующее действие стабилитрона при увеличении R_c ?	Увеличится	52
	Уменьшится	72
	Не изменится	13

§ 15.5. ГАЗОСВЕТНЫЕ СИГНАЛЬНЫЕ ЛАМПЫ И ИНДИКАТОРЫ

Сигнальные лампы работают в режиме тлеющего разряда. В баллоне, заполненном газом (обычно неоном), размещают два электрода цилиндрической формы (рис. 15.8). Внешний полый цилиндр служит катодом, внутренний, расположенный по оси внешнего, — анодом. При наличии на электродах постоянного напряжения возникает тлеющий разряд и околокатодное пространство светится красным светом. Для изменения светового оттенка к неону добавляют другие газы: гелий, аргон.

Газосветные сигнальные лампы для работы в цепях переменного тока изготавливают с одинаковыми электродами в виде дисков. Тогда по окончании каж-

дого полупериода напряжения анод и катод как бы меняются местами и при очень высоких частотах электроны, не успевая пройти межэлектродное расстояние, начинают совершать колебательные движения, ионизуя молекулы газа. Одновременно идет процесс рекомбинации молекул и весь объем газа между электродами светится.

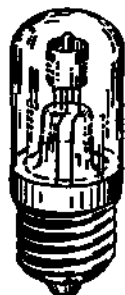


Рис. 15.8.
Сигнальная
газосветная
лампа



Рис. 15.9.
Цифровой
газосветный
индикатор

Газосветные лампы, изготовленные в виде тонких длинных стеклянных трубок (напоминающих ртутные термометры), можно использовать в качестве вольтметров. Принцип их действия основан на том, что чем больше напряжение между анодом и катодом, тем выше столбик светящегося газа. Нанеся на поверхность трубки градуировочные деления, можно отсчитывать значения напряжения с точностью до 3%.

Газосветные лампы широко применяются в качестве цифровых индикаторов (рис. 15.9), работающих в режиме тлеющего разряда, когда светится тонкий слой газа, примыкающий к катоду. Баллон индикаторной лампы наполняют неоном или смесью инертных газов, имеющей пониженное напряжение зажигания. Анод изготавливают из никелевой проволоки в виде сетки, через которую просматриваются расположенные один под другим десять катодов из хромовой или титановой проволоки, выполненные в виде цифр от нуля до девяти. Каждый катод имеет свой вывод.

Подавая напряжение на анод и один из катодов, высвечивают нужную цифру. Для индикации много-

разрядных чисел несколько (по числу разрядов) цифровых индикаторов располагают в строку.

Карточка № 15.5 (234)
Газосветные сигнальные лампы и индикаторы

Для каких целей применяются газосветные лампы?	Для индикации напряжения	33
	Для измерения напряжения	53
	Для высвечивания цифр и чисел	73
	Для всех перечисленных целей	14
В каком режиме работают газосветные лампы?	Дугового разряда	34
	Тлеющего разряда	54
	В том и другом	74
Чем отличаются газосветные сигнальные лампы постоянного и переменного напряжений?	Конструкцией электродов	15
	Видом разряда	35
	Составом газов	55
Сколько анодов имеет цифровой индикатор	1	75
	9	16
	10	36
Чем определяется цвет высвечиваемых цифр?	Значением напряжения	56
	Составом газа, заполняющего баллон	76
	Тем и другим	17

§ 15.6. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И МАРКИРОВКА ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ПРИБОРОВ

Конструкция и характеристика газоразрядных приборов постоянно совершенствуются, происходит процесс их миниатюризации, срок службы некоторых нонных приборов достигает 10 000 ч.

Создают и новые типы газоразрядных ламп. Так, сравнительно недавно появились декатроны —



Рис. 15.10. Условные обозначения газоразрядных приборов: а — стабилитрон; б — сигнальная лампа; в — тиратрон (трехэлектродный) с холодным катодом; г — тиратрон (четырёхэлектродный) с холодным катодом; д — тиратрон с раскаленным катодом

многокатодные лампы тлеющего разряда, позволяющие вести счет и отображение импульсов в десятичной системе счисления.

На схемах газоразрядные приборы различных типов обозначают условными стандартными знаками.

Эти условные обозначения газоразрядных (нонных) приборов (рис. 15.10) напоминают условные обозначения электровакуумных приборов. Наличие молекулы газа в баллоне помечается точкой вблизи катода.

Маркировка нонных приборов включает три или четыре элемента: *первый* определяет тип прибора: ТХ — тиратрон с холодным катодом; ТГ — тиратрон с горячим катодом; СГ — стабилитрон газоразрядный; ИН — индикаторная газоразрядная лампа; СН — сигнальная газоразрядная лампа; *второй* — цифра, определяющая группу прибора того или иного типа; *третий* — число, указывающее некоторые параметры прибора; *четвертый* — буква, характеризующая конструктивное оформление прибора.

Например, маркировка ТГ1-0,1/0,3 означает: тиратрон с подогревным катодом, заполненный аргоном; максимальное значение тока 0,1А; максимально допустимое напряжение 0,3 кВ.

Карточка № 15.6 (302)

Условные обозначения и маркировка газоразрядных приборов

Чем отличается условное обозначение тиратрона с раскаленным катодом от условного обозначения лампового триода?	Количеством электродов	37
	Точкой	57
	Тем и другим	77
Какими буквами маркируют тиратрон с раскаленным катодом?	ТХ	18
	ТГ	38
	СГ	58
Какими буквами маркируют неоновую лампу для индикации напряжения?	СГ	78
	ИН	19
	СН	39
Какие параметры отображаются в маркировке тиратрона?	Мощность	59
	Напряжение и ток	79

Продолжение

По каким направлениям совершенствуются газоразрядные приборы?	Частота тока и напряжение	20
	Уменьшение размеров	40
	Повышение надежности	60
	Новые области применения	80
	По всем перечисленным	89

ГЛАВА 16

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

§ 16.1. АТОМЫ

Элементы отличаются друг от друга строением атомов. Каждому элементу или его изотопу соответствует свой атом.

Основы современных представлений об атомах были заложены в начале XX в. Выдающуюся роль в изучении структуры и свойств этих «кирпичиков» вещества сыграли Резерфорд, Бор, Шредингер.

Одни из свойств атомов рассматриваются как данные эксперимента, другие могут быть объяснены и выведены как следствия более фундаментальных свойств материи.

Не останавливаясь на выводах и доказательствах, перечислим известные из курса физики свойства атомов. Вспомнить эти свойства необходимо для понимания сущности физических процессов в полупроводниках.

Микромир отличается от макромира не только количественно, но и качественно. Как правило, объектам и процессам микромира не удастся придать адекватные образы окружающего нас макромира. Но наглядная интерпретация теоретических и экспериментальных результатов столь существенно помогает их осмысливанию, что ученые всегда стремятся создать из привычных человеку элементов макромира некоторые модели, хотя бы приближенно соответствующие объектам микромира. С развитием науки научные

модели не отбрасываются, они уточняются, совершенствуются и, к сожалению, обычно усложняются. Поэтому при изучении тех или иных разделов электротехники и электроники важно выбрать такие модели молекул, атомов и элементарных частиц, которые, сохраняя возможную простоту и наглядность, отражали бы все существенные для изучаемой области науки отношения между элементарными частицами.

Говоря о частицах или волновых процессах микромира, следует понимать, что речь идет не об элементарных шариках или кусочках вещества, не об электромагнитных колебаниях, с помощью которых осуществляется, например, радиосвязь, а о некоторых свойствах микромира, которые можно описать поведением корпускул или волновой функцией.

Как волны на поверхности пруда, разбегающиеся от брошенного камня, не обладают всеми свойствами звуковых или сейсмических волн, а звуковые волны — свойствами электромагнитных волн, точно так же и электромагнитные волны не отражают всех свойств волновых процессов, связанных с элементарными частицами.

Согласно планетарной модели, атом состоит из ядра и электронов, движущихся вокруг ядра по круговым или эллиптическим орбитам.

За атомную единицу массы, примерно равную массе атома водорода, принято значение, близкое к $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг.

Массы других атомов выражают через атомную единицу массы. Округленное до целого значения число, показывающее, сколько атомных единиц массы содержится в массе атома, называется атомным числом этого атома и обозначается буквой A . Атомное число водорода равно 1. Атомные числа других элементов больше единицы, например для одного из двух изотопов урана $A=238$, а для курчатовия $A=260$.

Суммарная масса электронов, движущихся вокруг ядра, составляет несколько десятитысячных долей массы атома. Поэтому практически масса атома равна массе его ядра.

Радиус $R_{\text{я}}$ ядра атома может быть приближенно определен по эмпирической формуле

$$R_{\text{я}} \approx 1,5 \sqrt[3]{A} \cdot 10^{-15} \text{ м.}$$

Следовательно, радиус ядра атома водорода (радиус протона) равен $1,5 \cdot 10^{-15}$ м, а радиус ядра атома алюминия ($A=27$) — в три раза больше.

Если представить электрон в виде шарика, то можно показать, что его радиус примерно в два раза больше радиуса протона.

Размеры атома можно определить как геометрическое место наиболее удаленных от ядра точек, в которых обнаруживаются электроны, принадлежащие атому. Размеры атома зависят не только от его принадлежности к тому или иному элементу, но и от состояния (возбужден, ионизован, изолирован или входит в состав молекулы и т. д.). Радиус атома водорода имеет порядок 10^{-10} м. Таким образом, размеры атома примерно в 10^5 , а его объем в 10^{15} раз превышают размеры и объем составляющих атом частиц.

(Ответьте на карт. № 16.1а.)

Карточка № 16.1а (111)

Атомы

Можно ли рассматривать атом состоящим из ядра, вокруг которого по определенным орбитам движутся электроны?	Можно	1
	Нельзя	51
	В одних случаях можно, в других нельзя	101
Чему равна масса атома индия, если его атомное число равно 115?	115	151
	$115 \cdot 10^{-27}$ кг	201
	$1,66 \cdot 115 \cdot 10^{-27}$ кг	2
Чему равен радиус ядра атома сурьмы, если $A=122$?	Около $7,5 \cdot 10^{-16}$ м	52
	Около $1,5 \cdot 10^{-15}$ м	102
Каковы: а) размеры электрона; б) массы электрона?	а), б) Сравнимы с размерами и массой ядра	152
	а), б) Пренебрежимо малы	202
	а) Сравнимы с размерами ядра; б) пренебрежимо мала	3
1 ангстрем ($\text{\AA}$) равен 10^{-10} мкм. Укажите радиус атома водорода в ангстремах	Порядка 1 $\text{\AA}$	53
	Около $10^5 \text{\AA}$	103
	Примерно $1,5 \cdot 10^{-8} \text{\AA}$	153

Природа двух форм существования материи: электромагнитного поля и вещества — двойственна, противоречива. В ней диалектически соединены противоположные свойства: волновые и корпускулярные. Волновые свойства электромагнитного поля отчетливее проявляются с уменьшением частоты колебаний, корпускулярные — с увеличением частоты.

В 1924 г. французский физик Луи де Бройль постулировал положение (в дальнейшем подтвержденное всем опытом физики) о том, что с каждой движущейся массой вещества связан особый волновой процесс, а длина волны λ определяется соотношением

$$\lambda = h/(mv),$$

где h — постоянная Планка; m — масса; v — скорость движения.

Постоянная Планка, через которую определяется квант энергии, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с $= 6,62 \cdot 10^{-34}$ кг $\times$ $\times$ м²/с.

Волновой процесс, связанный с макроскопическим телом, обнаружить нельзя, потому что, например, длина волны де Бройля для пули массой 10 г, летящей со скоростью 1000 м/с,

$$\lambda = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}}{10 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot 10^3 \text{ м/с}} = 6,62 \cdot 10^{-35} \text{ м}.$$

Такая длина волны лежит далеко за пределами возможностей методов измерений или наблюдений.

Однако с уменьшением массы длина волны возрастает и массам элементарных частиц соответствуют волны де Бройля, длина которых соизмерима с размерами атомов. Так, длина волны электрона составляет несколько ангстрем.

Волны де Бройля существенно ограничивают подвижность электронов в атомах. Установлено, что электрон может двигаться только по такой орбите, вдоль которой укладывается целое число его волн. Остальные орбиты для электрона запрещены.

В изолированном атоме с одним электроном скорость движения электрона по разрешенной орбите устанавливается такой, при которой центробежная сила уравновешивает силу притяжения отрицательно заряженного электрона к положительно за-

ряженному ядру. Каждой разрешенной орбите соответствует своя скорость и, следовательно, своя кинетическая энергия электрона.

Установлено, что, двигаясь по разрешенной орбите, электрон не расходует (не излучает) энергии. В противном случае, излучая энергию, электрон по спирали упал бы на ядро. Отсутствие излучения на разрешенных орбитах — особенность микромира, не имеющая аналогов и необъяснимая на основании известных законов макромира.

Под действием внешних факторов или спонтанно (самопроизвольно) электрон может переходить с одной разрешенной орбиты на другую. Чтобы перейти с низкой орбиты на более высокую, электрон должен получить порцию (квант) энергии, строго равную разности его энергий для двух разрешенных орбит. Такая энергия доставляется атомам главным образом световыми, ультрафиолетовыми или рентгеновскими лучами, а также при тепловых столкновениях атомов.

Атом, поглотивший один или несколько квантов лучистой энергии, называется возбужденным. Иногда поглощенная энергия столь велика, что электрон переходит на очень удаленную орбиту и практически отрывается от атома. Такой атом называется ионизированным.

Через некоторое время ионизированный атом захватывает встретившийся ему свободный электрон и становится нейтральным. Возбужденный атом самопроизвольно переходит в нормальное состояние, т. е. электрон, находившийся в состоянии с более высокой энергией, переходит в основное или какое-либо другое разрешенное состояние, имеющее меньшую потенциальную энергию. При этом атом излучает квант энергии, равный разности энергий электрона на этих двух орбитах. Энергия электрона, не связанного в атоме (свободного), считается равной нулю.

Так как при возвращении электрона на одну из разрешенных орбит атом излучает квант энергии, то энергия связи электрона в атоме становится отрицательной. Атом, находящийся в нормальном (не возбужденном) состоянии, излучать энергию не способен, он может только ее поглощать.

Карточка № 16.16 (126)
Атомы

Дайте определение электромагнитного поля	Вид материи	203
	Волны	4
	Корпускулы	54
	Диалектическое единство данных выше определений	104
Какие тела обладают волновыми свойствами?	Никакие	154
	Элементарные частицы	204
	Теоретически — все. Практически — микро-частицы	5
У какой частицы волна де Бройля больше?	У протона	55
	У нейтрона	105
	У электрона	155
	Длина волны этих частиц примерно одного порядка	205
Какая орбита называется разрешенной?	На которой центробежная сила уравновешивается силой притяжения электрона к ядру	6
	Длина которой кратна длине волны де Бройля, связанной с электроном	56
	Могут быть приняты оба определения	156
Что произойдет, если атом поглотит квант энергии, недостаточный для перевода электрона с одной разрешенной орбиты на другую?	Такое событие невозможно	206
	Электрон будет двигаться по прежней орбите, но скорость его увеличится	7

§ 16.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ И ЗОНЫ

Полная энергия электронов, равная сумме его кинетической (движения по орбите) и потенциальной (притяжения к ядру) энергий, называется энергетическим состоянием атома. Каждой разрешенной орбите соответствует свое энергетическое состояние, которое на диаграмме представляют в виде энергетического уровня. Так как орбиты и их энергии делятся на разрешенные и запрещенные, то и энергетические уровни могут быть также разрешенными и запрещенными. Разрешенные уровни изолированного атома водорода имеют следующие значения энергий: при $n=1$ $E_1 = -13,53$ эВ; при $n=2$ $E_2 = -3,38$ эВ; при $n=3$ $E_3 = -1,5$ эВ и т. д. Здесь n — порядковый номер разрешенной орбиты начиная от ближайшей к ядру. Энергия электрона E выражена в электрон-вольтах. Электрон-вольт — это энергия, которую приобретает электрон, разогнавшись в электрическом поле с разностью потенциалов в 1 В.

Видно, что с увеличением номера орбиты абсолютное значение энергии уменьшается, т. е. энергетический уровень атома возрастает (так как энергия связи электрона в атоме отрицательна).

Радиус ближайшей к ядру (первой) орбиты электрона в атоме водорода $r_1 = 0,529 \cdot 10^{-10}$ м. Радиусы других разрешенных орбит связаны с r_1 простым соотношением $r_n = n^2 r_1$.

Энергия электрона на первой орбите связана с энергией электрона на других орбитах формулой $E_n = E_1/n^2$.

Величина n принимает только положительные целые значения: $n=1, 2, 3, \dots$. Ей придавали смысл номера разрешенной орбиты (рис. 16.1), номера энергетического уровня (рис. 16.2), но следует иметь в виду, что в общем случае n характеризует некоторое свойство дискретности (квантованности) процессов и характеристик атома, не имеющее точных аналогов в макром мире. Величину n называют главным квантовым числом и используют для описания дискретных свойств микромира.

Картина существенно усложняется, если обратиться к атомам, содержащим несколько электронов. В этом случае при подсчете энергии электрона надо учитывать не только его взаимодействие с ядром, но

и взаимодействие с другими электронами. Разрешенный энергетический уровень, характеризуемый главным квантовым числом n , расщепляется на ряд близко расположенных подуровней. Еще сложнее энергетическая картина многоэлектронного атома.

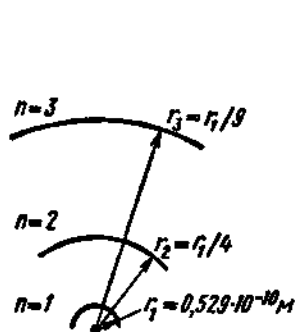


Рис. 16.1. Разрешенные орбиты электрона в атоме водорода

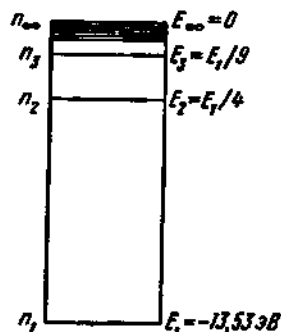


Рис. 16.2. Энергетические уровни атома водорода

входящего в состав молекулы или расположенного в узле кристаллической решетки. Взаимодействие атомов в решетке приводит к тому, что их энергетические уровни расщепляются на большое количество почти сливающихся подуровней, образующих энергетические зоны.

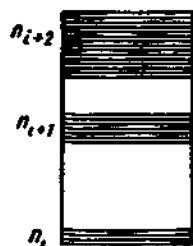


Рис. 16.3. Расщепление энергетических уровней атомов, связанных в кристаллической решетке

Энергетическая зона, заполненная подуровнями, тем шире, чем ближе расположены атомы и чем выше энергетический уровень (рис. 16.3). Сохраняя единство терминологии, будем говорить о разрешенных и запрещенных энергетических зонах. Всегда существует некоторая, не равная нулю, вероятность того, что энергия электрона совпадает с подуровнем одной из разрешенных энергетических зон.

Вероятность «пробытия» электрона в запрещенной зоне равна нулю.

Карточка № 16.2 (92)
Энергетические уровни и зоны

Какой атом называется возбужденным?	Атом, поглотивший один квант энергии	57
	Атом, поглотивший один или несколько квантов энергии	107
	Атом, из которого вырван электрон	157
Чем определяется значение энергии разрешенного энергетического уровня?	Скоростью движения электрона	207
	Электрическим зарядом электрона	8
	Номером разрешенной орбиты	58
При каком n энергетический уровень атома водорода имеет максимальную энергию?	$n = 0$	108
	$n = 1$	158
	$n = \infty$	203
Полная энергия электрона изолированного атома водорода равна $-3,38$ эВ. Найдите радиус орбиты электрона	$r = 0,529 \cdot 10^{-10}$ м	9
	$r = 1,058 \text{ \AA}$	59
	$r = 2,116 \text{ \AA}$	109
В каком случае разрешенный энергетический уровень расщепляется на большее количество подуровней?	Если атом имеет несколько электронов	159
	Если атом входит в состав молекулы	209
	Если атом находится в кристалле	10

§ 16.3. ПРОВОДНИКИ, ИЗОЛЯТОРЫ И ПОЛУПРОВОДНИКИ

Разрешенные энергетические зоны кристаллов состоят из большого количества близких друг к другу подуровней. Количество таких подуровней в несколько раз превышает количество атомов в кристалле, число которых достигает 10^{23} в одном кубическом сантиметре. Если ширину разрешенной зоны разделить на количество подуровней, то окажется, что раз-

ница в энергии подуровней имеет порядок 10^{-23} эВ.

Если к кристаллу приложена разность потенциалов, электроны под действием внешнего напряжения разгоняются в направлении к плюсу источника электропитания, приобретают дополнительную энергию и переходят на более высокие энергетические уровни. Направленное движение электронов — это электрический ток. Поэтому, казалось бы, все твердые тела должны быть хорошими проводниками электричества.

В действительности же это не так. В микромире существует ряд запретов, механизм которых не ясен, но само существование подтверждено опытом. Один из таких запретов, названный по имени его открывателя принципом Паули, устанавливает, что на любом энергетическом уровне одновременно может находиться не более двух электронов, отличающихся моментами импульса или спинами. В силу принципа минимизации энергии системы электроны стремятся занять низшие энергетические уровни, излучив кванты избыточной энергии.

В результате электроны не скапливаются на отдельных энергетических уровнях, а равномерно заполняют разрешенные энергетические зоны, начиная с нижних.

Верхнюю из заполненных энергетических зон принято называть валентной, так как ее электроны способны взаимодействовать с соседними атомами, обеспечивая молекулярные связи.

Разрешенные энергетические зоны, располагающиеся ниже валентной, всегда заполнены электронами полностью. Валентная зона может быть заполнена полностью или частично. Например, в кристалле натрия валентная зона заполнена наполовину.

Вернемся к процессу возникновения электрического тока. Под действием напряжений в электрических схемах электроны, разгоняясь на расстоянии, равном длине свободного пробега, способны приобрести дополнительную энергию порядка 10^{-6} эВ. Такой энергии с избытком достаточно для перехода электрона с одного подуровня энергетической зоны на другой, и если валентная энергетическая зона имеет свободные (незаполненные) энергетические подуровни, то электроны действительно переходят на них, образуя электрический ток.

Эти рассуждения подтверждаются тем фактом, что все кристаллы с не полностью занятой валентной зоной являются проводниками электрического тока.

Кристаллы, у которых валентная зона заполнена электронами полностью, а в следующей по порядку более высокой разрешенной энергетической зоне электронов нет, неэлектропроводны и представляют собой идеальные изоляторы. Действительно, упорядоченное движение электронов к плюсу источника привело бы к увеличению их энергии и к переходу на более высокие подуровни. Но в силу принципа Паули это невозможно, так как все подуровни валентной зоны заняты, на каждом из них уже разместились два электрона.

Разрешенная энергетическая зона, расположенная непосредственно над валентной зоной, называется зоной проводимости. Она совершенно лишена электронов только при температуре $T=0$ К. С повышением температуры тепловая энергия атомов кристаллов возрастает, что приводит к их возбуждению. При этом часть электронов валентной зоны перебрасывается в зону проводимости. Кристалл приобретает свойства проводника, так как, во-первых, освобождается часть разрешенных энергетических подуровней в валентной зоне и, во-вторых, электроны, попавшие в зону проводимости, получают возможность перемещаться с одного подуровня на другой.

Легко понять, что проводящие свойства кристалла зависят от ширины запрещенной зоны, разделяющей валентную зону и зону проводимости. Чем шире запрещенная зона, тем меньше (при заданной температуре) количество электронов, которые проникнут в зону проводимости, тем меньше проводимость кристалла.

Кристаллы могут быть хорошими проводниками даже в том случае, когда валентная зона заполнена целиком, если она непосредственно примыкает к зоне проводимости или пересекается с ней (в результате размытия зон при образовании решетки). С увеличением ширины запрещенной зоны кристаллы приобретают свойства изоляторов. Средним значениям ширины запрещенной зоны соответствуют полупроводниковые кристаллы (рис. 16.4, б).

Так как валентная зона и зона проводимости у

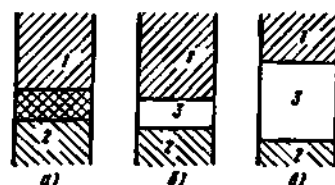


Рис. 16.4. Зонные энергетические диаграммы различных кристаллов:

а — проводник; б — полупроводник; в — изолятор; 1 — зона проводимости; 2 — валентная зона; 3 — запрещенная зона

кристаллических проводников не разделены, электроны свободно переходят с одного разрешенного подуровня на другой, приобретая упорядоченную скорость под действием приложенного напряжения (рис. 16.4, а). При этом с увеличением температуры сопротивление проводника увеличивается вследствие уменьшения длины свободного пробега электронов в кристалле.

У полупроводниковых кристаллов проводимость определяется прежде всего количеством электронов, преодолевших запрещенную зону и проникших в зону проводимости. Поэтому сопротивление полупроводников уменьшается с увеличением температуры.

Кристаллы с удельным сопротивлением 10^{-8} — 10^{-3} Ом·м относят к проводникам, а с сопротивлением 10^8 — 10^{13} Ом·м — к изоляторам (диэлектрикам). Удельное сопротивление полупроводников от 10^{-5} до 10^7 Ом·м.

Карточка № 16.3 (108)
Проводники, изоляторы и полупроводники

Чем определяется разница энергий подуровней разрешенной энергетической зоны атома в кристалле?	Шириной зоны	60
	Материалом кристалла	110
	Количеством атомов в кристалле	160
	Всеми перечисленными факторами	210
Какой кристалл лучше проводит электричество при $T=0$ К?	У которого в валентной зоне находится максимально возможное количество электронов	11
	У которого число электронов в валентной зоне равно половине максимально возможного	61

Продолжение

Валентная зона кристалла отделена от зоны проводимости запрещенной зоной и полностью заполнена электронами. Чему равна проводимость кристалла при $T=0$ К?	Нулю	111
	Бесконечно велика	161
	Это зависит от материала	211
Под действием теплового возбуждения электроны кристалла перешли из валентной зоны в зону проводимости. Сколько свободных носителей заряда образовалось в кристалле?	Осталось прежним	12
	n	62
	2n	112
У какого материала зона проводимости отделена от валентной зоны узкой запрещенной зоной?	У проводника	162
	У полупроводника	212
	У изолятора	13

§ 16.4. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Вследствие малой ширины (1 эВ) запрещенной зоны полупроводника тепловые колебания атомов способны сообщить валентным электронам энергию, достаточную для перехода из заполненной валентной зоны в свободную зону проводимости. Каждый такой переход приводит к возникновению пары носителей заряда: свободного электрона в зоне проводимости и свободного энергетического состояния — дырки — в валентной зоне. Под действием приложенного к кристаллу напряжения электрон проводимости движется «навстречу» электрическому полю, а электрон в валентной зоне занимает свободный уровень, освобождая свой уровень для другого электрона. Это можно рассматривать как движение положительного заряда (дырки) в направлении электрического поля.

Генерация пар свободных, т. е. способных перемещаться под действием приложенного напряжения, зарядов делает кристалл способным проводить электрический ток, а электропроводность такого кристалла называется собственной.

Одновременно с образованием пар носителей часть электронов из зоны проводимости спонтанно переходит обратно в валентную зону, излучая кванты энер-

гии. Этот процесс называется рекомбинацией пар. При постоянной температуре устанавливается динамическое равновесие, определяющее концентрацию свободных электронов и дырок (при данной температуре).

Чем выше температура, тем выше концентрация свободных носителей заряда, тем больше собственная электропроводность кристалла.

При температуре 0 К пары носителей не образуются и кристалл полностью теряет собственную электропроводность. При этом электроны внутри кристалла хаотически движутся с большими скоростями (порядка 10^6 м/с), но на приложенное внешнее напряжение не реагируют.

До сих пор мы рассматривали кристаллы, имеющие идеальную структуру, которая в природных кристаллах практически не встречается.

Реальные кристаллы содержат многочисленные дефекты кристаллической решетки: точечные, линейные, объемные и поверхностные. В местах нарушения периодической структуры кристалла (внедрения атомов в междоузлия) энергия связи электронов с ядрами изменяется, в результате чего возникают новые энергетические уровни, которые могут выходить за пределы валентной зоны и размещаться в запрещенной зоне вблизи зоны проводимости. Это облегчает переход электронов в зону проводимости.

Дефекты кристаллической решетки вызываются также примесями, когда в структуру кристалла внедряются чужеродные атомы. Электроны примесных атомов образуют свои энергетические уровни, которые также располагаются в запрещенной энергетической зоне. Взаимодействие примесных атомов приводит к расщеплению примесных уровней в примесные энергетические зоны.

Переход носителей заряда в свободное состояние при наличии примесных уровней существенно облегчается, так как сокращается участок запрещенной зоны, который электронам надо преодолеть. Проводимость кристалла возрастает.

Электропроводность, возникающую за счет примесных атомов, называют примесной. Характером носителей зарядов и значением примесной электропроводности можно управлять, подбирая состав и концентрацию примесей.

В современной технике для изготовления полупроводниковых кристаллов используют элементы четвертой группы периодической системы Д. И. Менделеева германий и кремний, атомы которых имеют по четыре электрона на внешних валентных оболочках. Кристаллические решетки этих элементов строятся таким образом, что каждый атом связан с соседними двумя ковалентными связями, что можно представить как движение двух электронов по одной орбите, охватывающей ядра двух соседних атомов (рис. 16.5).

(Ответьте на карт. № 16.4а.)

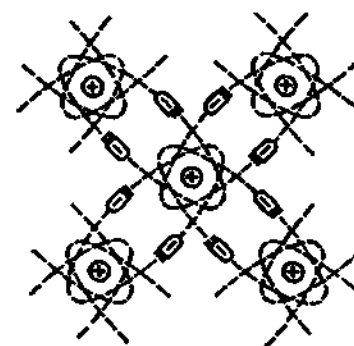


Рис. 16.5. Плоская планетарная модель кристаллов германия и кремния

Карточка № 16.4а (122)
Электропроводность полупроводников

Какие факторы создают собственную электропроводность кристалла	Повышение температуры	63
	Ультрафиолетовое облучение	113
	Раднация	163
	Все перечисленные выше	213
Почему с увеличением температуры увеличивается проводимость полупроводникового кристалла?	Увеличивается количество пар свободных носителей заряда	14
	Увеличивается длина свободного пробега электронов	64
	Увеличивается ширина зоны проводимости	114
Как влияют дефекты кристаллической решетки на проводимость кристалла?	Не влияют	164
	Увеличивают	214

	Уменьшают	15
Как влияют примесные зоны на процесс образования пар свободных носителей заряда?	Облегчают	65
	Затрудняют	115
От чего зависит значение примесной электропроводности кристалла?	От материала примеси	165
	От количества примеси	215
	От того и от другого	16

В качестве регулирующих примесей, придающих кристаллам германия и кремния требуемые свойства, применяют либо пентавалентные элементы (сурьма, мышьяк, фосфор), либо тривалентные (бор, индий, галлий, алюминий).

Количество атомов примеси обычно на несколько порядков меньше количества атомов основного элемента, так что на многие десятки тысяч атомов германия или кремния приходится только один атом примеси.

На рис. 16.6 изображена кристаллическая решетка германия, в которую «внедрил» атом примеси — пентавалентный атом мышьяка. Четыре электрона ва-

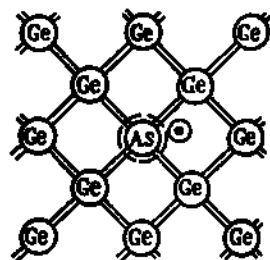


Рис. 16.6. Замещение в узле кристаллической решетки атома германия атомом мышьяка

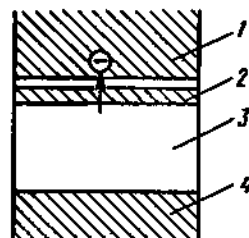


Рис. 16.7. Энергетическая диаграмма полупроводникового кристалла с электронной электропроводностью: 1 — зона проводимости; 2 — примесная зона; 3 — запрещенная зона; 4 — валентная зона

лентной оболочки атома мышьяка образуют прочные ковалентные связи с четырьмя соседними атомами германия, а пятый, валентный, электрон мышьяка оказывается «лишним». Размер орбиты, по которой он вращается вокруг ядра атома мышьяка, увеличивается в десятки раз, а связь его с ядром резко уменьшается. Расчеты показывают, что в рассматриваемом случае энергия, необходимая для отрыва «лишнего» электрона от атома мышьяка (энергия перехода в зону проводимости), составляет примерно 0,05 эВ. Учитывая, что ширина запрещенной зоны германия несколько превышает 1 эВ, нетрудно понять, что энергетический уровень электрона мышьяка расположен рядом с зоной проводимости кристалла. При относительно большой концентрации примесных атомов мышьяка образуется примесная зона, которая может даже перекрыться с энергетической зоной проводимости германия.

Энергетическая диаграмма кристаллического германия с достаточно высокой концентрацией примеси мышьяка изображена на рис. 16.7.

Так как примесная зона и зона проводимости размещаются рядом, а иногда и перекрываются, уже при небольших температурах значительная часть электронов примесной зоны переходит в зону проводимости. При каждом таком переходе образуется пара носителей зарядов: электрон в зоне проводимости и дырка в примесной зоне. Предположим, что к кристаллу приложено внешнее напряжение, обычно составляющее несколько десятков вольт. Под действием этого напряжения положительно заряженные дырки, переходя с одного энергетического подуровня примесной зоны на близко расположенный другой подуровень, практически мгновенно «прижмутся» к дну примесной зоны. Дальнейшее движение дырок, связанное с увеличенным значением их энергии, будет невозможным, так как они не смогут преодолеть широкую запрещенную зону. Что касается электронов, то они беспрепятственно движутся навстречу приложенному напряжению, переходя в зоне проводимости с одного энергетического подуровня на другой.

Таким образом, в рассмотренном случае прохождение тока через кристалл обеспечивается электронами. Электропроводность кристалла называется электронной, а примесь, поставляющая электроны

в зону проводимости,— донорной. Пятивалентная донорная примесь в четырехвалентном кристалле создает электронную электропроводность.

Рассмотрим процессы, возникающие при легировании четырехвалентного кристалла трехвалентной примесью.

На рис. 16.8 изображена кристаллическая решетка германия, в которую «внедрил» атом примеси —

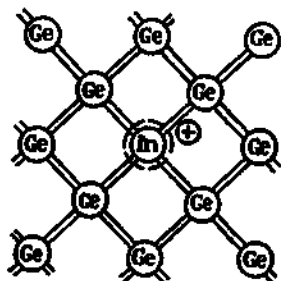


Рис. 16.8. Замещение в узле кристаллической решетки атома германия атомом индия

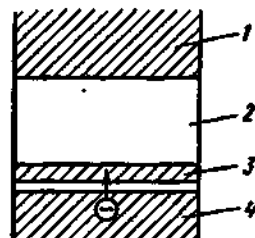


Рис. 16.9. Энергетическая диаграмма полупроводникового кристалла с дырочной электропроводностью:
1 — зона проводимости;
2 — запрещенная зона;
3 — примесная зона; 4 — валентная зона

трехвалентный атом индия. Три электрона внешней оболочки атома индия вступают в ковалентную связь с тремя соседними атомами кремния. При этом каждый электрон движется вместе с электроном соседнего атома по орбите, охватывающей два соседних ядра. На четвертой орбите движется только один электрон (хотя в соответствии с принципом Паули их может быть два). Отсутствие другого электрона равноценно присутствию положительного заряда — дырки.

Под действием теплового (или иного) возбуждения электроны соседних орбит легко переходят на незаполненную орбиту, что приводит к хаотическому (или упорядоченному) движению дырок. В рассматриваемом случае для перехода валентного электрона на незаполненную соседнюю орбиту требуется примерно 0,01 эВ. Поэтому энергетический уровень дырки размещается в непосредственной близости от валент-

ной зоны кристалла. Взаимодействие атомов примеси приводит к тому, что энергетический уровень размещается в примесную зону (рис. 16.9).

Так как примесная и валентная зоны размещаются рядом, а иногда и перекрываются, уже при небольших температурах значительная часть электронов валентной зоны переходит в примесную зону. При каждом таком переходе образуется пара носителей зарядов: электрон в примесной и дырка в валентной зонах. Предположим, что к кристаллу приложено внешнее напряжение в несколько десятков вольт. Под действием этого напряжения электроны практически мгновенно «прижмутся» к потолку примесной зоны и потеряют способность проводить ток, соответствующий приложенному напряжению.

Что касается дырок, то они упорядоченно движутся по направлению приложенного напряжения, приобретая добавочную энергию, соответствующую этому напряжению, и беспрепятственно переходя с одного на другой энергетический подуровень широкой валентной зоны.

Таким образом, в рассмотренном случае прохождение тока через кристалл обеспечивается дырками. Электропроводность такого кристалла называется дырочной, а примесь, отбирающая электроны из валентной зоны,— акцепторной. Трехвалентная акцепторная примесь в четырехвалентном кристалле создает дырочную электропроводность.

Кристаллы с электронной электропроводностью, в которых электрический ток создается упорядоченным движением отрицательных зарядов, называются кристаллами типа *n* (от negative — отрицательный).

Кристаллы с дырочной электропроводностью, в которых электрический ток создается упорядоченным движением положительных зарядов, называются кристаллами типа *p* (от positive — положительный).

Тепловое возбуждение электронов приводит к тому, что уже при нормальных температурах некоторая часть электронов, находящихся у «потолка» валентной зоны, преодолевает запрещенную зону.

Итак, наряду с основными носителями зарядов некоторую роль в создании электропроводности играют неосновные носители, количест-

во которых существенно возрастает при загрязнении кристалла посторонними примесями. В кристаллах *n*-типа основными носителями являются электроны, неосновными — дырки. В кристаллах *p*-типа основные — дырки, неосновные — электроны.

Карточка № 16.46 (135)
Электропроводность полупроводников

Где располагается энергетическая зона атомов фосфора, введенных в качестве примеси в кремний?	Немного выше валентной зоны	66
	Немного ниже зоны проводимости	116
	Немного выше зоны проводимости	166
Где располагается энергетическая зона атомов галлия, введенных в качестве примеси в германий?	Немного выше валентной зоны	216
	Немного ниже зоны проводимости	17
	Немного выше зоны проводимости	67
Где образуются свободные носители заряда при введении сурьмы в качестве примеси в германий?	Электроны — в зоне проводимости, дырки — в примесной зоне	117
	Электроны — в зоне проводимости, дырки — в валентной зоне	167
	Электроны — в примесной зоне, дырки — в зоне проводимости	217
Где образуются свободные носители заряда при введении бора в качестве примеси в кремний?	Электроны — в зоне проводимости, дырки — в валентной зоне	18
	Электроны — в примесной зоне, дырки — в валентной зоне	68
	Электроны — в валентной зоне, дырки — в примесной зоне	118
К какому типу относятся: а) кристалл германия с примесью сурьмы; б) кристалл кремния с примесью бора?	а), б) К <i>n</i> -типу	168
	а) К <i>n</i> -типу; б) <i>p</i> -типу	218
	а) К <i>p</i> -типу; б) <i>n</i> -типу	19

§ 16.5. ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД

Изолированный кристалл *n*-типа электрически нейтрален, сумма положительных и отрицательных зарядов в нем равна нулю. Количество атомов, лишившихся одного электрона и превратившихся в положительные ионы, строго равно количеству оторвавшихся от атомов электронов. Чем выше температура, тем больше образуется свободных электронов. В частности, при комнатной температуре практически все «лишние» электроны донорной пятивалентной примеси отрываются от атомов и движутся хаотически. Положительные ионы находятся в узлах кристаллической решетки.

Также электрически нейтрален и изолированный кристалл *p*-типа. Однако в нем в хаотическом тепловом движении находятся дырки, а атомы акцепторной примеси, захватившие лишний электрон и превратившиеся в отрицательные ионы, — в узлах кристаллической решетки.

Приведем кристаллы *n*- и *p*-типов в плотное соприкосновение и рассмотрим процессы на границе раздела (рис. 16.10, а). На рисунке ионы обозначены кружками, а свободные носители — знаками «+» и «-». Сразу после соприкосновения кристаллов начнется диффузия дырок из *p*-области и диффузия электронов в обратном направлении. Встречаясь, электроны и дырки рекомбинируют, при этом вблизи граничной плоскости образуются два слоя: слева слой «обнаженных» отрицательных ионов, справа — слой «обнаженных» (нескомпенсированных) положительных ионов. Между двумя разноименно заряженными слоями возникает электрическое поле, напряженность которого $\mathcal{E}$ препятствует диффузии дырок и электронов. Чем больше нескомпенсированных ионов, т. е. чем больше ширина «обнаженных» слоев, тем выше напряженность элек-

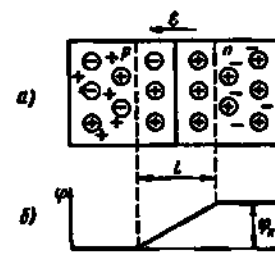


Рис. 16.10. Возникновение контактной разности потенциалов в электронно-дырочном переходе:
а — распределение ионов и свободных носителей заряда в областях, близких к *p-n*-переходу; б — изменение потенциала в направлении, перпендикулярном плоскости *p-n*-перехода

трического поля. При некотором значении напряженности диффузионный ток прекратится. Этому значению напряженности соответствуют определенная контактная разность потенциалов (рис. 16.10, б) и определенная ширина слоя l , в котором рекомбинировали подвижные носители зарядов.

Эта общая картина требует некоторого уточнения. Выше говорилось о существовании в кристаллах неосновных носителей заряда. Под действием напряженности $\mathcal{E}$ неосновные носители начнут дрейфовать навстречу диффундирующим зарядам, возникает дрейфовый ток, направленный навстречу току диффузии. Динамическое равновесие наступит при равенстве диффузионного и дрейфового токов, при этом слой l сильно обеднен свободными носителями заряда, хотя и не лишен их полностью. С приближением к плоскости раздела кристаллов обеднение слоя l носителями зарядов будет все более выраженным.

Ширина обедненного слоя связана с контактной разностью потенциалов, которая, в свою очередь, зависит от выбора материалов и концентрации примесей. Чем выше контактная разность потенциалов φ_k , тем шире обедненный слой l . У германия и кремния контактная разность потенциалов составляет десятки доли вольт, а ширина обедненного слоя — десятые и сотые доли микрометра.

Контактная разность потенциалов придает p - n -переходу свойство односторонней проводимости, которое широко применяется в современной технике.

Обозначим через φ_k собственную контактную разность потенциалов обедненного слоя. Если к p - n -переходу подключить источник напряжения U , то разность потенциалов на границах контактного слоя кристаллов n - и p -типов изменится. Включение p - n -перехода в электрическую цепь, когда плюс источника подсоединен к области p , а минус — к области n , называется **прямым**. Разность потенциалов контактного слоя в этом случае обозначим $\varphi_{kн}$. Включение, при котором к области p подсоединен минус источника, а к области n — плюс, называется **обратным**. Соответствующую разность потенциалов обозначим φ_{ko} (рис. 16.11).

Имея в виду, что сопротивление кристаллов невелико и все приложенное напряжение практически падает

на обедненном слое, можем записать: $\varphi_{kн} = \varphi_k - U$; $\varphi_{ko} = \varphi_k + U$.

Таким образом, при прямом включении p - n -перехода разность потенциалов на границах обедненного слоя (потенциальный барьер) уменьшается, а при обратном включении увеличивается.

Уменьшение потенциального барьера приводит к возрастанию диффузионного тока и уменьшению встречного дрейфового тока. Результирующий ток (его называют **прямым**) совпадает с диффузионным.

Увеличение потенциального барьера приводит к уменьшению диффузионного тока и увеличению дрейфового. Результирующий ток p - n -перехода и всей замкнутой цепи совпадает с дрейфовым током. Это ток называют **обратным**.

Напомним, что диффузионный ток создается основными носителями зарядов, а дрейфовый — неосновными. Так как концентрация основных носителей на несколько порядков выше концентрации неосновных, прямой ток в сотни и тысячи раз превышает обратный.

Таким образом, p - n -переход, включенный в прямом направлении, пропускает электрический ток, а включенный в обратном — не пропускает.

Чтобы уменьшить обратный ток, надо уменьшить количество неосновных носителей заряда. Это достигается уменьшением посторонних (не легирующих) примесей и улучшением структуры кристалла (уменьшением числа дефектов кристаллической решетки).

(Ответьте на карт. № 16.5а.)

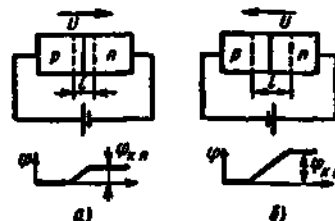


Рис. 16.11. Прямое (а) и обратное (б) включение p - n -перехода

Карточка № 16.5а (200)
Электронно-дырочный переход

Назовите свободные носители заряда: а) в кристалле кремния с примесью мышьяка; б) в кристалле германия с примесью индия	а), б) Электроны	69
	а) Дырки; б) электроны	119
	а) Электроны; б) дырки	169

В двух прижатых друг к другу кристаллах разного типа электроны диффундируют слева направо, а дырки — справа налево. Как расположены кристаллы?	Слева — <i>n</i> -типа, справа — <i>p</i> -типа	219
	Слева — <i>p</i> -типа, справа — <i>n</i> -типа	20
Куда направлена напряженность электрического поля, возникшего в обедненном слое на границе кристаллов в рассмотренном выше случае?	Справа налево	70
	Слева направо	120
Как изменяется ширина обедненного слоя с увеличением концентрации примесей?	Не меняется	170
	Уменьшается	220
	Увеличивается	21
К кристаллу <i>p</i> -типа подключен плюс источника напряжения, к кристаллу <i>n</i> -типа — минус. Какие носители заряда обеспечивают протекание тока через <i>p-n</i> -переход?	Основные	71
	Неосновные	121

Вентильные свойства *p-n*-перехода отображаются его вольт-амперной характеристикой, представляющей зависимость значения и направления тока от значения и полярности напряжения (рис. 16.12). При достижении обратным напряжением некоторого критического значения $U_{кр}$ обратный ток возрастает. Этот режим называется пробоем *p-n*-перехода.

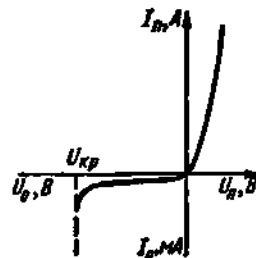


Рис. 16.12. Вольт-амперная характеристика электронно-дырочного перехода

С практической точки зрения целесообразно различать два вида пробоя: электрический и тепловой. Электрический пробой не опасен для *p-n*-перехода: при отключении источника обратного напряжения вентильные свойства электронно-дырочного перехода полностью восстанавливаются. Тепловой пробой приводит к разрушению кристалла и является аварийным режимом.

Электрический пробой вызывается совместным действием двух факторов: ударной ионизацией атомов и туннельным эффектом. Ударная ионизация возникает, когда под действием обратного напряжения электроны проводимости приобретают на расстоянии, равном длине свободного пробега, энергию, достаточную для отрыва других электронов при столкновении с атомами кристалла. При этом происходит лавинообразное увеличение количества носителей заряда и ток возрастает.

Туннельный эффект выражается в том, что электрон с энергетического уровня области *p* проникает сквозь потенциальный барьер без потери энергии на такой же энергетический уровень области *n*. При увеличении напряжения до $U_{кр}$ вероятность таких переходов возрастает, что и приводит к увеличению обратного тока.

Туннельный эффект связан с волновыми свойствами электрона. Для электронов, у которых волна де Бройля соизмерима с размерами атомов, есть вероятность проникнуть сквозь стенку потенциального барьера (или потенциального ящика), если за барьером имеется уровень, энергия которого равна энергии исходного уровня (нет запрещенной зоны). Коэффициент «прозрачности» барьеров зависит от многих факторов.

Тепловой пробой возникает при недостаточном охлаждении кристалла. В этом случае температура *p-n*-перехода повышается, что приводит к увеличению генерации носителей зарядов, увеличению тока и дальнейшему повышению температуры. В конечном счете кристалл разрушается. Для борьбы с тепловым пробоем полупроводниковые приборы снабжаются устройствами, повышающими теплоотдачу.

В области *p-n*-перехода нарушается равномерное распределение носителей заряда в кристалле и образуются два объемных заряда разного знака. Значения этих зарядов зависят от приложенного напряжения. Эту зависимость характеризуют емкостью *p-n*-перехода ($Q = CU$), которая увеличивается с увеличением прямого тока.

Электронно-дырочный переход составляет основу полупроводникового прибора.

(Ответьте на карт. № 16.56.)

Карточка № 16.56 (161)
Электронно-дырочный переход

Чем объясняется нелинейность вольт-амперной характеристики $p-n$ -перехода?	Дефектами кристаллической структуры	171
	Вентильными свойствами	221
Какой пробой опасен для $p-n$ -перехода?	Тепловой	22
	Электрический	72
	Тот и другой	122
Какие носители заряда размножаются ударной ионизацией атомов?	Основные	172
	Неосновные	222
Какие носители заряда проникают сквозь потенциальный барьер вследствие туннельного эффекта?	Основные	23
	Неосновные	73
Чем объясняются емкостные свойства $p-n$ -перехода?	Возникновением двух разноименных объемных зарядов	123
	Недостаточно плотным соединением кристаллов разного типа	173

§ 16.6. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Полупроводниковым диодом называют прибор с двумя выводами и одним электронно-дырочным переходом. Различают точечные (рис. 16.13) и плоскостные (рис. 16.14) диоды. В стеклянном или металлическом корпусе 2 точечного диода крепится германиевый или кремниевый кристалл n -типа 3 площадью порядка 1 мм^2 и толщиной $0,5 \text{ мм}$, к которому прижимается стальная или бронзовая игла 4, легированная акцепторной присадкой. Прибор включается в схемы через выводы 1. В процессе формовки через контакт иглы с кристаллом пропускают мощные импульсы тока. При этом кончик иглы оплавляється и часть акцепторной примеси внедряется в кристалл. Вокруг иглы образуется микроскопическая (точечная) область с дырочной электропроводностью. На полусферической границе этой области с кристаллом n -типа возникает электронно-дырочный переход.

Малая площадь $p-n$ -перехода в точечном диоде обеспечивает ему минимальное значение межэлектродной емкости.

Площадь $p-n$ -перехода плоскостных диодов достигает десятков и сотен мм^2 . Для получения таких

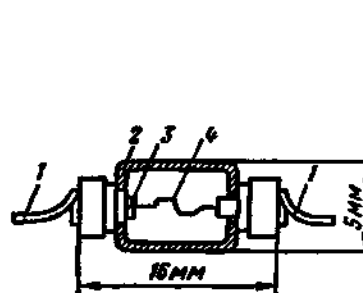


Рис. 16.13. Конструкция точечного германиевого диода типа Д103:
1 — вывод; 2 — стеклянный корпус;
3 — полупроводниковый кристалл;
4 — стальная игла

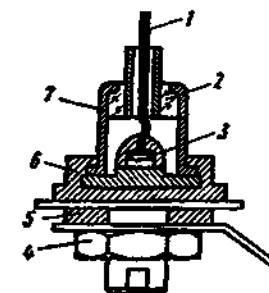


Рис. 16.14. Конструкция плоскостного выпрямительного диода:
1 — вывод; 2 — стеклянная втулка; 3 — полупроводниковый кристалл;
4 — гайка; 5 — шайба;
6 — основание; 7 — металлический корпус

площадей используют методы сплавления или диффузии. При методе сплавления на пластинку кристалла с донорной примесью помещают таблетку акцепторной примеси, которая расплавляется при нагреве в печи. Расплав частично проникает в кристалл и образует область p -типа, граничащую с массой кристалла. У этой границы возникает $p-n$ -переход.

При изготовлении диода методом диффузии кристалл в донорной примеси помещают в газовую среду акцептора (кристалл с акцепторной примесью — в газовую среду донора) и выдерживают длительное время при заданной температуре. Диффундируя в поверхность кристалла, молекулы акцептора (или донора) образуют область с типом электропроводности, противоположным типу электропроводности кристалла.

Метод сплавления позволяет получить $p-n$ -переход с резким изменением концентрации примеси. При методе диффузии концентрация примесных атомов в области $p-n$ -перехода изменяется плавно.

Мощные плоскостные полупроводниковые диоды, рассчитанные на большие токи, изготавливают в массивных металлических корпусах, обеспечивающих поглощение и отвод теплоты, выделяющейся в *p-n*-переходе. С помощью массивных шайб и гаек корпус диода плотно прижимается к монтажной металлической панели.

Основной характеристикой диода служит его вольт-амперная характеристика, вид которой совпадает с видом характеристики *p-n*-перехода (см. рис. 16.12). Вольт-амперная характеристика диода существенно зависит от температуры окружающей среды, с повышением которой прямой ток диода при одном и том же напряжении может увеличиться в несколько раз. При заданном прямом токе с увеличением температуры снижается прямое напряжение между электродами диода.

Существенным образом влияет температура окружающей среды и на обратный ток, который тоже возрастает с увеличением температуры. При увеличении температуры окружающей среды выше определенного значения уже при небольших обратных напряжениях развивается тепловой пробой *p-n*-перехода и диод выходит из строя. Работоспособность германиевых диодов теряется при температуре около 70°С, а кремниевых — при 200°С. Высокая термическая устойчивость кремния — важнейшее его преимущество по сравнению с другими полупроводниковыми материалами. Кремниевые диоды допускают плотность тока в прямом направлении 10 А/мм² и более, что позволяет изготавливать мощные полупроводниковые устройства с относительно небольшими массами и габаритами.

Одна из важных характеристик диода — пробивное обратное напряжение. Это напряжение зависит от ширины обедненного слоя и у современных плоскостных диодов равно сотням и тысячам вольт. Оно несколько увеличивается с повышением температуры, не выходящим за пределы работоспособности диода.

Внутреннее сопротивление плоскостных диодов прямому току при номинальных режимах работы составляет десятки доли ом, с повышением температуры оно уменьшается.

(Ответьте на карт. № 16.6а.)

Карточка № 16.6а (175)
Полупроводниковые диоды

Укажите основное достоинство точечного диода	Малые размеры	223
	Простота конструкции	24
	Малая емкость <i>p-n</i> -перехода	74
Какой метод не применяется для создания <i>p-n</i> -перехода в плоскостных диодах?	Формовка большими импульсными токами	124
	Сплавление	174
	Диффузия	224
Из какого материала может быть изготовлена таблетка примеси для получения <i>p-n</i> -перехода методом сплавления в кристалле <i>p-n</i> -типа?	Из индия	25
	Из галлия	75
	Из мышьяка	125
Как изменяется пробивное напряжение диода с увеличением температуры от 0 до 70°С?	Увеличивается	175
	Уменьшается	225
	Это зависит от материала диода	26
С какой целью мощные диоды изготавливают в массивных металлических корпусах?	Для повышения прочности	76
	Для лучшего отвода теплоты	126
	Для повышения пробивного напряжения	176

Применение полупроводниковых диодов в современной технике весьма разнообразно. Рассмотрим наиболее характерные случаи.

Полупроводниковые диоды, предназначенные для выпрямления переменного тока, называются выпрямительными. Плоскостные диоды малой и средней мощности широко используют в схемах питания радиоаппаратуры, в устройствах автоматики и вычислительной техники. Диоды большой мощности используют в силовых установках для питания тяговых электродвигателей, привода станков и механизмов, обеспечения технологических процессов в химическом и металлургическом производствах.

Для характеристики выпрямительных свойств диодов вводится коэффициент выпрямления, равный отношению прямого и обратного токов при одном и том же напряжении (например, 1 В). Чем выше коэффициент выпрямления, тем меньше потери и выше КПД выпрямителя

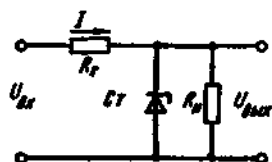


Рис 16.15 Схема стабилизации напряжения

Диоды, предназначенные для работы в устройствах высокой и сверхвысокой частоты (ультракоротковолновая и космическая радиосвязь, радиолокация, телеизмерительная техника и т. д.), называют высокочастотными. СВЧ-диоды используются для модуляции и детектирования сверхвысокочастотных колебаний в диапазоне сотен мегагерц, а также в каскадах преобразования частоты радиоприемных устройств. В качестве высокочастотных обычно применяют точечные диоды, емкость электронно-дырочного перехода в которых составляет сотые и десятые доли пикофарад.

Детекторные свойства СВЧ-диода, определяемые коэффициентом выпрямления, зависят от емкости $p-n$ -перехода. Чем меньше эта емкость, тем больше коэффициент выпрямления.

Ранее установили, что ширина обедненного слоя и, следовательно, емкость электронно-дырочного перехода зависят от напряжения, приложенного в непроводящем направлении. Такая зависимость дает возможность изменять емкость диода, варьируя обратное напряжение на нем. Диоды, применяемые в качестве конденсаторов с управляемой емкостью, называют **варикапами**.

Наличие у диода критического обратного напряжения, при котором наступает электрический (не тепло-

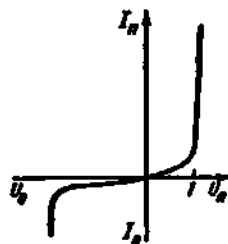


Рис 16.16. Вольт-амперная характеристика стабилитрона

вой) пробой (см. рис. 16.12), позволяет использовать полупроводниковый диод в схемах стабилизации напряжения. Одна из возможных схем стабилизации представлена на рис. 16.15. Выходное напряжение схемы с большой степенью точности поддерживается на заданном уровне $U_{\text{вых}} = \text{const}$, равном критическому (пробивному) напряжению диода U_r . Разница между входным и выходным напряжениями гасится на сопротивлении R_r .

Если входное напряжение возрастает, то увеличивается и обратный ток диода, возрастает ток I и падение напряжения на гасящем сопротивлении R_r . Приращение напряжений $\Delta U_{\text{вх}}$ и $\Delta I R_r$ взаимно компенсируются, а $U_{\text{вых}}$ сохраняется на заданном уровне.

Диод, используемый для стабилизации напряжения, называется **стабилитроном**. Недостаток рассмотренной схемы — зависимость пробивного напряжения стабилитрона, а следовательно, и выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от температуры. Эту зависимость можно существенно уменьшить, включив последовательно со стабилитроном компенсирующий диод в прямом направлении.

Для стабилизации малых напряжений (порядка 1 В) используют диод, включенный по той же схеме, но в прямом направлении. При этом для повышения степени стабильности выходного напряжения структуру электронно-дырочного перехода формируют так, чтобы вольт-амперная характеристика диода в прямом направлении по возможности круто поднималась вверх при возрастании напряжения стабилизации (рис. 16.16).

При больших концентрациях легирующих примесей заметно усиливается туннельный эффект $p-n$ -перехода. При этом в вольт-амперной характеристике диода появляется участок с отрицательным сопротивлением (прямой ток увеличивается с уменьшением прямого напряжения), что позволяет использовать его в схемах генерации и усиления электрических колебаний. Такие диоды называют **туннельными**.

Для работы в импульсных схемах изготавливают **импульсные диоды**, у которых перераспределение носителей зарядов в $p-n$ -переходах при смене полярности напряжения (переходные процессы) происходит в десятые доли наносекунды. Чем меньше время переходных процессов, тем меньше искажается

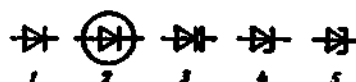


Рис 16.17 Условные обозначения полупроводниковых диодов: 1 — выпрямительный диод, 2 — СВЧ-диод, 3 — варикап, 4 — стабилитрон, 5 — туннельный диод

форма импульсов. Для ускорения переходных процессов уменьшают до возможного предела межэлектродную емкость, а также легируют область $p-n$ -перехода небольшой присадкой золота.

Условные обозначения некоторых полупроводниковых диодов изображены на рис. 16.17

Маркировку диодов осуществляют с помощью цифр и букв. Первая цифра или буква обозначает материал полупроводникового кристалла. Цифрой 1 или буквой Г обозначают германий; цифрой 2 или буквой К — кремний; цифрой 3 или буквой А — арсенид галлия. На втором месте ставят букву, обозначающую класс диода: Д — выпрямительный, А — СВЧ-диод, В — варикап; С — стабилитрон, И — туннельный диод. Три последующие цифры характеризуют тип или область применения прибора: если цифры лежат в пределах 101—399, то диод предназначен для выпрямления переменного тока; если в пределах 401—499, то для работы в высокочастотных и сверхвысокочастотных цепях; если в пределах 501—599, то работы в импульсных схемах; диоды, маркируемые цифрами 601—699, используют в качестве конденсаторов с регулируемой емкостью (варикапы). Последняя буква указывает на некоторые конструктивные или другие особенности диода (разновидность прибора).

Например, маркировка КС196В расшифровывается следующим образом. Кремниевый стабилитрон плоскостного типа, разновидность В.

Карточка № 16.66 (240)
Полупроводниковые диоды

Какие диоды применяют для выпрямления переменного тока?	Плоскостные	226
	Точечные	27
	Те и другие	77
Какие диоды применяют: а) для получения постоянного тока в химическом производстве, б) в качестве детекторов в радиоприемных устройствах?	а) Точечные; б) плоскостные	127
	а) Плоскостные; б) точечные	177
Какие диоды работают в режиме пробоя?	Варикапы	227
	Стабилитроны	28
	Туннельные диоды	78
	При пробое диоды выходят из строя	126

Продолжение

Какие диоды используют для генерации электрических колебаний?	Генераторы электрических колебаний могут быть построены только на триодах	178
	Импульсные диоды	228
	Туннельные диоды	29
Какими буквами маркируют высокочастотные и туннельные диоды?	В и Т	79
	А и И	129
	В и С	179

§ 16.7. БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР

Биполярным транзистором называют полупроводниковый прибор, основу которого составляют два взаимодействующих электронно-дырочных перехода и который имеет три вывода или более.

Биполярный транзистор является аналогом лампового триода, он способен выполнять усилительные, генераторные и ключевые функции.

Устройство биполярного транзистора, изготовленного методом сплавления, схематически представлено на рис. 16.18. В пластинку германия 1, легированного донорной примесью (с электронной электропроводностью), вплавлены две таблетки трехвалентного индия 3 (акцептор). В объеме германия возле пластинок индия образуются две области с дырочной электропроводностью 2, разделенные тонким слоем базовой пластины. У границ, разделяющих p -области и базу, образуются два электронно-дырочных перехода. Переход, изображенный на рисунке слева, называется эмиттерным, справа — коллекторным. Эмиттерный, коллекторный переходы и база имеют выводы для

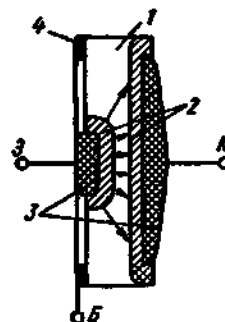


Рис. 16.18. Схематическое изображение транзистора типа $p-n-p$: 1 — кристалл германия типа n , 2 — области типа p , 3 — вплавленные пластинки индия, 4 — контактное кольцо базы; Э — эмиттерный вывод, К — коллекторный вывод, Б — вывод базы (стрелками показано движение дырок)

включения прибора в электрическую цепь (з, к, б).

Толщина базового слоя, разделяющего эмиттерный и коллекторный переходы, на рисунке значительно увеличена. Для того чтобы переходы взаимодействовали, толщина базовой прослойки между ними должна быть меньше диффузионной длины носителей заряда (т. е. меньше расстояния, которое проходят носители заряда до рекомбинации). У современных приборов толщина базы имеет порядок единиц микрометров. Кроме того, концентрацию легирующей примеси базы делают на два-три порядка меньше концентрации примесей в эмиттерной и коллекторной областях.

Материалы, методы получения p - n -переходов, параметры и конструктивное оформление современных транзисторов весьма разнообразны. Мы рассмотрели сплавной германиевый транзистор, у которого тип электропроводности областей меняется в следующем порядке: p (эмиттер), n (база), p (коллектор). Такой прибор называют транзистором типа p - n - p . Он может быть изготовлен и на основе кремния n -типа.

Если в качестве базы использовать германий или кремний p -типа, а эмиттерный и коллекторный переходы образовать с помощью донорных материалов, то получим транзистор типа n - p - n . Такие транзисторы применяют в высокочастотных схемах.

Принцип действия транзисторов обоих типов одинаков. Разница в том, что полярность включения источников питания для них противоположна (рис. 16.19). В соответствии с этим в транзисторе типа p - n - p коллекторный ток создается движением дырок, а в транзисторе типа n - p - n — движением электронов.

Рассмотрим принцип действия транзистора типа p - n - p (рис. 16.19, а).

Разомкнем цепь эмиттера, а коллектор оставим под напряжением указанной полярности. Коллекторный переход, как видно из рисунка, находится под обратным напряжением, при этом через него протекает небольшой ток, образованный движением основных носителей. Этот начальный ток у германиевых транзисторов составляет десятки, а у кремниевых — единицы микроампер.

Замкнем цепь эмиттера. Эмиттерный переход окажется под прямым напряжением. Через него потечет прямой ток, образованный диффузией дырок в

базу и диффузией электронов в эмиттер. Ранее было отмечено, что концентрация электронов в базе значительно меньше, чем концентрация дырок в эмиттере, поэтому ток через переход практически создается эмиттированием дырок в базу.

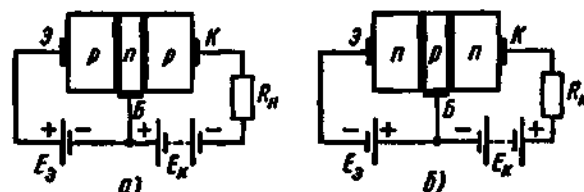


Рис. 16.19 Включение источников питания транзистора
а) типа p - n - p б) типа n - p - n

Так как толщина базы невелика, то дырки пройдут ее без рекомбинации и диффундируют в область коллектора, где, перемещаясь под действием коллекторного напряжения, создадут коллекторный ток.

Небольшая часть дырок, рекомбинировавших в базе, а также электроны, диффундирующие из базы в эмиттер, создадут небольшой ток базы, примерно на два порядка меньший токов эмиттера и коллектора.

Таким образом, коллекторный ток и пропорциональное ему напряжение на R_n почти полностью определяются количеством эмиттированных дырок, т. е. током эмиттера.

Отношение приращения тока коллектора к вызвавшему его приращению тока эмиттера при постоянном напряжении на коллекторе называется коэффициентом усиления по току $\alpha = \Delta I_k / \Delta I_e$, при $U_k = \text{const}$.

Коэффициент усиления по току тем выше, чем больше эмиттированных дырок диффундирует через коллекторный переход. Конструкция транзистора обеспечивает экстракцию (улавливание) коллектором до 99% дырок, эмиттированных в базу.

В рассмотренной схеме включения коэффициент усиления транзистора по току меньше единицы (0,95—0,99). Схема может быть использована для усиления сигнала по напряжению или мощности. Действительно, несмотря на то что токи эмиттера и коллектора примерно равны, напряжение в цепи коллектора, а следовательно, и мощность могут в десятки

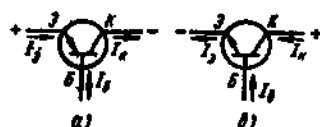


Рис. 16.20. Условные обозначения биполярных транзисторов:
а — типа $p-n-p$; б — типа $n-p-n$

раз превышать напряжение и мощность в цепи эмиттера. Отметим, что названия «эмиттер» (инжектор, излучатель носителей заряда), «коллектор» (собираатель носителей) и «база» отвечают функциональному назначению этих частей биполярного транзистора.

Полярность электродов транзисторов показана на рис. 16.20, причем база заземлена (потенциал равен нулю).

(Ответьте на кар. № 16.7а.)

Карточка № 16.7а (257)
Биполярный транзистор

В каком направлении включается эмиттерный и коллекторный $p-n$ -переходы?	Это зависит от типа транзистора ($p-n-p$ или $n-p-n$)	229
	Эмиттерный — в прямом, коллекторный — в обратном	30
	Оба — в прямом направлении	80
	Эмиттерный — обратном, коллекторный — в прямом	130
Какие конструктивные особенности принципиально отличают базу от эмиттера и коллектора?	Толщина	180
	Тип примеси	230
	Концентрация примеси	31
	Все указанные выше	81
Как изменится ток базы (см. рис. 16.19, а) с увеличением концентрации легирующей примеси в ней?	Не изменится	131
	Увеличится	181
	Уменьшится	231
Как изменится коэффициент усиления по току: а) с увеличением толщины базы; б) с увеличением концентрации примеси в базе?	а), б) Не изменится	32
	а) Увеличится; б) уменьшится	82

Продолжение

	а) Уменьшится; б) увеличится	132
	а), б) Уменьшится	232
Что произойдет, если в транзисторе типа <i>p-n-p</i> (см. рис 16.19, а) плюс подключить к коллектору, а минус к эмиттеру?	Прибор выйдет из строя	33
	Транзистор не будет работать	83
	Уменьшится коэффициент усиления	133

Рассматривая последовательность слоев биполярного транзистора, нетрудно убедиться, что в принципе работоспособность прибора сохранится, если эмиттер и коллектор поменять местами. Однако и ниверсное включение неравноценно нормальному вследствие несимметричности конструкции (см. рис. 16.18) транзистора.

Так как размеры эмиттера меньше размеров коллектора, то при ниверсном включении эмиттер не сможет уловить значительную часть носителей заряда, инжектированных коллектором в базу. Кроме того, из-за малых размеров эмиттер, используемый в роли коллектора, будет быстрее нагреваться. При неправильном включении триода эффективность его работы заметно снизится.

Итак, включать транзистор в схему следует в строгом соответствии с обозначением его выводов согласно типу транзистора.

Независимо от типа транзистора ($p-n-p$ или $n-p-n$) применяют три основные схемы его включения: с общей базой, с общим эмиттером, с общим коллектором.

Схема включения транзистора с общей базой изображена на рис. 16.21.

Коэффициентом усиления сигнала назовем отношение его приращения на выходе к приращению на входе

$$k_x^0 = \Delta x_{\text{вых}} / \Delta x_{\text{вх}}$$

(индекс справа вверху соответствует схеме включения). Следовательно, коэффициент усиления:

по току

$$k_I^0 = \Delta I_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{вх}} = \Delta I_c / \Delta I_b = \alpha;$$

по напряжению

$$k_a^6 = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}} = R_n \Delta I_k / (R_{\text{вх}}^6 \Delta I_b) = \alpha R_n / R_{\text{вх}}^6;$$

по мощности

$$k_p^6 = k_i^6 k_a^6 = \alpha^2 R_n / R_{\text{вх}}^6$$

Здесь R_n — сопротивление нагрузки; $R_{\text{вх}}^6 = \Delta U_{\text{вх}} / \Delta I_b$ — входное сопротивление транзистора, включенного

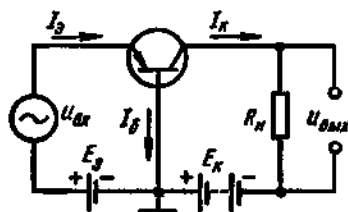


Рис. 16.21. Включение транзистора по схеме с общей базой

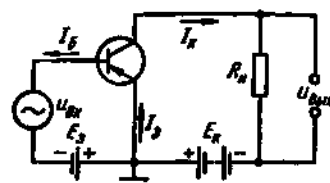


Рис. 16.22. Включение транзистора по схеме с общим эмиттером

по схеме с общей базой. Значения $R_{\text{вх}}^6$ лежат в пределах от единиц до десятков ом.

Наиболее распространенной и универсальной по параметрам является схема с общим эмиттером, изображенная на рис. 16.22.

Для этой схемы входным является ток базы, а выходным — ток коллектора; следовательно,

$$k_i^6 = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b - \Delta I_k} = \frac{\Delta I_k / \Delta I_b}{\Delta I_b / \Delta I_b - \Delta I_k / \Delta I_b} = \frac{\alpha}{1 - \alpha};$$

$$k_a^6 = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} = \frac{\Delta I_k R_n}{\Delta I_b R_{\text{вх}}^6} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{R_n}{R_{\text{вх}}^6};$$

$$k_p^6 = k_i^6 k_a^6; \quad R_{\text{вх}}^6 = \Delta U_{\text{вх}} / \Delta I_b.$$

Так как ток базы в десятки раз меньше тока эмиттера, то при прочих равных условиях входное сопротивление схемы с общим эмиттером $R_{\text{вх}}^6$ в десятки раз больше входного сопротивления схемы с общей базой $R_{\text{вх}}^6$. Действительно, $\Delta I_b = \Delta I_k - \Delta I_e = \Delta I_k (1 - \alpha)$; следовательно,

$$R_{\text{вх}}^6 = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta I_b (1 - \alpha)} = \frac{R_{\text{вх}}^6}{1 - \alpha}.$$

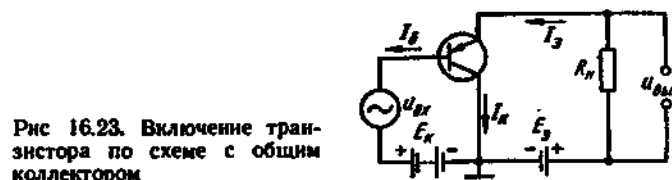


Рис. 16.23. Включение транзистора по схеме с общим коллектором

На рис. 16.23 изображена схема включения транзистора с общим коллектором. Для этой схемы

$$k_i^6 = \frac{\Delta I_e}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_e}{\Delta I_b - \Delta I_k} = \frac{\Delta I_e / \Delta I_b}{(\Delta I_e / \Delta I_b) - (\Delta I_k / \Delta I_b)} = \frac{1}{1 - \alpha}$$

Коллекторный переход источником ЭДС E_k смещен в обратном направлении, поэтому приращение напряжения входного сигнала $\Delta U_{\text{вх}}$ будет действовать не через переход база — коллектор, а через переход эмиттер — база и сопротивление нагрузки R_n . Имея в виду, что сопротивление эмиттерного перехода, включенного в прямом направлении, мало, им можно пренебречь и считать, что $\Delta U_{\text{вх}} \approx \Delta I_e R_n$. Поэтому

$$k_a^6 = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}} \approx \Delta I_e R_n / (\Delta I_e R_n) = 1;$$

$$k_p^6 = k_i^6 k_a^6 = k_i^6;$$

$$R_{\text{вх}}^6 = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta I_b} \approx \frac{\Delta I_e R_n}{\Delta I_b} = \frac{1}{1 - \alpha} R_n.$$

Таким образом, транзистор с общим коллектором практически не меняет значения напряжения сигнала. Его называют эмиттерным повторителем. Подбирая R_n , входное сопротивление эмиттерного повторителя можно сделать достаточно большим.

Приведенные соотношения позволяют найти все рассмотренные параметры любой из трех схем, если из опыта определены или рассчитаны всего два параметра: α и $R_{\text{вх}}^6$.

Подчеркивая аналогию между биполярным транзистором и ламповым триодом, следует отметить и их существенное различие: ламповый триод может работать (и обычно работает) без тока в цепи управляющей сетки, в управляющей же цепи транзистора (в цепи базы) всегда протекает ток.

Чем больше входное сопротивление схемы, тем меньше ток в управляющей цепи.

(Ответьте на карт № 16.76.)

Карточка № 16.76 (424)
Биполярный транзистор

Укажите полярность напряжения: а) на эмиттере транзистора типа <i>p-n-p</i> ; б) на коллекторе транзистора типа <i>n-p-n</i>	а), б) Плюс	182
	а), б) Минус	183
	а) Плюс; б) минус	34
Транзистор включен по схеме с общей базой (см. рис. 16.21). Может ли превышать единицу: а) коэффициент усиления по току; б) коэффициент усиления по напряжению?	а), б) Могут	84
	а) Может; б) не может	134
	а) Не может; б) может	184
При включении транзистора по схеме с общей базой коэффициент усиления по току равен 0,95. Чему равен коэффициент усиления по току этого транзистора, если его включить по схеме с общим эмиттером?	0,95	234
	0,05	35
	19	85
	20	135
Транзистор, рассмотренный в предыдущем вопросе, включен по схеме с общим коллектором. Чему равен коэффициент усиления по току?	0,95	185
	1	36
	19	235
	20	86
При какой схеме включения транзистора коэффициент усиления по мощности меньше или равен единице?	С общей базой	136
	С общим эмиттером	186
	С общим коллектором	37
	Во всех случаях он больше единицы	87

Характеристики выражают зависимость между напряжениями и токами в цепях транзистора. Наибольшее значение получили входные, выходные и переходные характеристики. Обычно характеристики снимают по схеме с общей базой или с общим эмиттером.

В качестве примера рассмотрим статические (снятые при постоянном напряжении) характеристики транзистора типа *p-n-p* в схеме общей базой.

Входной характеристикой называется зависимость тока эмиттера от напряжения между эмиттером и базой при неизменном напряжении между коллектором и базой. Устанавливая различные значе-

ния напряжения между коллектором и базой ($U_K = \text{const}$), получим семейство входных характеристик (рис. 16.24, а).

Выходной (коллекторной) характеристикой называется зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и базой при постоянном

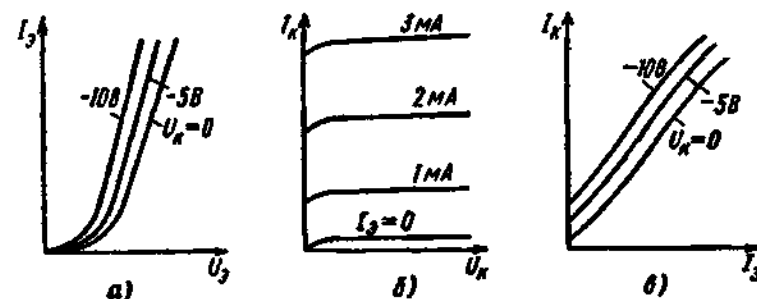


Рис. 16.24. Характеристики биполярного транзистора в схеме с общей базой:
а — входные; б — выходные; в — переходные

токе эмиттера. Задавая различные значения тока эмиттера ($I_E = \text{const}$), получают семейство выходных характеристик (рис. 16.24, б).

Переходной характеристикой (характеристикой прямой передачи) называют зависимость тока коллектора от тока эмиттера при постоянном напряжении между коллектором и базой. Семейство таких характеристик приведено на рис. 16.24, в.

Входные и выходные характеристики получают экспериментально, переходные характеристики могут быть построены на основе семейства выходных характеристик.

Характеристики транзистора можно использовать для определения его параметров. Так, коэффициент α легко находят по переходным, а входное сопротивление $R_{вх}$ — по входным характеристикам.

При расчете цепей широко используют представление транзисторов в виде четырехполюсников. При этом параметры транзистора характеризуют коэффициентами четырехполюсника. Для биполярного транзистора эти коэффициенты принято называть *h-параметрами*, их можно определить расчетом или экспериментально.

Для сравнительной оценки транзисторов при различных схемах включения их основные параметры сведены в табл. 16.1.

Таблица 16.1

Параметр	Схема включения		
	с общей базой	с общим эмиттером	с общим коллектором
k_1	Около единицы	Десятки	Десятки
k_u	Тысячи	Тысячи	Около единицы
R_{ex}	Десятки	Тысячи	Сотни тысяч

Следует отметить, что одним из существенных недостатков транзисторов является относительно высокая нестабильность их параметров и характеристик. Причины нестабильности следующие: разброс параметров в процессе изготовления однотипных транзисторов; влияние температуры окружающей среды; влияние радиоактивных излучений; изменение параметров с изменением частоты усиливаемых сигналов; изменение параметров при старении транзисторов с течением времени.

Для транзисторов характерен также относительно высокий уровень собственных шумов, вызываемых тепловыми флуктуациями плотности носителей зарядов.

Карточка № 16.7а (294)
Биполярный транзистор

Как называется зависимость $I_c = f(I_b)$ при $U_c = \text{const}$?	Входной характеристикой	137
	Выходной характеристикой	187
	Переходной характеристикой	38
Семейство каких характеристик можно получить, меняя I_b ?	Входных характеристик	88
	Выходных характеристик	138
	Переходных характеристик	188
По переходной характеристике (см. рис. 16.24, в) найдено, что при увеличении тока эмиттера на 10 мА ток коллектора увеличился на 9 мА. Найдите α	$\alpha = 0,9$	39
	$\alpha = 19$	89
	$\alpha = 0,95$	139

Продолжение

Когда используются h -параметры?	При расчете радиосхем	189
	При определении коэффициента усиления транзистора	40
Какая схема включения транзистора эквивалентна схеме катодного повторителя?	С общей базой	90
	С общим эмиттером	140
	С общим коллектором	190

§ 16.8. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Физические принципы, положенные в основу полевых транзисторов, были известны давно, однако их реализация встретила существенные технические трудности. Только в 60-х годах полевые транзисторы начали широко применять в различных областях электроники.

В полевых транзисторах используют эффект воздействия поперечного электрического поля на проводимость канала, по которому движутся носители электрического заряда.

Полевые каналные транзисторы имеют существенные преимущества, к которым прежде всего относятся большое входное сопротивление приборов ($10^{10} - 10^{15}$ Ом), большая устойчивость к проникающим излучениям (допускается уровень излучений, на 3—4 порядка больший, чем для биполярных транзисторов), малый уровень собственных шумов, малое влияние температуры на усилительные свойства.

Полевые транзисторы изготовляют двух типов: с затвором в виде p - n -перехода и с изолированным затвором.

Устройство транзистора с затвором в виде p - n -перехода схематично представлено на рис. 16.25. Основу прибора составляет слаболегированная полупроводниковая пластина p -типа, к торцам

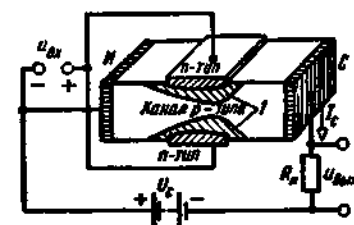


Рис. 16.25. Схематическое изображение полевого транзистора с p - n -переходами: N — исток; C — сток; I — обедненный слой

которой приложено напряжение U_c , создающее ток I_c через сопротивление нагрузки R_n . В полупроводниковой пластине этот ток обеспечивается движением основных носителей заряда. Торец пластины, от которого движутся носители заряда, называется истоком. Торец, к которому движутся носители заряда, — стоком. В две противоположные боковые поверхности основной p -пластины вплавлены пластинки типа n . На границе раздела пластин n и p возникают электронно-дырочные переходы. К этим переходам в непроводящем направлении приложено входное напряжение $u_{вх}$. Значение напряжения $u_{вх}$ можно менять при обязательном сохранении указанной на рисунке полярности. Обычно $u_{вх}$ состоит из двух составляющих: переменного напряжения управляющего сигнала и постоянной составляющей начального смещения, значение которой превышает амплитуду сигнала. Пластинки n -типа образуют затвор. При указанной полярности напряжения на затворе вокруг этих пластин образуется слой, обедненный носителями заряда n , следовательно, имеющий малую проводимость. Между обедненными слоями сохраняется канал с высокой проводимостью.

Принцип действия полевого транзистора основан на изменении ширины обедненного слоя при изменении обратного напряжения p - n -перехода (см. § 16.5). С увеличением напряжения на затворе ширина обедненных слоев увеличивается, а поперечное сечение канала и его проводимость уменьшаются.

Таким образом, изменяя напряжение $u_{вх}$ на затворе, можно менять ток через сопротивление нагрузки R_n и выходное напряжение $u_{вых}$.

Работу полевого транзистора принято характеризовать зависимостью тока стока I_c от напряжения между истоком и стоком U_c при различных значениях напряжения на затворе U_z . Эта зависимость аналогична анодной характеристике усилительной лампы.

Семейство характеристик полевого транзистора с затвором в виде p - n -перехода изображено на рис. 16.26. Сначала с увеличением U_c ток I_c нарастает практически линейно. Затем наступает режим насыщения и увеличение U_c не приводит к росту тока. Это объясняется тем, что при насыщении напряженность продольного поля в канале складывается с напряженностью поперечного поля и канал в области стока сужается. Причем чем больше напряженность

продольного поля (чем больше U_c), тем больше сужается канал в области стока. Ток при этом остается постоянным. Ток насыщения тем меньше, чем больше напряжение на затворе (обратное напряжение p - n -перехода).

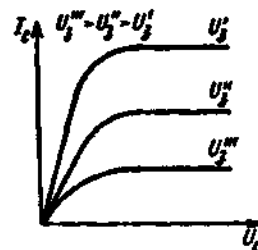


Рис. 16.26. Семейство характеристик полевого транзистора с затвором в виде p - n -перехода

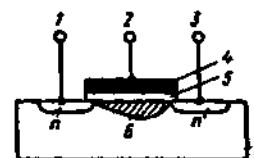


Рис. 16.27. Схематическое изображение полевого транзистора с изолированным затвором:
1 — исток; 2 — затвор;
3 — сток; 4 — металл;
5 — диэлектрик; 6 — канал n -типа; 7 — полупроводник p -типа

Устройство полевого транзистора с изолированным затвором схематически показано на рис. 16.27. Основу прибора составляет пластина полупроводника p -типа. На небольшом расстоянии друг от друга в поверхность основной пластины впаляют донорную примесь. Затем поверхность пластины кремния подвергают термической обработке, в результате чего на ней наращивается тонкий (0,1 мкм) слой диоксида, являющегося хорошим изолятором. На слой изолятора накладывают металлическую пластину затвора, перекрывающую области донорной примеси n .

Транзисторы с изолированным затвором чаще называют транзисторами типа МДП (металл — диэлектрик — полупроводник). Упрощенно принцип его работы можно представить следующим образом: при отсутствии напряжения на затворе области n истока и стока разделены непроводящей прослойкой основной пластины; при подаче на затвор положительного напряжения электроны вытягиваются из основной пластины и скапливаются под изолирующей прослойкой. При определенной разности потенциалов

концентрация электронов под диэлектриком превысит концентрацию дырок и области n будут соединены проводящим электронным каналом.

В рассмотренном случае проводящий канал между истоком и стоком индуцируется напряжением затвора. Разновидностью МДП-транзисторов являются конструкции, при которых канал «встраивается» в процессе изготовления прибора путем введения соответствующих примесей. Напряжение затвора меняет концентрацию носителей и проводимость встроенного канала.

Полевые транзисторы могут быть изготовлены и на основе пластин n -типа.

Карточка № 16.8 (202)
Полевые транзисторы

У каких транзисторов: а) большая устойчивость к радиации, б) меньшее влияние температуры на параметры; в) меньшие собственные шумы?	а), б), в) У полевых	41
	а), б) У полевых, в) у биполярных	91
	а) У биполярных, б) и в) у полевых	141
В каком направлении включены p - n -переходы на рис. 16.25?	В прямом	191
	В обратном	42
Как изменяется ток стока при увеличении напряжения на затворе (см. рис. 16.25)?	Не меняется	92
	Увеличивается	142
	Уменьшается	192
Как изменится ток стока при увеличении положительного потенциала на затворе МДП-транзистора, изображенного на рис. 16.27?	Увеличится	43
	Уменьшится	93
У какого транзистора входное сопротивление максимально?	У биполярного	143
	У полевого с затвором в виде p - n -перехода	193
	У МДП-транзистора	44

§ 16.9. ТИРИСТОРЫ

Первые промышленные образцы тиристоров появились в конце пятидесятых годов. В настоящее время эти приборы получили широкое распространение. Преимущества тиристоров следующие: малые масса и габариты, большой срок службы, высокий КПД, малая чувствительность к вибрации и механическим перегрузкам, способность работать при низких (прямых) и высоких (обратных) напряжениях, а также при очень больших токах, достигающих сотен ампер.

Основное свойство тиристора, обеспечивающее ему самые разнообразные применения в автоматике, электронике, энергетике, — это способность находиться в двух устойчивых состояниях: закрытом и открытом. В закрытом состоянии сопротивление тиристора составляет десятки миллионов ом и он практически не пропускает ток при напряжениях до тысячи вольт; в открытом — сопротивление тиристора незначительно. Падение напряжения на нем около 1 В при токах в десятки и сотни ампер. Переход тиристора из одного состояния в другое происходит за очень короткое время, практически скачком. Среди тиристоров выделяют динисторы и тринисторы.

Динистор — это тиристор с двумя электродами (выводами). Переход динистора из одного состояния в другое осуществляется изменением значения или полярности напряжения на выводах.

Тиристор, снабженный третьим (управляющим) электродом, называется тринистором. Управляющий электрод позволяет с помощью небольшого сигнала управления (импульса напряжения) перевести тиристор из закрытого состояния в открытое при неизменном (заданном) напряжении на основных электродах. Обратный переход из открытого состояния в закрытое с помощью управляющего напряжения невозможен.

Структура тиристора содержит четыре (p - n - p - n) или пять (p - n - p - n - p) слоев. В последнем случае тиристор называют симметричным.

Четырехслойная структура тиристора изображена на рис. 16.28. Тиристор содержит три p - n -перехода: Π_1 , Π_2 , Π_3 . Чтобы повысить эффективность управляю-

щего сигнала u_c , слой, к которому подключен управляющий электрод, делают тоньше остальных.

Физические процессы в четырехслойной структуре и тем более их математическое описание достаточно сложны, поэтому ограничимся лишь общими сильно упрощенными представлениями.

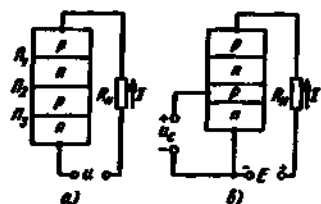


Рис. 16.28. Схематическое изображение тиристора: а — диностор, б — триностор

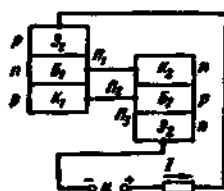


Рис. 16.29. Представление тиристора в виде двух транзисторов

Четырехслойную структуру тиристора можно представить в виде двух соответствующим образом соединенных транзисторов $p-n-p$ и $n-p-n$ типов (рис. 16.29). Как видно из схемы, к переходам Π_1 и Π_3 подведено прямое напряжение, а к переходу Π_2 — обратное. Если бы не было переходов Π_1 и Π_3 , тиристор превратился бы в диод и через переход Π_2 проходил бы обратный ток I_0 . При наличии переходов Π_1 и Π_3 через переход Π_2 проходят два дополнительных тока: коллекторный ток $I_{к1}$ транзистора $p-n-p$ и коллекторный ток $I_{к2}$ транзистора $n-p-n$. Ток $I_{к1}$ создает дырки, а ток $I_{к2}$ — электроны. Поэтому ток I через переход Π_2 , равный току через сопротивление нагрузки, можно рассматривать как сумму трех токов: $I = I_0 + I_{к1} + I_{к2}$.

Выразив коллекторные токи транзисторов через эмиттерные токи, получим

$$I = I_0 + \alpha_1 I_{e1} + \alpha_2 I_{e2}.$$

Уточним понятие о коэффициентах α_1 и α_2 , с помощью которых коллекторные токи выражаются через эмиттерные (см. § 16.7). Мы установили, что α зависит от того, какая часть эмиттированных носителей заряда достигает коллектора, и считали для каждого конкретного транзистора коэффициент α постоянным. Однако это справедливо только для нормальных ре-

жимов работы, близких к номинальному. При больших отклонениях тока эмиттера от номинальных значений коэффициент α существенно изменяется (рис. 16.30). В частности, при малых токах эмиттера коэффициент α близок к нулю, так как почти все носители, эмиттированные в базу, рекомбинируют в ней, не доходя до коллектора.

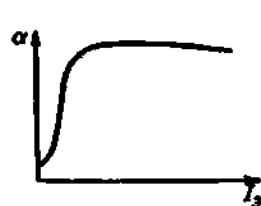


Рис. 16.30. Зависимость коэффициента α от тока эмиттера

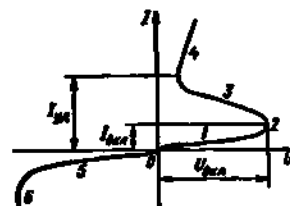


Рис. 16.31. Вольт-амперная характеристика диностора

Обратимся еще раз к рис. 16.29: непосредственно из схемы находим, что $I_{e1} = I_{e2} = I$, поэтому выражение для тока нагрузки принимает вид

$$I = I_0 + \alpha_1 I + \alpha_2 I,$$

откуда

$$I = \frac{I_0}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}.$$

Последнее выражение характерно для схем с положительной обратной связью. Если знаменатель стремится к нулю, ток неограниченно возрастает (на самом деле ток ограничен сопротивлением нагрузки, которое мы не учитывали в наших рассуждениях).

Основной для тиристора является вольт-амперная характеристика, показывающая зависимость тока в нагрузке от напряжения цепи. Эта характеристика (рис. 16.31) имеет сложный вид, так как при изменении напряжения изменяется не только ток I_0 , но и коэффициенты α_1 , α_2 .

На характеристике можно выделить несколько характерных участков. При малых значениях напряжения U ток в цепи, а следовательно, и коэффициенты α_1 и α_2 малы, при этом $I \approx I_0$ и тиристор ведет себя как диод, включенный в обратном направлении (участок 1). При достижении напряжением критического

значения $U_{\text{вкл}}$ (точка 2) коэффициенты α_1 и α_2 быстро возрастают, а ток скачком увеличивается до значений, превышающих $I_{\text{уд}}$ (участок 4). Наклон характеристики на этом участке определяется значением нагрузочного сопротивления. Взаимодействие транзисторов, условно выделенных на рис. 16.29, приводит к такому быстрому возрастанию α_1 и α_2 , что в течение короткого времени ток увеличивается даже при снижении напряжения (участок 3). Снижение напряжения при увеличении тока свидетельствует о том, что на этом участке тиристор имеет отрицательное сопротивление. Участок 5 соответствует обратному включению переходов P_1 и P_3 . При некотором значении обратного напряжения наступает необратимый пробой переходов P_1 и P_3 и тиристор разрушается (участок 6).

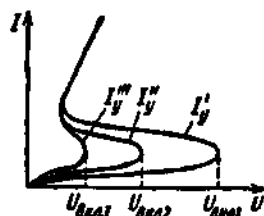


Рис. 16.32. Вольтамперная характеристика тринистора

Ток, при котором сопротивление тиристора становится отрицательным, называют током включения $I_{\text{вкл}}$. Для того чтобы перевести тиристор из открытого (включенного) состояния в закрытое, необходимо снизить ток через него до значений, меньших значения удерживающего тока $I_{\text{уд}}$.

Семейство вольт-амперных характеристик тринистора представлено на рис. 16.32. Подавая на управляющий электрод соответствующий сигнал, можно менять напряжение включения тиристора. Чем больше ток управления I_y , тем меньше напряжение включения тиристора.

Вольт-амперная характеристика симметричного тиристора с пятислойной структурой (p-n-p-n-p) изображена на рис. 16.33. В соответствии с симметрией структуры симметрична и характеристика прибора.

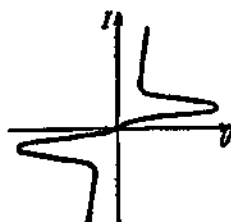


Рис. 16.33. Вольтамперная характеристика симметричного тиристора

Ранее отмечалось, что управляющий электрод может изменять только момент включения (напряжение включения) тиристора. Для перевода тиристора из открытого состояния в закрытое необходимо уменьшить ток тиристора до значений, меньших $I_{\text{уд}}$. В цепях переменного тока это происходит при смене полярности питающего напряжения. В цепях постоянного тока обратное переключение тиристора требует специальных устройств. Один из возможных вариантов схемы приведен на рис. 16.34. При подаче на базу транзистора импульса напряжения ток через транзистор резко возрастает и соответственно уменьшается ток тиристора. Включение тиристора осуществляется подачей импульса напряжения на управляющий электрод U , который на схеме не обозначен.

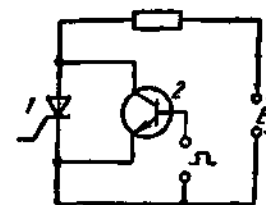


Рис. 16.34. Выключение тиристора с помощью шунтирующего транзистора:
1 — тиристор; 2 — транзистор

Карточка № 16.9 (377) Тиристоры

Каким способом нельзя перевести тиристор из открытого состояния в закрытое?	Уменьшением до нуля напряжения на основных электродах	94
	Изменением полярности напряжения на основных электродах	144
	Изменением полярности напряжения на управляющем электроде	194
Сколько p-p-переходов имеет симметричный тиристор?	3	45
	4	95
	5	145
Чему равны коэффициенты α_1 и α_2 на участке 1 кривой, изображенной на рис. 16.31?	Близки к единице	46
	Близки к нулю	195
Что произойдет с коэффициентами α_1 и α_2 вблизи точки 2 (см. рис. 16.31)?	Изменяют знак	96
	Быстро возрастут	146

Чем определяется угол наклона участка 4 относительно горизонтальной оси? (см. рис. 16.31)	Напряжением на основных электродах	47
	Напряжением на управляющих электродах	97
	Сопротивлением нагрузки, включенной последовательно с тиристором	147

§ 16.10. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ И ТИРИСТОРОВ

Транзисторы и тиристоры оказались экономически эффективными при замене электронно-вакуумных устройств, их применение дало возможность решить ряд новых задач в электронике в приборостроении.

Следует отметить, что во многих случаях схемы с одним и тем же функциональным назначением могут быть собраны как на транзисторах, так и на тиристорах. Поэтому перед конструктором стоит задача — используя современную элементную базу, разработать наиболее эффективные и экономичные устройства.

Транзисторы и тиристоры применяют в проводной связи и радиосвязи, в телевидении и радиолокации, радионавигации, автоматике и телемеханике, в вычислительной и измерительной технике. Все отрасли современного народного хозяйства требуют постоянного расширения ассортимента и увеличения количества полупроводниковых приборов.

Особой областью применения мощных и сверхмощных (на токи в тысячи ампер и напряжения в тысячи вольт) тиристоров является электроэнергетика. Возможность создания малогабаритных, надежных и экономичных статических преобразователей любых параметров тока открывает огромные перспективы для дальнейшего совершенствования систем передачи и распределения электроэнергии, управления электроприводом и другими электротехническими устройствами.

Схемы электро- и радиотехнических устройств содержат десятки и сотни транзисторов. Для их изоб-

ражения введены специальные стандартизованные условные обозначения, которые приводятся ниже.

Разнообразие типов транзисторов и тиристоров потребовало их классификации (по материалам и конструктивному оформлению, по принципу действия, по условиям эксплуатации и др.). Основные типовые особенности транзисторов и тиристоров отображены в их маркировке.

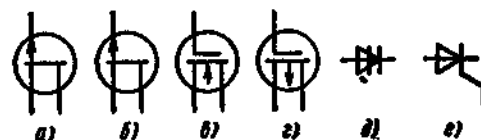


Рис. 16.35. Условные обозначения полевых транзисторов и тиристоров:

а — полевой транзистор с управляющим р-п-переходом и каналом n-типа; б — то же, с каналом p-типа; в — полевой МДП-транзистор с каналом n-типа, г — то же, с каналом p-типа, д — диностор; е — триностор

Маркировка приборов осуществляется буквенно-цифровым кодом. Стоящая впереди буква или цифра характеризует исходный полупроводниковый материал: Г (или 1) — германий; К (или 2) — кремний. Стоящая на втором месте буква определяет класс прибора: Т — биполярный транзистор; П — полевой транзистор; Н — диностор; У — триностор. На третьем месте ставится цифра, определяющая параметры прибора (мощность, ток, диапазон частот). Далее следует двузначное число от 01 до 99, обозначающее номер разработки, и буква, указывающая разновидность технологического типа.

Условные обозначения биполярных транзисторов приведены на рис. 16.20, условные обозначения полевых транзисторов и тиристоров даны на рис. 16.35.

Карточка № 16.10 (344)
Области применения транзисторов и тиристоров

Какой буквой в маркировке обозначают управляемый тиристор?	Т	196
	У	197
	П	48
Из какого материала изготовлена база транзистора, марка которого начинается с цифры 2?	Из кремния	98
	Из германия	148

В каких схемах нецелесообразно использовать транзисторы?	В схемах генерации высокочастотных колебаний	198
	В схемах усиления сигналов по мощности	49
	В схемах выпрямления переменных токов	99
Какие приборы целесообразно использовать для преобразования параметров тока в системах энергоснабжения?	Биполярные транзисторы	149
	Полевые транзисторы	199
	Тиристоры	50
	Во всех перечисленных	200
В каких областях техники находят применение транзисторы и тиристоры?	В технике связи	50
	В вычислительной технике	150
	В автоматике	106
	Во всех перечисленных	200

ГЛАВА 17

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

§ 17.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Фотоэлектрическими приборами называют преобразователи лучистой энергии, благодаря которой изменяются электрические свойства вещества, образующего данный прибор.

Эти приборы делятся на два типа: с внешним и внутренним фотоэффектом.

Суть внешнего фотоэффекта состоит в том, что при облучении фотокатода светом возникает явление фотоэлектронной эмиссии. При этом ток фотоэмиссии прямо пропорционален световому потоку (закон Столетова):

$$I_{\phi} = k\Phi, \quad (17.1)$$

где I_{ϕ} — ток фотоэмиссии, мкА; Φ — световой поток, лм; k — интегральная чувствительность фотокатода.

Интегральная чувствительность равна значению фототока, вызванного световым потоком стандартного источника белого света в 1 лм.

Главные закономерности фотоэффекта были выведены А. Эйнштейном на основе фотонной теории света. Согласно этой теории, лучистая энергия излучается и поглощается не как непрерывный поток, а определенными порциями — квантами. Каждый квант (фотон) в зависимости от частоты излучения ν обладает определенным количеством энергии:

$$W = h\nu,$$

где $h = 6,66 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка.

Когда поток фотонов падает на фотокатод, энергия фотонов передается свободным электронам, которые, совершая определенную работу выхода W_0 , покидают катод с начальной скоростью u_0 . Этот процесс описывается уравнением Эйнштейна

$$h\nu = W_0 + (m_e u_0^2 / 2). \quad (17.2)$$

Из уравнения (17.2) следует, что электрон может покинуть катод, если работа выхода меньше энергии кванта.

Суть внутреннего фотоэффекта состоит в том, что в полупроводнике под действием световой энергии возникают подвижные носители зарядов: пары электронов и дырок. При этом энергия фотона идет на перемещение электрона из валентной зоны в зону проводимости и сопротивление полупроводника уменьшается.

Карточка № 17.1 (296)
Основные понятия и определения

Какова природа светового излучения?	Волновая	23
	Квантовая	2
	Двойственная — квантово-волновая	81
Зависит ли энергия от интенсивности светового потока Φ ?	Это зависит от спектрального состава излучения	9
	Да	32
	Нет	50

Какова зависимость между энергией фотона и длиной волны излучения λ ?	$W = h\lambda$	42
	$W = h/\lambda$	54
	$W = h/\lambda^2$	79
Как меняется начальная скорость эмиттируемого электрона при увеличении работы выхода?	Увеличивается	38
	Уменьшается	67
	Остается неизменной	27
Как влияет изменение температуры окружающей среды на качество работы фотоэлектрических приборов?	Положительно	19
	Отрицательно	44
	Не влияет	74

§ 17.2. ЭЛЕКТРОННЫЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ С ВНЕШНИМ ФОТОЭФФЕКТОМ

Фотоэлементами с внешним фотоэффектом называются электронные приборы, работа которых основана на явлении фотоэлектронной эмиссии с катода.

Фотоэлемент монтируется в стеклянной колбе, внутри которой, как и в электронных лампах, создается вакуум.

Фотокатодом элемента 1 (рис. 17.1) является тонкий слой светочувствительного материала (щелочно-

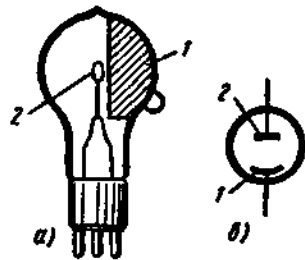


Рис. 17.1. Устройство (а) и условное изображение (б) фотоэлемента

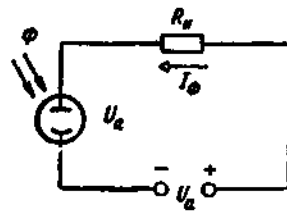


Рис. 17.2. Схема включения электронного фотоэлемента

земельного металла), которым покрыто около 50% внутренней поверхности колбы.

Анодом фотоэлемента 2 является кольцо из тонкой

никелевой проволоки, что обеспечивает свободное поступление света на фотокатод.

На рис. 17.2 представлена схема включения фотоэлемента, которая служит для преобразования светового потока в сигнал постоянного напряжения (тока). При освещении фотокатода в цепи появляется фототок I_ϕ , проходящий через сопротивление нагрузки R_n .

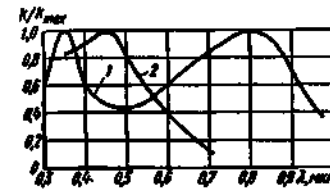


Рис. 17.3. Спектральные характеристики электронных фотоэлементов:
1 — с кислородно-цезиевым катодом; 2 — с сурьмяно-цезиевым катодом

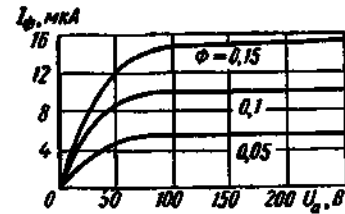


Рис. 17.4. Вольт-амперные характеристики электронных фотоэлементов

Так как, согласно (17.1), значение I_ϕ прямо пропорционально световому потоку, то выходное напряжение

$$U_n = R_n I_\phi = k R_n \Phi.$$

Интегральная чувствительность k электронных фотоэлементов с кислородно-цезиевым катодом составляет 20—60 мкА/лм, с сурьмяно-цезиевым — 80—180 мкА/лм.

Для правильной эксплуатации фотоэлементов необходимо знать их спектральные характеристики, ход которых показан на рис. 17.3.

Вольт-амперные характеристики, приведенные на рис. 17.4, дают возможность судить о зависимости фототока I_ϕ от анодного напряжения U_a при различных значениях светового потока Φ . Видно, что в режиме насыщения фототок не зависит от анодного напряжения. Этот режим и является рабочим.

Электронные фотоэлементы широко применяются в различных областях науки и техники. В частности, их применяют в фотореле, которые обеспечивают контроль различных величин на производстве: освещенности, прозрачности сред, качества обработки поверхностей деталей и т. п.

Электронные фотоэлементы, как и все фотоэлектри-

ческие приборы, обозначают буквенно-цифровым кодом. Например, СЦВ—3—электронный фотоэлемент с сурьмяно-цезиевым катодом, номер разработки—3.

Карточка № 17.2 (290)
Электронные фотоэлементы с внешним фотоэффектом

Какие электроны обеспечивают ток фотоэмиссии?	Только электроны валентной зоны	3
	Только электроны зоны проводимости	16
	Электроны обеих зон	55
Каково отношение между R_n и внутренним сопротивлением фотоэлемента R_i (см. рис. 17.2), когда $\Phi=0$?	$R_i \approx R_n$	49
	$R_i \ll R_n$	78
	$R_i \gg R_n$	76
Каким будет соотношение между R_n и R_i (см. рис. 17.2), когда световой поток достигает больших значений?	$R_i > R_n$	63
	$R_i < R_n$	87
	$R_i \approx R_n$	66
Определите значение напряжения на нагрузке U_n в схеме (см. рис. 17.2), пользуясь характеристиками (см. рис. 17.4), если $R_n=12,5$ МОм; $\Phi=0,1$ лм; $U_a=250$ В	$U_n=120$ В	60
	$U_n=130$ В	46
	$U_n=250$ В	20
Как изменится напряжение на R_n (см. рис. 17.2) в условиях предыдущей задачи, если $U_a=300$ В?	Увеличится на 50 В	84
	Уменьшится на 50 В	72
	Не изменится	12

§ 17.3. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ УМНОЖИТЕЛИ

Электронные фотоэлементы обладают относительно малой чувствительностью. Применение фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) позволяет устранить этот недостаток.

ФЭУ представляют собой приборы, в которых поток первичных электронов, полученных при фотоэлектронной эмиссии, усиливается посредством вторичной электронной эмиссии.

На рис. 17.5, а показана схема устройства и включения ФЭУ, а на рис. 17.5, б — его условное обозначение.

Кроме фотокатода и анода у ФЭУ имеется несколько электродов (динодов), которые являются эмиттерами вторичных электронов. Число динодов в современных ФЭУ достигает четырнадцати.

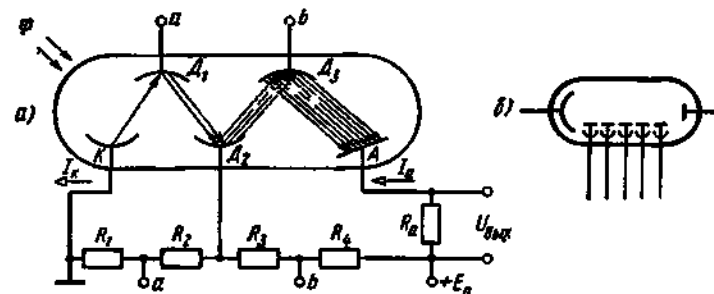


Рис. 17.5. Устройство и схема включения ФЭУ (а), его условное изображение (б)

При облучении фотокатода светом первичные электроны, ускоренные электрическим полем динода D_1 , выбивают из него вторичные электроны. Эти электроны ускоряются полем динода D_2 и выбивают из него новые вторичные электроны, и так до тех пор, пока вторичные электроны последнего динода не достигнут анода А. Анодный ток, проходя через R_n , выделяет на нем полезное напряжение.

Для того чтобы имел место эффект усиления электронного потока, отношения числа вторичных электронов к числу первичных для всех динодов должны быть больше единицы. Это отношение σ называют коэффициентом вторичной эмиссии.

Расчетный коэффициент усиления ФЭУ, имеющего n динодов, $k=\sigma^n$.

Так как для современных ФЭУ $\sigma=3\div 8$, то $k=10^6\div 10^7$. Однако на практике этот коэффициент значительно меньше, так как ток вторичной эмиссии ограничен объемным отрицательным зарядом электронов, сосредоточенным около динодов.

Для нормальной работы ФЭУ между соседними динодами необходимо обеспечить напряжение порядка 50—150 В.

С помощью ФЭУ можно регистрировать световые потоки до 10^{-9} лм. Регистрация более слабых световых сигналов ограничена наличием темнового тока, который вызван термоэлектронной эмиссией фотокатода.

да, а также электростатической эмиссией динодов. Интегральная чувствительность современных ФЭУ — 1—100 А/лм.

ФЭУ применяют в разнообразных автоматических и измерительных схемах.

При обозначении марки ФЭУ (например, ФЭУ-19) цифра соответствует номеру разработки.

Карточка № 17.3 (170)
Фотоэлектрический умножитель

Каким явлением обусловлен ток динодов?	Явлением фотоэмиссии	71
	Явлением вторичной эмиссии	4
	И тем и другим явлением	69
Как повлияет на работу ФЭУ (см. рис. 17.5, а) короткое замыкание на участке R_2 ?	Ухудшается чувствительность ФЭУ	15
	ФЭУ выйдет из строя	36
	Полезный ток I_a упадет до нуля	24
Каково соотношение между токами I_k и I_a в схеме ФЭУ на рис. 17.5, а?	$I_k > I_a$	40
	$I_k < I_a$	65
	$I_k = I_a$	10
Существует ли ток эмиссии фотокатода (темновой ток), когда $\Phi = 0$?	Не существует	70
	Существует	48
	Это зависит от температуры катода	56
В каком из приборов: ФЭУ или фотоэлементе — при работе схемы сильнее сказываются колебания темнового тока фотокатода?	В схеме фотоэлемента	52
	В схеме ФЭУ	29
	В обеих схемах влияние одинаковое	45

§ 17.4. ФОТОРЕЗИСТОРЫ

Фоторезисторы — приборы, принцип действия которых основан на фоторезистивном эффекте — изменении сопротивления полупроводникового материала под действием электромагнитного излучения.

Устройство фоторезистора показано на рис. 17.6, а. Пленка 2 из полупроводникового материала (сульфид свинца, соединения сернистого кадмия, висмут и т. д.)

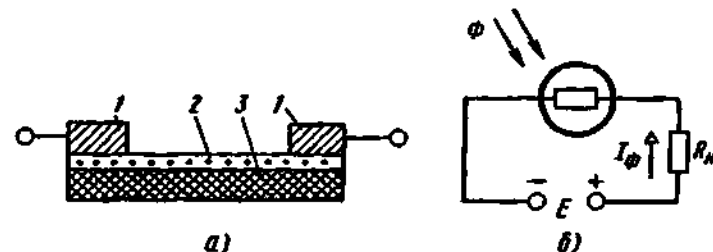


Рис. 17.6. Устройство (а) и схема включения фоторезистора (б)

закреплена на диэлектрической подложке 3 (стекло, кварц, керамика). Световой поток Φ попадает на полупроводник через специальное отверстие в пластмассовом корпусе. Электроды 1, выполненные из благородных материалов (золото, платина), обеспечивают хороший контакт с полупроводником и не подвержены коррозии. Поверхность полупроводника покрыта защитным слоем прозрачного лака.

В схеме (рис. 17.6, б) при отсутствии светового потока по цепи проходит так называемый темновой ток, обусловленный собственной проводимостью полупроводника. Этот ток весьма мал, и его значение определяется темновым сопротивлением R_t , имеющим широкий диапазон значений: $10^2—10^{10}$ Ом. Наибольшие значения R_t имеют фоторезисторы, выполненные из сернистого кадмия.

При освещении фоторезистора в нем возникают дополнительные свободные электрические заряды — электроны и дырки, в результате чего ток в цепи возрастает.

Разность между световым током I_{cs} и темновым токами называется фототоком:

$$I_{\Phi} = I_{cs} - I_t.$$

Зависимость фототока I_Φ от лучистого потока Φ иллюстрируется энергетической характеристикой (рис. 17.7). Нелинейность этой характеристики является недостатком фоторезисторов.

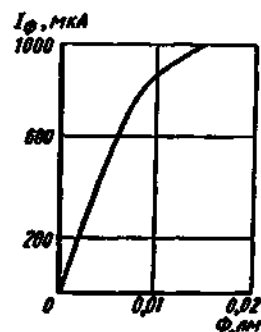


Рис. 17.7. Электрическая схема фоторезистора

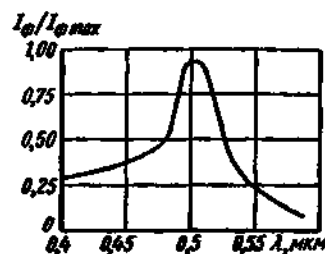


Рис. 17.8. Спектральная характеристика фоторезистора, выполненного из сульфида кадмия

Значения фототока сильно зависят от спектрального состава светового потока. Эта зависимость видна из спектральной характеристики, вид которой для фоторезистора, выполненного из сульфида кадмия, приведен на рис. 17.8 (где $I_{\Phi \max}$ — фототок, соответствующий максимуму спектральной чувствительности). Интегральная чувствительность фоторезисторов на два порядка выше, чем электронных фотоэлементов.

Важным параметром фоторезисторов является пороговый световой поток Φ_n — минимальный поток излучения, который вызывает появление в цепи фоторезистора электрического напряжения, превышающего в 2—3 раза шумовое напряжение.

Существенным недостатком фоторезистора является их большая инерционность, обусловленная значительным временем генерации и рекомбинации электронов и дырок при изменении освещенности фоторезистора.

Фоторезисторы обозначают буквами ФС или СФ, затем следует буква и цифра, которые определяют состав и конструктивное оформление: А — Pb; К — CdS; Г — герметизированный корпус. Например, ФСК — Г1 обозначает фоторезистор из сернистого кадмия в герметизированном корпусе.

Фоторезисторы широко применяются в автоматике, вычислительной технике и промышленной электронике.

В частности, фоторезисторы используют для сортировки изделий по их окраске, размерам или какому-нибудь другим признакам.

Карточка № 17.4 (346)
Фоторезисторы

Какими свободными носителями зарядов обусловлен ток в обычном резисторе?	Электронами	83
	Дырками	43
	И электронами, и дырками	73
Какими свободными носителями зарядов обусловлен ток в фоторезисторе?	Дырками	35
	Электронами	11
	И электронами, и дырками	25
Обладает ли полупроводниковый фоторезистор односторонней проводимостью?	Да	8
	Нет	80
	Это зависит от материала, из которого он изготовлен	62
Как изменится напряжение на нагрузке U_n и на фоторезисторе (см. рис. 4.6, 6) при увеличении светового потока Φ ?	U_n увеличится, U_Φ уменьшится	90
	U_Φ увеличится, U_n уменьшится	47
	U_Φ уменьшится, U_n не изменится	53
	U_Φ увеличится, U_n не изменится	21
При каких значениях светового потока фоторезистор обладает максимальной чувствительностью?	При малых	68
	При больших	33
	Чувствительность не зависит от светового потока	58

§ 17.5. ФОТОДИОДЫ

Фотодиод представляет собой полупроводниковый диод, обратный ток которого зависит от освещенности $p-n$ -перехода.

Фотодиоды могут работать в двух режимах: в режиме фотогенератора (фотоэлемента) без внешнего источника питания и в режиме фотопреобразователя с внешним источником.

В режиме фотогенератора используется фотогальванический эффект, суть которого заключается в создании разности потенциалов на зажимах неоднородного полупроводника при его освещении.

Фотодиоды образованы двумя примесными полупроводниками с различными типами электропроводности. Конструктивно фотодиоды выполнены так, что световой поток падает на плоскость $p-n$ -перехода под прямым углом (рис. 17.9, а).

При отсутствии светового потока в области $p-n$ -перехода существует потенциальный барьер с напряжением U_k (контактная разность потенциалов), обусловленный взаимной диффузией электронов в область p -типа и дырок в область n -типа.

При освещении $p-n$ -перехода фотоны, попавшие на полупроводники, образуют пары свободных зарядов электрон — дырка. В результате в областях p - и n -типов увеличивается концентрация свободных электронов и дырок соответственно.

Под действием электрического поля, обусловленного контактной разностью потенциалов U_k (рис. 17.9, а), неосновные носители p -области — электроны — переходят в n -область, а неосновные носители n -области — дырки — в p -область. В результате этого процесса в n -области возникает избыток электронов, а в p -области — избыток дырок. Таким образом, на зажимах фотодиода возникает фото-ЭДС E_ϕ , равная контактной разности потенциалов и имеющая значение около 1 В.

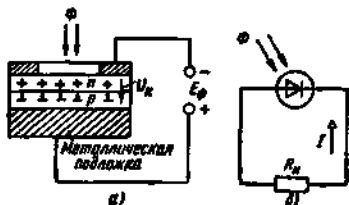


Рис. 17.9. Устройство (а) и схема включения (б) фотодиода в генераторном режиме

При замыкании освещенного фотодиода на внешнюю нагрузку R_n (рис. 17.9, б) в цепи возник

ает ток I , обусловленный движением неосновных носителей зарядов. Следовательно, в данной схеме происходит преобразование лучистой энергии в электрическую.

Фотодиоды, работающие в генераторном режиме, довольно широко используют в качестве источников, преобразующих солнечную энергию. Такие источники именуют фотоэлементами или солнечными элементами. Из них строят солнечные батареи, которые используют на космических объектах в качестве электростанций. Фотоэлементы отличаются от фотодиодов только своими конструктивными особенностями.

Фотодиоды и фотоэлементы изготовляют из германия, кремния, селена, сернистого серебра, арсенида индия и т. д.

В режиме фотопреобразователя в цепь последовательно с нагрузкой включают источник напряжения в запирающем направлении (рис. 17.10). Когда

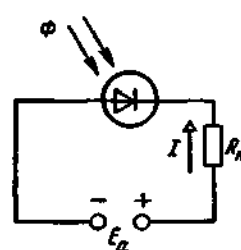


Рис. 17.10. Схема включения фотодиода в преобразовательном режиме

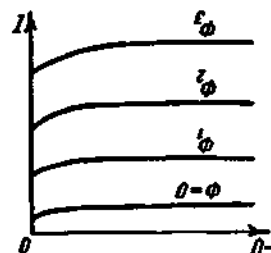


Рис. 17.11. Вольт-амперные характеристики фотодиода в преобразовательном режиме

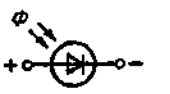
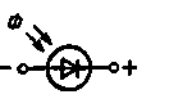
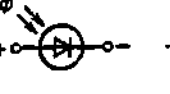
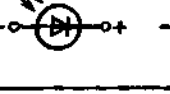
фотодиод не освещен, в цепи проходит темновой ток. При освещении фотодиода происходит генерация электронов и дырок. Под действием электрического поля источника E_a неосновные носители слоев p - и n -типов полупроводника создают в цепи ток, значение которого практически определяется только световым потоком Φ и равно приблизительно току короткого замыкания в генераторном режиме. Поэтому чувствительность фотодиодов в обоих режимах принято считать одинаковой. Для германиевых фотодиодов интегральная чувствительность достигает 20 мА/лм.

Более точно ток можно определить по вольт-амперным характеристикам (рис. 17.11) графическим способом.

Фотодиоды широко применяются в промышленности: в вычислительной технике, регистрирующих и измерительных приборах фотометрии, в киноаппаратуре, системах автоматизации производственных процессов и т. д.

Фотодиоды обозначают буквами ФД, затем следуют буквы, обозначающие материал, из которого изготовлен прибор. Например, ФД-ГЗ-001 означает: фотодиод германиевый, легированный золотом, номер разработки 001.

Карточка № 17.5 (349)
Фотодиоды

Какое различие существует между фотодиодом и обычным полупроводниковым диодом?	Принципиальное	75
	Конструктивное	41
	Функциональное	57
Можно ли использовать неосвещенный фотодиод в качестве выпрямителя?	Да	88
	Нет	61
Каково соотношение полярности напряжений на зажимах освещенного и неосвещенного фотодиодов?		31
		51
		39
		22

Продолжение

Каково соотношение между токами I_1 и I_2 в приведенных схемах?	$I_1 > I_2$	5
	$I_1 < I_2$	82
	$I_1 \approx I_2$	17
Найдите правильное соотношение между токами I_1 и I_2 в данных схемах	$I_1 > I_2$	91
	$I_1 \approx I_2$	13
	$I_1 < I_2$	86

§ 17.6. ФОТОТРАНЗИСТОРЫ

Фототранзистор представляет собой трехслойный полупроводниковый прибор с двумя р-п-переходами, обладающий свойством усиления фототока при воздействии лучистой энергии.

Фототранзистор, как правило, выполнен в виде обычного плоскостного транзистора из германия или кремния. Световой поток падает на базу, поэтому эмиттер делают тонким, небольших размеров.

На рис. 17.12 представлена двухполюсная схема включения фототранзистора. Под действием света в области базы образуются пары носителей зарядов — электроны и дырки. Дырки (неосновные носители базы) под действием электрического поля источника E_k движутся через коллекторный переход, образуя фототок I_ϕ , проходящий через нагрузку R_n . Электроны, не прошедшие через эмиттерный переход и оставшиеся в базе, снижают потенциальный барьер. Это облегчает переход дырок из эмиттера в базу, увеличивая коллекторный фототок. Чувствительность фототранзистора сильно превышает чувствительность фотодиодов и имеет значения порядка 0,5—1 А/лм.

На рис. 17.13 показана схема с подключенной базой. Возможности такой схемы шире, так как на

ее вход можно подавать кроме светового электрический сигнал. Обычно электрический вход используют для выбора рабочей точки на линейном участке характеристики, а также для уменьшения влияния внешних воздействий.

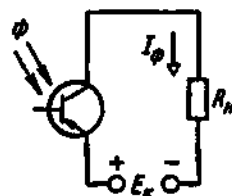


Рис. 17.12. Двух-полосная схема включения фототранзистора с отключенной базой

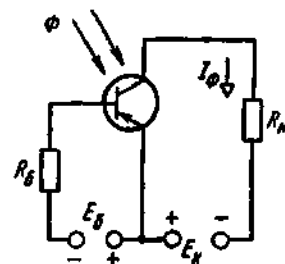


Рис. 17.13. Схема включения фототранзистора с подключенной базой

Фототранзисторы широко применяются в различных областях: фототелеграфии, фототелефонии, в вычислительной технике, регистрации видимого, инфракрасного и ультрафиолетового излучения.

Карточка № 17.6 (273)
Фототранзисторы

Какие носители обеспечивают ток в базе фототранзистора типа р-п-р?	Электроны и дырки	1
	Только электроны	59
	Только дырки	6
Каково влияние электронов, накапливающихся в базе фототранзистора, на чувствительность прибора?	Уменьшают чувствительность	28
	Увеличивают чувствительность	34
	Не влияют на чувствительность	14
Каково соотношение темновых токов в схемах, представленных на рис. 17.12 и 17.13, при равенстве E_K и одинаковых транзисторах?	Токи одинаковы	18
	Темновой ток в схеме на рис. 17.12 больше	77
	Темновой ток в схеме на рис. 17.13 больше	89

Продолжение

Каким должно быть соотношение концентраций носителей зарядов в эмиттере и базе фототранзистора для его нормальной работы?	Одинаковым	30
	Концентрация носителей в базе должна быть больше, чем в эмиттере	26
	Концентрация носителей в эмиттере должна быть больше, чем в базе	85
Можно ли использовать неосвещенный фототранзистор в обычном усилительном режиме?	Да	64
	Нет	7
	Это зависит от конструкции фототранзистора	37

Глава 18

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

§ 18.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ВЫПРЯМИТЕЛЯХ

Выпрямители — это устройства, которые служат для преобразования переменного тока в постоянный. Они широко применяются в различных электронных аппаратах, так как большинство блоков этих аппаратов требует питания постоянным током.

На рис. 18.1 показана структурная схема выпрямителя, в состав которого входят: силовой тран-



Рис. 18.1. Структурная схема выпрямителя

сформатор, служащий для преобразования переменного питающего напряжения; вентиль, обладающий односторонней проводимостью и обеспечивающий преобразование переменного тока в выпрямленный (ток одного направления); сглаживающий фильтр, который служит для преобразования выпрямленного тока в ток, близкий по форме к постоянному.

Современные выпрямители различают по типу вентилей, схеме их включения и числу фаз источника

переменного напряжения. Выпрямители подразделяют также на управляемые и неуправляемые. Для питания блоков электронной аппаратуры, как правило, применяют выпрямители малой мощности с питанием от однофазных сетей переменного тока. В тех случаях, когда необходимо получить повышенное постоянное напряжение, а первичный источник также вырабатывает постоянное напряжение, применяют специальные преобразователи — инверторы.

§ 18.2. ОДНОПОЛУПЕРИОДНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

На рис. 18.2 представлена схема однополупериодного выпрямителя. Переменное синусоидальное напряжение u_2 (рис. 18.3, а) подают на диод D . За счет односторонней проводимости диодов ток i_2 (рис. 18.3, б)

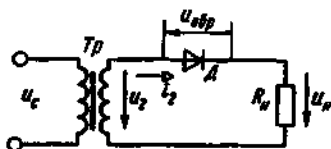


Рис. 18.2. Схема однополупериодного выпрямителя

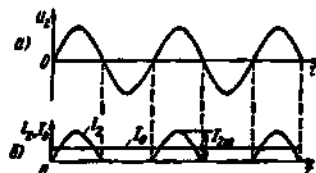


Рис. 18.3. Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора (а); выпрямленный ток i_2 , постоянная составляющая тока I_0 (б)

проходит только в положительные полупериоды напряжения u_2 и, следовательно, имеет импульсную форму. Постоянная составляющая этого тока I_0 определяет средним значением тока i_2 , проходящего через нагрузку R_n за полупериод.

Средним значением тока i_2 называется среднее арифметическое значение из всех мгновенных значений за полупериод:

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i_2 dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i_2 dt.$$

Так как $i_2 = I_{2m} \sin \omega t$, то $I_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_{2m} \sin \omega t dt$,

$$\text{или } I_0 = \frac{I_{2m}}{\omega T} \int_0^{T/2} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2I_{2m}}{\omega T}.$$

Так как $\omega T = 2\pi$, то

$$I_0 = I_{2m}/\pi = 0,318 I_{2m}. \quad (18.1)$$

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения на R_n определяется законом Ома:

$$U_0 = I_0 R_n = 0,318 I_{2m} R_n.$$

Найдем соотношение между U_0 и действующим значением напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора u_2 . Так как $R_n \gg R_{пр.д}$ ($R_{пр.д}$ — прямое сопротивление диода), то $I_{2m} R_n \approx U_{2m}$. Следовательно, $U_0 = 0,318 U_{2m} = U_{2m}/\pi$. Но $U_{2m} = \sqrt{2} U_2$, откуда

$$U_0 = \sqrt{2} U_2 / \pi = 0,45 U_2. \quad (18.2)$$

Значения U_0 задают при расчете выпрямителя. На основании (18.2) определяют U_2 и по известному значению напряжения сети U_c определяют коэффициент трансформации $k = U_2 / U_c$.

Ранее было установлено, что полупроводниковые диоды характеризуются допустимым обратным напряжением $U_{обр.д}$. Во время отрицательного полупериода напряжения u_2 диод D находится под действием обратного напряжения, максимум которого равен U_{2m} , так как $R_{обр.д} \gg R_n$. Следовательно, $U_{обр.д} = U_{2m} = 3,14 U_0$.

Отсюда следует, что при выборе диода для работы в схеме однополупериодного выпрямления надо соблюдать неравенство $U_{обр.д} > 3,14 U_0$.

Если такой диод подобрать не удастся, прибегают к последовательному включению нескольких диодов.

Среднее значение тока, проходящего через диод, не должно превышать $I_{ср.д}$. Для однополупериодного выпрямителя $I_{ср} = I_0$ и, следовательно, $I_0 \leq I_{ср.д}$.

Если последнее неравенство не выполняется для диодов имеющихся типов, необходимо выключить несколько диодов параллельно.

Важным параметром, характеризующим работу выпрямителя, является коэффициент пульсации

$$k_n = U_{им} / U_0, \quad (18.3)$$

где U_{1m} — амплитуда первой гармоники переменного напряжения на нагрузке выпрямителя (импульсное напряжение на нагрузке может быть разложено в ряд Фурье). Так как для однополупериодного выпрямителя $U_{1m} = U_{2m}/2 = \pi U_0/2 = 1,57 U_0$, то на основании (18.3) получаем $k_n = 1,57$.

Таким образом, k_n для однополупериодного выпрямителя велик, что является главным недостатком данной схемы.

Наряду с этим в таком выпрямителе плохо используются обмотки трансформатора. Действительно, согласно (18.1), так как при однополупериодном выпрямлении $I_{2m} = 2I_2$, то $I_0 = 0,636 I_2$, т. е. постоянная составляющая значительно меньше действующего значения тока во вторичной обмотке.

Карточка № 18.1 (220)
Однополупериодный выпрямитель

Каким должно быть соотношение между прямым и обратным сопротивлением триода R_{np} и $R_{обр}$?	$R_{np} > R_{обр}$	25
	$R_{np} < R_{обр}$	57
	$R_{np} \approx R_{обр}$	1
	$R_{np} \ll R_{обр}$	68
Каким должно быть соотношение между прямым сопротивлением диода R_n и сопротивлением нагрузки R_n ?	$R_n \approx R_{np}$	13
	$R_n > R_{np}$	9
	$R_n < R_{np}$	36
Какое напряжение зафиксирует вольтметр, подключенный к R_n (в схеме на рис. 18.2) и проградуированный в средних значениях напряжения, если $U_{2m} = 282$ В?	$U_0 = 141$ В	73
	$U_0 = 127$ В	46
	$U_0 = 90$ В	38
Каково соотношение между действующими значениями напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора U_2 и на сопротивлении нагрузки U_n в схеме на рис. 18.2?	$U_2 > U_n$	56
	$U_2 = U_n$	23
	$U_2 < U_n$	29
Каково соотношение между действующими значениями тока во вторичной обмотке трансформатора I_2 и в нагрузке I_n для схемы рис. 18.2?	$I_n < I_2$	35
	$I_n = I_2$	49
	$I_n > I_2$	2

§ 18.3. ДВУХПОЛУПЕРИОДНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Наиболее широкое распространение получила мостовая схема двухполупериодного выпрямителя (рис. 18.4). Схема состоит из силового трансформатора T_p и четырех диодов $D_1 - D_4$. К диагонали моста ac подключена вторичная обмотка трансформатора, к диагонали bd — сопротивление нагрузки R_n .



Рис. 18.4. Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя

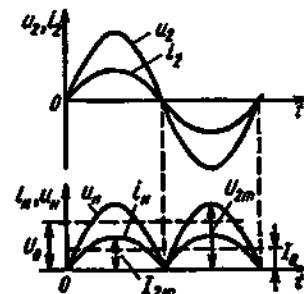


Рис. 18.5. Графики напряжения и токов в мостовой схеме выпрямителя

В положительный полупериод напряжения u_2 (рис. 18.5, а), когда потенциал точки a выше потенциала точки c (см. рис. 18.4), открыты диоды D_1 и D_3 и ток проходит по цепи: точка a , диод D_1 , сопротивление нагрузки R_n , диод D_3 , точка c . В отрицательный полупериод напряжения u_2 открыты диоды D_2 и D_4 и теперь ток проходит по цепи: точка c , диод D_2 , R_n , диод D_4 , точка a . Через сопротивление нагрузки R_n ток проходит все время в неизменном направлении. Таким образом, ток в нагрузке имеет форму, показанную на рис. 18.5, б, что и соответствует двухполупериодному выпрямлению.

Постоянная составляющая тока нагрузки I_0 определяется, как и в схеме однополупериодного выпрямителя, средним значением тока i_n и, согласно (18.1),

$$I_0 = 2I_{2m}/\pi = 0,636 I_{2m}, \quad (18.4)$$

т. е. в двухполупериодном выпрямителе постоянная составляющая тока в два раза больше, чем в однополупериодном.

Так как в мостовой схеме через вторичную обмот-

ку трансформатора проходит синусоидальный ток i_2 , то $I_{2m} = \sqrt{2}I_2$ и, согласно (18.4), $I_0 = 0,9I_2$.

Сравнив это значение тока с I_0 для однополупериодного выпрямителя, приходим к выводу, что в данной схеме гораздо лучше используются обмотки трансформатора по току. Это позволяет значительно уменьшить габариты трансформатора.

Найдем теперь соотношение между U_0 и U_2 . Так как постоянная составляющая напряжения $U_0 = I_0 R_n$, то $U_0 = 0,636I_{2m}R_n$. Если учесть, что $R_n \gg R_{прд}$, то $I_{2m}R_n = U_{2m}$, т. е.

$$U_0 = 0,636U_{2m}, \quad (18.5)$$

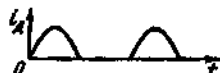
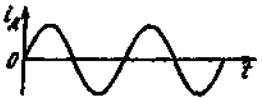
но так как $U_{2m} = \sqrt{2}U_2$, то получим $U_0 = 0,9U_2$.

Обратное напряжение, действующее на каждый диод в данной схеме такое же, как в схеме однополупериодного выпрямителя. Действительно, когда диоды D_1 и D_3 открыты, к диоду D_2 приложено полное обратное напряжение вторичной обмотки через открытый диод D_1 . Точно такое же обратное напряжение приложено и к диоду D_4 . Следовательно, $U_{обрм} = U_{2m} = \sqrt{2}U_2$ и, согласно (18.5),

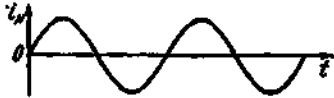
$$U_{обрм} = 1,57U_0.$$

Малое значение коэффициента пульсации $k_n = 0,67$ также является преимуществом данной схемы.

Карточка № 18.2 (308)
Двухполупериодный выпрямитель

Укажите, какова форма тока, проходящего через каждый диод мостовой схемы (рис. 18.4)		42
		75
		18

Продолжение

Каково соотношение между показаниями амперметров, реагирующих на действующее значение тока, один из которых включен в цепь вторичной обмотки трансформатора, а другой — в цепь R_n (см. рис. 18.4)	$I_2 > I_n$	16
	$I_2 < I_n$	40
	$I_2 = I_n$	77
Каковы показания амперметров, реагирующих на среднее значение тока, включенных, как это указано в предыдущем вопросе?	$I_{02} = I_{0n} = 0,9I_2$	37
	$I_{02} = 0; I_{0n} = 0,9I_2$	74
Каким станет ток в нагрузке, если будет пробит диод D_1 (см. рис. 18.4)?		14
		65
	$I_n = 0$	62
Какой выпрямитель, ламповый или полупроводниковый, обеспечивает более качественное выпрямление?	Ламповый	17
	Полупроводниковый	43
	Качество выпрямления не зависит от типа вентиля	76

§ 18.4. ТРЕХФАЗНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Трехфазные выпрямители применяют в устройствах большой и средней мощностей. Рассмотрим одну из возможных схем трехфазного выпрямителя, представленную на рис. 18.6, а. Вторичные обмотки трехфазного трансформатора соединены звездой. К фазам А, В и С трансформатора подключены диоды D_1, D_2, D_3 , катоды которых присоединяют к точке О. Между нейтральной точкой трансформатора О и точкой О' включена нагрузка R_n .

Ток через каждый диод может проходить только тогда, когда потенциал на его аноде выше потенциа-

ла на катоде. Это возможно в течение $1/3$ периода, когда напряжение в данной фазе выше напряжений в двух других фазах. Так, например, когда открыт диод D_1 , через него и нагрузку R_n проходит ток, определяемый u_A . В это время диоды D_2 и D_3 закрыты,

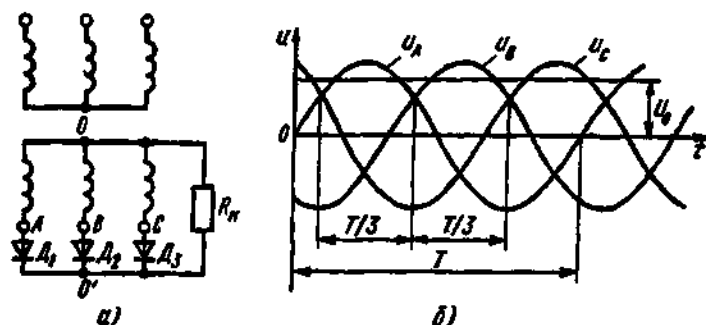


Рис. 18.6. Схема трехфазного выпрямителя (а) и фазные напряжения в нем (б)

так как потенциалы их катодов выше потенциалов анодов. В следующую треть периода открыт диод D_2 и т. д. Характер изменения напряжения фаз, соответствующий открытому состоянию диодов, показан на рис. 18.6, б. Если считать диоды идеальными, то напряжение на нагрузке R_n равно напряжению фазы с открытым диодом и, следовательно, ток в нагрузке изменяется по тому же закону, т. е. ток, проходящий через нагрузку, не падает до нуля, как это имело место в схемах одно- и двухполупериодного выпрямителей. Таким образом, пульсация тока в трехфазном выпрямителе относительно невелика и коэффициент пульсации $k_n = 0,25$.

Среднее значение выпрямленного тока в нагрузке $I_0 = 0,827 I_m$.

В каждом диоде ток проходит в течение $T/3$, и поэтому его среднее значение $I_{cp} = I_0/3$.

Выпрямленное напряжение на нагрузке

$$U_0 = 0,827 U_m, \quad (18.6)$$

но так как $U_m = \sqrt{2} U$, где U — действующее значение фазного напряжения на вторичной обмотке трансформатора, то $U_0 = 1,17 U$.

Очевидно, что максимальное значение обратного

напряжения на каждом диоде определяется амплитудой линейного напряжения $U_{обрт} = \sqrt{3} U_m$, а так как $U_m = 1,21 U_0$ согласно (18.6), то $U_{обрт} = 2,09 U_0$.

Карточка № 18.3 (101)
Трехфазный выпрямитель

Каким было бы напряжение на нагрузке, если бы напряжения на обмотках трансформатора (см. рис. 18.6, а) совпадали по фазе и имели одинаковую амплитуду?		54
		41
		34
Выберите параметры, соответствующие идеальному диоду	$R_{пр} = 1 \div 10 \text{ Ом};$ $R_{обр} = 100 \div 200 \text{ кОм}$	26
	$R_{пр} = 0;$ $R_{обр} = 100 \div 200 \text{ кОм}$	8
	$R_{пр} = 0;$ $R_{обр} = \infty$	19
	$R_{пр} = 1 \div 10 \text{ Ом};$ $R_{обр} = \infty$	11
Как отражается на работе выпрямителя тот факт, что диоды не идеальны?	Увеличивается обратное напряжение на диоде	50
	Уменьшается среднее значение выпрямленного тока и напряжения	3
	Искажается форма тока в нагрузке	15
Какое из указанных соотношений не относится к схеме трехфазного выпрямителя?	$k = 0,25$	22
	$U_{обрт} = \sqrt{6} U$	53
	$U_{обрт} = \sqrt{3} U_m$	5
	$I_{cp} = I_0/2$	33

Возможно ли непосредственное подключение (без трансформатора) трехфазного выпрямителя к зажимам трехфазной сети?	Невозможно	28
	Возможно	20
	Это зависит от конкретных условий	12

§ 18.5. ВЫПРЯМИТЕЛЬ НА ТИРИСТОРЕ. СТАБИЛИЗАТОР НАПЯЖЕНИЯ

Были рассмотрены схемы выпрямителей, в которых регулирование выпрямленного напряжения и тока можно осуществлять или в цепи переменного тока с помощью автотрансформатора, или в цепи выпрямленного тока с помощью потенциометра и реостата. Но эти способы управления имеют существенные недостатки. Во-первых, они обладают низким КПД из-за значительных потерь в регулировочных устройствах и, во-вторых, в них невозможно применять современные схемы автоматического регулирования.

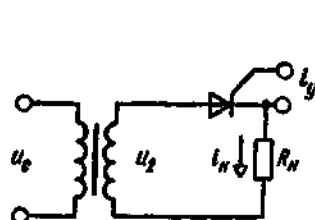


Рис. 18.7. Схема однополупериодного выпрямителя на тиристоре

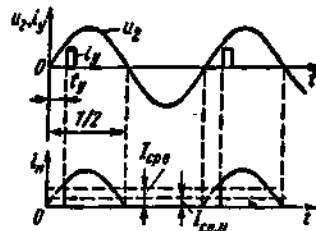


Рис. 18.8. Графики напряжения u_2 , управляющий импульс i_y тока нагрузки i_n в схеме выпрямителя на тиристоре

В настоящее время широко распространены выпрямители с управляемыми полупроводниковыми диодами — тиристорами. Тиристоры благодаря компактности, экономичности и хорошим эксплуатационным характеристикам пришли на смену ртутным выпрямителям с управляющим электродом.

Проанализируем работу простейшего однополупериодного выпрямителя на тиристоре (рис. 18.7). Данная схема аналогична рассмотренной ранее в § 18.2, только диод в ней заменен тиристором. В обычном

выпрямителе момент открытия диода совпадает с началом положительной полуволны напряжения u_2 и ток через нагрузку проходит в течение всего этого полупериода. В схеме с тиристором диод открывается только при подаче на него управляющего импульса i_y . Из рис. 18.8 видно, что начало действия управляющего импульса i_y сдвинуто во времени на t_y относительно начала периода напряжения u_2 и ток в нагрузке проходит в течение времени $T/2 - t_y$. Следовательно, уменьшается среднее значение тока $I_{ср.у}$ по сравнению со средним значением тока $I_{ср.д}$ при действии i_y в начале периода.

Таким образом, появляется возможность автоматически регулировать средние значения тока и напряжения на нагрузке, изменяя момент подачи управляющего импульса.

Наряду с регулируемым выпрямителем широко применяются стабилизаторы постоянных напряжений и тока. В данном пособии рассмотрим стабилизатор постоянного напряжения.

Устройство, поддерживающее автоматически постоянное напряжение на нагрузке при изменении дестабилизирующих факторов в определенных пределах, называется стабилизатором напряжения. Такими дестабилизирующими факторами являются входное напряжение и сопротивление нагрузки, которые изменяются в процессе работы устройства.

Существует два метода стабилизации напряжения: параметрический и компенсационный.

В параметрических стабилизаторах используются элементы с нелинейной вольт-амперной характеристикой, рассмотренные ранее (ионный и кремниевый стабилизаторы).

Компенсационные стабилизаторы обладают более оптимальными параметрами. Работа таких стабилизаторов основана на сравнении входного напряжения с заданным стабильным. В зависимости от разности между стабильным и выходным напряжениями (рассогласованием) осуществляется автоматическое воздействие (регулирование), направленное на уменьшение этого рассогласования. В качестве примера рассмотрим схему стабилизатора, приведенную на рис. 18.9.

Стабильное (опорное) напряжение $U_{сг}$ создается на кремниевом стабилитроне D . Транзистор T играет

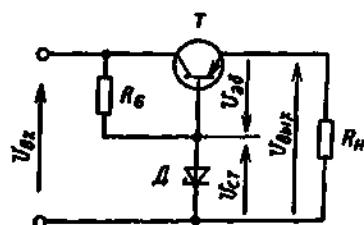


Рис. 18.9. Схема стабилизатора напряжения

на выходе $U_{\text{вых}}$. Следовательно, напряжение $U_{\text{зб}}$ уменьшится и уменьшится ток эмиттера, равный выходному току $I_{\text{вых}}$. Это обстоятельство приведет к уменьшению выходного напряжения практически почти до прежнего значения. На транзисторе избыток напряжения $U_{\text{вых}}$ упадет.

При увеличении сопротивления нагрузки схема работает точно так же. Уменьшение входного напряжения вызовет увеличение $U_{\text{зб}}$ и т. д. В конечном итоге $U_{\text{вых}}$ почти не изменится.

Важнейшим параметром, характеризующим работу схемы стабилизатора, является коэффициент стабилизации, представляющий собой отношение относительного изменения входного напряжения к относительному изменению выходного напряжения (при $R_n = \text{const}$):

$$k_{\text{ст.}U} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}/U_{\text{вх}}}{\Delta U_{\text{вых}}/U_{\text{вых}}},$$

где $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ — номинальные значения входного и выходного напряжений.

Карточка № 18.4 (228)
Выпрямитель на тиристоре. Стабилизатор напряжения

Каково соотношение между прямым и обратным сопротивлениями тиристора при отсутствии управляющих импульсов и напряжении на тиристоре ниже напряжения переключения?	$R_{\text{отр}} \gg R_{\text{пр}}$	52
	$R_{\text{отр}} \ll R_{\text{пр}}$	48
	$R_{\text{отр}} = R_{\text{пр}}$	79
Запирается ли тиристор после снятия управляющего импульса?	Да	67
	Нет	72

роль сравнивающего и регулирующего элемента. Между эмиттером и базой действует небольшое положительное напряжение $U_{\text{зб.}} = U_{\text{ст}} - U_{\text{вых.}}$

Таким образом, $U_{\text{вых}} \approx U_{\text{ст}}$. Представим себе, что напряжение на входе $U_{\text{вх}}$ несколько возросло. Это увеличит напряжение

Продолжение

	Это зависит от длительности управляющего импульса	24
В каких пределах необходимо изменить время подачи управляющего импульса, чтобы ток в нагрузке изменялся от максимального значения до нуля?	$0 \leq t_y \leq T$	32
	$T/4 \leq t_y \leq T/2$	60
	$0 \leq t_y \leq T/4$	4
	$0 \leq t_y \leq T/2$	64
Определите максимально возможное значение тока I_0 в тиристорном однополупериодном выпрямителе	$I_0 = 0,636 I_n$	27
	$I_0 = 0,318 I_n$	55
	$I_0 = 0,827 I_n$	30
Как изменится $U_{\text{зб}}$ в схеме на рис. 18.9 при уменьшении R_n ?	$U_{\text{зб}}$ увеличится	6
	$U_{\text{зб}}$ уменьшится	70
	$U_{\text{зб}}$ станет отрицательным	45

§ 18.6. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ. ВЫПРЯМЛЕНИЕ С УМНОЖЕНИЕМ НАПЯЖЕНИЯ

Для питания ряда узлов электронной аппаратуры обычно требуется постоянное напряжение. Напряжение же, получаемое на выходе рассмотренных выпрямительных схем, является или пульсирующим (трехфазный выпрямитель), или импульсным (одно- и двухполупериодный выпрямитель). Для того чтобы выпрямленное напряжение имело требуемую форму, применяют сглаживающие фильтры.

Количественно работа фильтра характеризуется коэффициентом сглаживания пульсации q , который показывает, во сколько раз уменьшается пульсация при прохождении сигнала через данный фильтр:

$$q = k_n/k'_n,$$

здесь k_n и k'_n — коэффициенты пульсации сигнала до и после.

Наряду с малым значением коэффициента пульсации в фильтре не должно быть значительных по-

терь постоянной составляющей выпрямленного напряжения.

Сглаживающие фильтры подразделяются на емкостные, индуктивные, индуктивно-емкостные и резисторно-емкостные.

Наиболее простым является емкостный фильтр, который состоит из конденсатора C_Φ , включенного параллельно с нагрузкой R_H (рис. 18.10, а). Работа фильтра основана на способ-

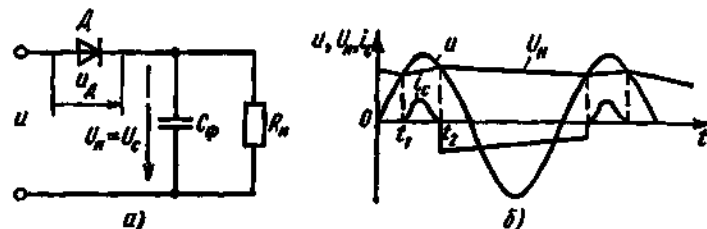


Рис. 18.10. Схема емкостного фильтра (а); графики напряжений и токов в нем (б)

ности конденсатора быстро запасать электрическую энергию, а затем относительно медленно отдавать ее в нагрузку.

Когда напряжение на диоде D , равное разности напряжения источника и напряжения на конденсаторе, положительно, т. е. $U_A = u - U_C > 0$, то диод открыт и C_Φ заряжается. Как это видно из графика на рис. 18.10, б, зарядка происходит в интервале времени от t_1 до t_2 . Так как сопротивление диода D весьма мало, конденсатор успевает зарядиться почти до u . Затем, когда $u - U_C < 0$, диод заперт и конденсатор медленно разряжается через R_H до тех пор, пока напряжение источника u снова не станет больше U_C . Время разрядки зависит от постоянной времени $\tau = C_\Phi R_H$, которая показывает, в течение какого времени напряжение на конденсаторе уменьшится в 2,72 раза.

Емкостные фильтры, как правило, используют в выпрямителях малой мощности.

Типичной схемой выпрямителя с применением емкостных фильтров являются умножитель напряжения. На рис. 18.11 показана схема удвоителя напряжения. В один из полупериодов напряжения, когда открыт диод D_1 , конденсатор C_1 заряжается

почти до u_2 . В это время диод D_2 закрыт. В следующий полупериод открывается D_2 и происходит зарядка конденсатора C_2 . Диод D_1 закрыт. Так как конденсаторы C_1 и C_2 включены последовательно, напряжение на нагрузке R_H удваивается. При соответствующем выборе параметров схемы разрядка конденсаторов через R_H происходит достаточно медленно.

В выпрямителях с большими токами применяют индуктивные фильтры (рис. 18.12), которые являются

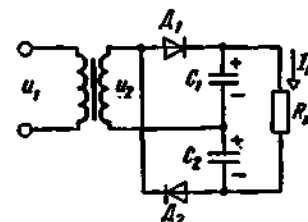


Рис. 18.11. Схема удвоителя напряжения

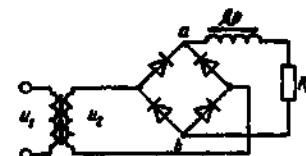


Рис. 18.12. Схема индуктивного фильтра в цепи выпрямителя

индуктивной катушкой (дресселем) с относительно большой индуктивностью. Индуктивные фильтры работают достаточно эффективно в двухполупериодных выпрямителях, так как за счет явления самоиндукции ток в нагрузке i_H не падает до нуля при нулевом напряжении между точками a и b цепи и коэффициент пульсации заметно уменьшается (рис. 18.13).

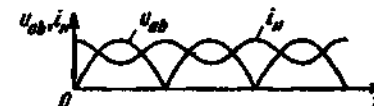


Рис. 18.13. График напряжения и тока в двухполупериодном выпрямителе с индуктивным фильтром

В однополупериодном выпрямителе применение индуктивного фильтра нецелесообразно, так как во время отрицательного полупериода ток в нагрузке падает до нуля и коэффициент пульсации практически не снижается.

На практике, как правило, применяют комбинированные фильтры: Г-образные и П-образные (рис. 18.14). Эти фильтры обеспечивают хорошее сглаживание тока в нагрузке. Их работу удобно объяснять, представляя напряжение на входе

фильтра как сумму постоянной составляющей и целого ряда гармоник (переменных составляющих). Тогда индуктивность и емкость фильтра представляют собой делитель. На индуктивном сопротивлении делителя

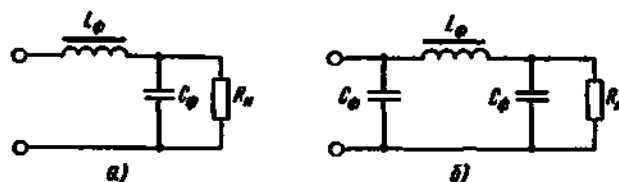


Рис. 18.14. Схема фильтров: а — Г-образного; б — П-образного

выделяется большая часть переменной, а на емкостном — большая часть постоянной составляющей напряжения выпрямителя.

В маломощных схемах дроссель может быть заменен резистором. Это дает возможность уменьшить массу, габариты и стоимость фильтра, однако сглаживание при этом ухудшается.

Карточка № 18.5 (275)

Сглаживающие фильтры. Выпрямление с умножением напряжения

Как изменится коэффициент пульсации в схеме с емкостным фильтром, если R_n уменьшится?	k_n не изменится	59
	k_n увеличится	78
	k_n уменьшится	31
Каково соотношение между постоянным временем разрядки конденсаторов в схеме удвоителя напряжения $\tau_{удв}$ (см. рис. 18.10) и в обычной схеме $\tau_{об}$ (см. рис. 18.9) ($C_\phi = C_1 = C_2$)?	$\tau_{удв} > \tau_{об}$	39
	$\tau_{удв} = \tau_{об}$	66
	$\tau_{удв} < \tau_{об}$	71
Как повлияет увеличение частоты питающего напряжения на работу емкостного сглаживающего фильтра?	Сглаживание улучшится	61
	Сглаживание ухудшится	10
	Сглаживание не изменится	69

Продолжение

Каким должно быть соотношение между индуктивным сопротивлением дросселя фильтра $2\pi f L_\phi$ и емкостным сопротивлением $1/2\pi f C_\phi$ конденсатора, чтобы сглаживание было хорошим? (f — частота выпрямляемого напряжения.)	$2\pi f L_\phi = 1/2\pi f C_\phi$	47
	$2\pi f L_\phi > 1/2\pi f C_\phi$	7
	$2\pi f L_\phi < 1/2\pi f C_\phi$	63
Выберите правильное соотношение между активным сопротивлением дросселя $R_{дп}$ и сопротивлением нагрузки R_n	$R_n > R_{дп}$	44
	$R_n > R_{дп}$	58
	$R_n < R_{дп}$	51
	$R_n \approx R_{дп}$	21

ГЛАВА 19

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

§ 19.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В промышленной электронике очень часто возникает необходимость в усилении электрических сигналов, например, при измерениях неэлектрических величин электрическими методами, контроле и автоматизации технологических процессов. Для решения этих задач используют электронные усилители — устройства, которые служат для усиления напряжения, тока или мощности слабых электрических сигналов.

В настоящее время в усилителях широко применяют транзисторы, которые заменили электронные лампы.

Классификация усилителей. Усилители могут быть классифицированы по ряду признаков: по роду усилительных элементов (ламповые, транзисторные); по роду усиливаемой величины (усилители напряжения, тока и мощности); по числу каскадов (одно-, двух- и многокаскадные). Одним из наиболее важных признаков является диапазон частот усиливаемых сигналов, в котором усилитель обеспечивает нормаль-

ную работу. По данному признаку различают следующие типы усилителей.

Усилители низкой частоты (УНЧ), которые служат для усиления непрерывных периодических сигналов в диапазоне низких частот (от десятков герц до десятков килогерц). Особенностью УНЧ является то, что отношение верхней усиливаемой частоты f_v к нижней f_n велико и имеет значение от нескольких сотен до нескольких тысяч.

Усилители постоянного тока (УПТ) предназначены для усиления медленно меняющихся напряжений и токов в диапазоне частот от нуля до некоторой наибольшей частоты. УПТ широко применяются в устройствах автоматики и вычислительной техники.

Избирательные усилители, характеризующие небольшими значениями отношения верхней и нижней частот ($1 < f_v/f_n \leq 1,1$). Как правило, это усилители высокой частоты (УВЧ).

Импульсные, или широкополосные, усилители работают в диапазоне от нескольких килогерц до нескольких десятков мегагерц и используются в устройствах импульсной связи, радиолокации и телевидения.

Основные технические характеристики усилителей. Коэффициент усиления в соответствии с видом усиливаемой величины называют коэффициентом усиления по напряжению, току или мощности. Коэффициент усиления показывает, во сколько раз напряжение (ток, мощность) на выходе усилителя больше, чем на входе, и обозначается соответственно K_U (K_I , K_P). Так, коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} \quad (19.1)$$

(обычно K_U обозначают просто K).

Для многокаскадного усилителя, структурная схема которого приведена на рис. 19.1, общий коэффициент усиления

$$K = K_1 K_2 \dots K_n,$$

где $K_1, K_2, \dots, K_n$ — коэффициент усиления соответствующих каскадов.

Коэффициенты усиления часто выражают в логарифмических единицах — белах и децибелах, (1Б = 10 дБ).



Рис. 19.1. Структурная схема трехкаскадного усилителя

Коэффициент усиления, выраженный в децибелах,

$$K_{\text{дБ}} = 10 \lg (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}).$$

Общий коэффициент усиления, например, трехкаскадного усилителя в логарифмических единицах

$$K_{\text{дБ}} = K_{1\text{дБ}} + K_{2\text{дБ}} + K_{3\text{дБ}}.$$

В тех случаях, когда в децибелах необходимо определить усиление по мощности, применяют формулу

$$K_{P\text{дБ}} = 20 \lg (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}),$$

где числовой множитель появляется потому, что мощность пропорциональна квадрату напряжения. Действительно,

$$K_{P\text{дБ}} = 10 \lg (P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}) = 10 \lg (U_{\text{вых}}^2/U_{\text{вх}}^2) = 20 \lg \times (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}).$$

Последнее выражение справедливо при равенстве входного и выходного сопротивлений.

Выходная мощность — это мощность, которая развивается на выходном нагрузочном сопротивлении усилителя:

$$P_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}^2/R_n = U_{\text{т.вых}}^2/(2R_n).$$

Обычно используют значения номинальной выходной мощности — наибольшей мощности, развиваемой в нагрузке, при которой искажения не превышают заданных значений.

Коэффициент полезного действия определяется отношением полезной выходной мощности к мощности, потребляемой всеми источниками питания:

$$\eta = P_{\text{вых}}/P_{\text{общ.}}$$

Частотные искажения — это искажения, вызванные различной степенью усиления на различных частотах из-за присутствия в схемах усилителей

реактивных элементов (индуктивных катушек и конденсаторов).

Фазовые искажения — это искажения, вызванные нелинейной зависимостью сдвига фазы между входным и выходным напряжениями усилителя от частоты. Причиной этих искажений является присутствие реактивных элементов в схемах усилителя.

Нелинейные искажения возникают из-за нелинейности вольтамперных характеристик усилительных элементов (электронных ламп, транзисторов) и проявляются в искажении формы усиливаемого сигнала.

В промышленной электронике наиболее распространены усилители низкой частоты. В связи с этим рассмотрение работы усилителей в данной главе в основном связано с УНЧ.

Карточка № 19.1 (277)
Общие сведения

Какой тип нагрузки обеспечивает более равномерное усиление в широком диапазоне частот?	Резистивный	6
	Индуктивный	30
	Смешанный	16
Определите коэффициент усиления трехкаскадного усилителя в децибелах, если каждый каскад обеспечивает десятикратное усиление	60	4
	30	17
	1000	77
Какой параметр полезного сигнала искажается за счет нелинейности усилительных элементов (электронных ламп и транзисторов)?	Частота сигнала	85
	Форма сигнала	95
	И частота, и форма сигнала	80
Вызывают ли частотные искажения изменение частоты усиливаемого полезного сигнала?	Да	52
	Нет	88
Соответствует ли термин УПТ существу процессов, происходящих в усилителях этого рода?	Нет	71
	Да	56

§ 19.2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД УНЧ

Усилители низкой частоты в основном предназначены для обеспечения заданной мощности на выходном устройстве, в качестве которого может быть громкоговоритель, записывающая головка магнитофона, обмотка реле, катушка измерительного прибора и т. д. Источниками входного сигнала являются звуко-сниматель, фотоэлемент и всевозможные преобразователи неэлектрических величин в электрические. Как правило, входной сигнал очень мал, его значение недостаточно для нормальной работы усилителя. В связи с этим перед усилителем мощности включают один или несколько каскадов предварительного усиления, выполняющих функции усилителей напряжения.

В предварительных каскадах УНЧ в качестве нагрузки чаще всего используют резисторы; их собирают как на лампах, так и на транзисторах.

Усилители на биполярных транзисторах обычно собирают по схеме с общим эмиттером. Рассмотрим работу такого каскада (рис. 19.2). Напряжение синусоидального сигнала $u_{вх}$ подают на участок база—эмиттер через разделительный конденсатор C_p , что создает пульсацию тока базы относительно постоянной составляющей $I_{б0}$. Значение $I_{б0}$ определяется напряжением источника E_k и сопротивлением резистора R_b . Изменение тока базы вызывает соответствующее изменение тока коллектора, проходящего по сопротивлению нагрузки R_k . Переменная составляющая тока коллектора создает на сопротивлении нагрузки R_k усиленное по амплитуде падение напряжения $u_{вых}$.

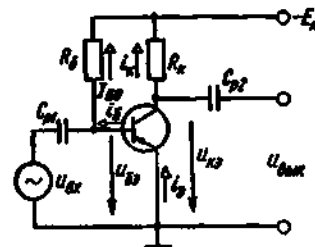


Рис. 19.2. Схема резистивного усилителя с общим эмиттером

Расчет такого каскада можно произвести графически с использованием приведенных на рис. 19.3 входных и выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с ОЭ. Если сопротивление нагрузки R_k и напряжение источника E_k заданы, то положение линии нагрузки определяется точками С 18 я.808

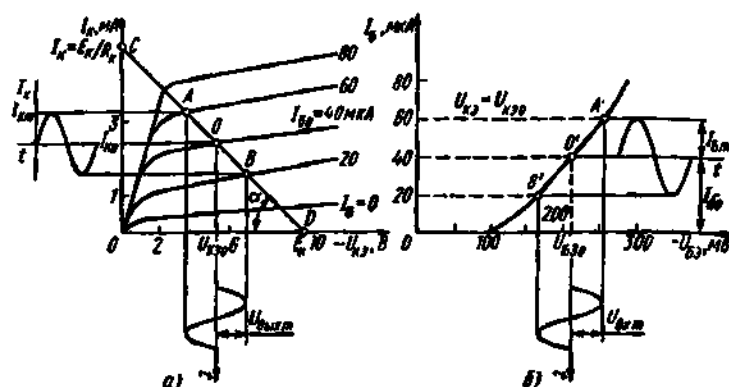


Рис. 19.3. Графический анализ работы схемы с ОЭ

и D . При этом точка D задана значением E_k , а точка C — током $I_k = E_k / R_k$. Линия нагрузки CD пересекает семейство выходных характеристик. Выбираем рабочий участок на линии нагрузки так, чтобы искажения сигнала при усилении были минимальны. Для этого точки пересечения линии CD с выходными характеристиками должны находиться в пределах прямолинейных участков последних. Этому требованию соответствует участок AB линии нагрузки.

Рабочая точка при синусоидальном входном сигнале находится в середине этого участка — точка O . Проекция отрезка AO на ось ординат определяет амплитуду коллекторного тока, а проекция того же отрезка на ось абсцисс — амплитуду переменной составляющей коллекторного напряжения. Рабочая точка O определяет ток коллектора $I_{к0}$ и напряжение на коллекторе $U_{кз0}$, соответствующие режиму покоя.

Кроме того, точка O определяет ток покоя базы $I_{б0}$, а следовательно, и положение рабочей точки O' на входной характеристике (рис. 19.3, а, б). Точкам A и B выходных характеристик соответствуют точки A' и B' на входной характеристике. Проекция отрезка $A'O'$ на ось абсцисс определяет амплитуду входного сигнала $U_{вх м}$, при которой будет обеспечен режим минимальных искажений.

Строго говоря, $U_{вх м}$ необходимо определять по семейству входных характеристик. Но так как входные характеристики при различных значениях напряжения $U_{кз}$ отличаются незначительно, на практике поль-

зуются входной характеристикой, соответствующей среднему значению $U_{кз} = U_{кз0}$.

Карточка № 19.2(232)
Предварительный каскад УНЧ

Какими электрическими параметрами определяется значение R_k в схеме на рис. 19.2?	Напряжениями E_k и $U_{б00}$	69
	Только напряжением $U_{б00}$	31
	Только током $I_{б0}$	94
	Величинами E_k , $U_{б00}$ и $I_{б0}$	74
Как повлияет увеличение сопротивления R_k на положение линии нагрузки CD (см. рис. 19.3)?	Угол наклона α линии CD увеличится	2
	Угол наклона α линии CD уменьшится	36
	Линия CD сдвинется вправо без изменения наклона	15
	Линия CD сдвинется влево без изменения наклона	25
К каким последствиям приведет увеличение R_k в случае, приведенном на рис. 19.3?	К уменьшению амплитуды выходного напряжения	7
	К увеличению амплитуды выходного напряжения	68
	К искажению формы усиливаемого сигнала	38
Усиление с минимальным искажением возможно при условии, что участок AB линии нагрузки CD (см. рис. 19.3) находится в пределах линейных участков выходных характеристик. При каком дополнительном условии усиление будет без искажений?	Напряжение E_k должно быть строго стабильным	92
	Сопротивление нагрузки должно быть строго стабильным	61
	Участок $A'B'$ входной характеристики должен быть линейным	50
К каким нежелательным последствиям приведет перевод рабочей точки из O в точку B (см. рис. 19.3)?	К уменьшению $I_{к0}$	76
	К уменьшению амплитуды усиливаемого сигнала	23
	К искажению усиливаемого сигнала	34

§ 19.3. ВЫХОДНОЙ КАСКАД УНЧ

В устройствах автоматики нагрузкой выходного каскада усилителя низкой частоты может быть электромагнитное реле, электродвигатель или какой-нибудь иной исполнительный механизм. В радиоприемнике или проигрывателе нагрузкой является обмотка динамика.

Выходной каскад, так же как и предварительный каскад УНЧ, может быть собран на транзисторе по схеме с общим эмиттером. Следует отметить, что, так как сопротивление нагрузки R_n обычно гораздо меньше внутреннего сопротивления коллекторной цепи $R_{\text{вн.к}}$, мощность, которая выделяется на нагрузке, включенной непосредственно в цепь коллектора, будет весьма мала. Для того чтобы эта мощность была максимально возможной, необходимо выполнить условие $R_n = R_{\text{вн.к}}$, т. е. сопротивление нагрузки должно быть равно внутреннему сопротивлению источника полезного сигнала. Для этого на практике применяют согласующие трансформаторы (рис. 19.4). Подобные схемы однотактного транзисторного усилителя мощности с общим эмиттером применяются в том случае, если выходная мощность не превышает 3—5 Вт. Нагрузка R_n включена через согласующий трансформатор Tr .

Суть согласования состоит в том, чтобы вносимое в первичную обмотку трансформатора из вторичной обмотки сопротивление R_n было равно внутреннему сопротивлению коллекторной цепи $R_{\text{вн.к}}$ или соизмеримо с ним. Тогда при заданных R_n и $R_{\text{вн.к}}$ задача сводится к определению коэффициента трансформации k .

Известно, что $U_2/U_1 = W_2/W_1 = k$, а $I_2/I_1 = W_2/W_1 = k$. Таким образом, вносимое в первичную цепь сопротивление

$$R'_n = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2/k}{I_2/k} = \frac{U_2}{I_2} \cdot \frac{1}{k^2} = \frac{R_n}{k^2}.$$

Если принять $R'_n = R_{\text{вн.к}}$, то коэффициент трансформации

$$k = \sqrt{R_n/R_{\text{вн.к}}},$$

т. е. трансформатор должен быть *понижающим*, так как $R_n < R_{\text{вн.к}}$.

Рассмотренные схемы предварительного и выходного каскадов УНЧ работают в режиме А. При таком режиме начальное положение рабочей точки O выбирают в середине нагрузочной прямой CD . Амплитуда переменной составляющей коллекторного тока при этом

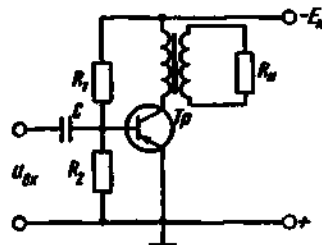


Рис. 19.4. Схема однотактного транзисторного усилителя мощности

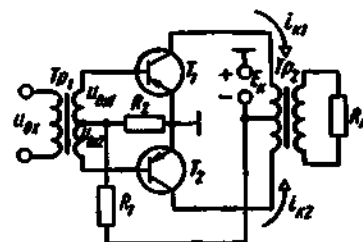


Рис. 19.5. Схема двухтактного транзисторного усилителя мощности

меньше тока покоя коллектора. Работа в режиме А характеризуется минимальными нелинейными искажениями и низким КПД (порядка 40 %). В этом режиме обычно работают все предварительные и маломощные выходные каскады УНЧ, собранные на одном транзисторе или одной электронной лампе.

В том случае, когда необходимо получить выходную мощность более 5 Вт, применяют двухтактные усилители, собранные на двух транзисторах или двух лампах.

Рассмотрим работу такого усилителя на транзисторах (рис. 19.5). Усилитель состоит из двух одинаковых половин, каждая из которых аналогична усилителю, представленному на рис. 19.4. Особенность двухтактной схемы состоит в том, что ее можно использовать в таком режиме, когда ток покоя коллекторных цепей близок к нулю. Этот режим называется режимом В. При работе в таком режиме КПД усилителя может достигать 70 %.

Рабочая точка O' на входной характеристике должна располагаться в области токов базы, близких к нулю (рис. 19.6, а). В результате этого обе половины схемы работают поочередно, причем каждая открывается во время действия положительных полупериодов входных напряжений u_{bx1} и u_{bx2} , так как они сдвинуты по фазе на 180° . Импульсы тока баз и кол-

лкторов также сдвинуты на 180° (рис. 19.6, б, в). При этом в магнитопроводе Tr_2 образуется магнитный поток, близкий к синусоидальному, так как через первичную обмотку трансформатора проходит ток $i = i_{K1} - i_{K2}$ (рис. 19.6, з).

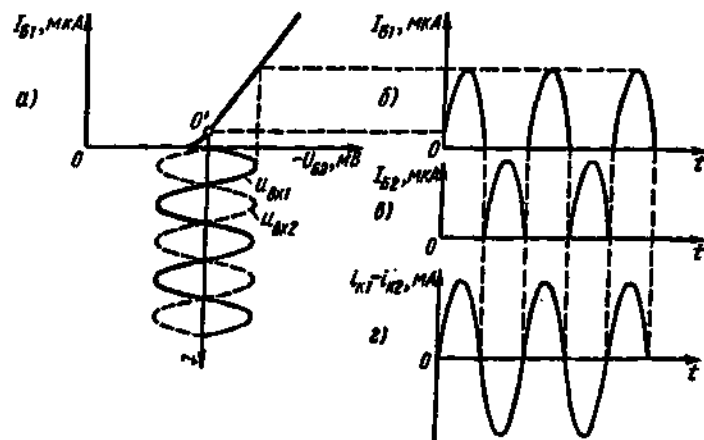


Рис. 19.6. Графики, поясняющие работу усилителя в режиме В

Карточка № 19.3 (324)
Выходной каскад УНЧ

Каким должно быть соотношение между $I_{с0}$ и $I_{сm}$ (см. рис. 19.3, б) при идеальной входной характеристике, чтобы КПД стал максимальным при условии сохранения формы входного сигнала (режим А)?	$I_{сm} > I_{с0}$	22
	$I_{сm} < I_{с0}$	57
	$I_{сm} = I_{с0}$	67
Каким должен быть коэффициент трансформации трансформатора k , если оказалось, что $R_1 = R_{н.к}$?	$k > 1$	62
	$k < 1$	84
	$k = 0$	9
	Трансформатор в данном случае не нужен	45
Выберите правильное соотношение между R_1 и R_2 в схеме на рис. 19.5, при котором будет обеспечен режим В	$R_1 > R_2$	93
	$R_1 = R_2$	58
	$R_1 < R_2$	66

Продолжение

	$R_1 > R_2$	51
Как изменится КПД схемы, если двухтактный усилитель будет переведен из режима В в режим А?	КПД не изменится	70
	КПД увеличится	75
	КПД уменьшится	82
Какая из схем, представленных на рис. 19.2 и 19.4, будет характеризоваться меньшими частотными искажениями?	Схема на рис. 19.4	63
	Схема на рис. 19.2	79
	Обе схемы равноценны	49

§ 19.4. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В УСИЛИТЕЛЯХ

Обратной связью называется такая связь между выходом и входом усилителя, при которой часть энергии полезного усиленного сигнала с его выхода подается на вход.

Обратную связь можно применять специально для повышения стабильности в работе усилителя, и тогда она является полезной. Однако, когда обратная связь возникает в результате взаимного влияния различных цепей, она может оказаться паразитной.

Различают положительную и отрицательную обратные связи. Положительную обратную связь, как правило, применяют в генераторных каскадах. В усилителях положительная обратная связь обычно является паразитной, а отрицательная применяется довольно часто.

На рис. 19.7 показана структурная схема усилителя с обратной связью. Напряжение обратной связи $U_{сб}$ составляет часть выходного напряжения $U_{вых}$, вырабатывается цепью обратной связи (ЦОС) и подается на вход усилителя вместе с напряжением сигнала U_c . Цепь обратной связи может быть выполнена в виде делителя напряжения. Обратная связь характеризуется коэффициентом обратной связи

$$\beta = U_{сб} / U_{вых} \quad (19.2)$$

В усилителе с отрицательной обратной связью входное напряжение $U_{вх}$ определяется как разность

между напряжением сигнала и напряжением обратной связи U_{oc} : $U_{вх} = U_c - U_{oc}$.

Необходимо иметь в виду, что это выражение всегда справедливо для постоянного напряжения. Для действующего значения синусоидального сигнала равенство сохраняется только при условии, что напряжения сигнала и обратной связи находятся в противофазе (в случае положительной обратной связи — в фазе).

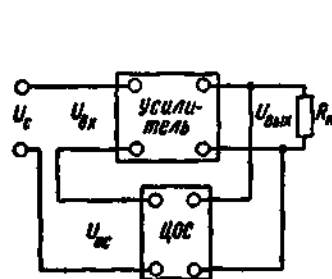


Рис. 19.7. Структурная схема усилителя с обратной связью

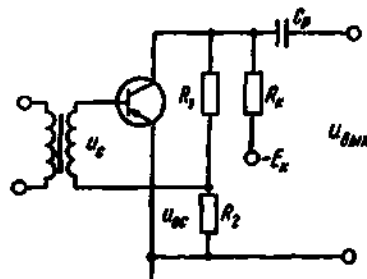


Рис. 19.8. Схема усилителя с отрицательной обратной связью

Найдем выражение для коэффициента усиления усилителя, охваченного обратной связью:

$$K_{oc} = U_{вых} / U_c. \quad (19.3)$$

Так как $U_{вх} = U_c - U_{oc}$, $U_c = U_{вых} / K_{oc}$ согласно (19.3), а $U_{oc} = \beta U_{вых}$ согласно (18.2), то $U_{вх} = U_{вых} / (K_{oc} - \beta U_{вых})$.

Отсюда $U_{вх} = U_{вых} (1 / K_{oc} - \beta) = U_{вых} (1 - K_{oc} \beta) / K_{oc}$ или $K_{oc} / (1 - K_{oc} \beta) = U_{вых} / U_{вх}$. Из (19.1) имеем $U_{вых} / U_{вх} = K$, где K — коэффициент усиления усилителя, не охваченного обратной связью. Тогда $K_{oc} / (1 - K_{oc} \beta) = K$, откуда окончательно получаем

$$K_{oc} = K / (1 + K\beta). \quad (19.4)$$

Анализ выражения (19.4) показывает, что K_{oc} при отрицательной обратной связи всегда меньше K . В таком случае повышается стабильность работы усилителя. Покажем это на примере.

Допустим, что усилитель с $K=100$ охвачен отрицательной обратной связью, а $\beta=0,2$. Тогда, согласно (19.4),

$$K_{oc} = \frac{K}{1 + \beta K} = \frac{100}{1 + 0,2 \cdot 100} \approx 4,76.$$

Пусть K увеличится на 10%. Новое значение

$$K_{oc} = \frac{K + \Delta K}{1 + \beta(K + \Delta K)} = \frac{100 + 10}{1 + 0,2(100 + 10)} \approx 4,8.$$

Таким образом, K_{oc} изменилось всего лишь на 1%.

Физическая сущность стабилизации коэффициента усиления усилителя, охваченного отрицательной обратной связью, состоит в том, что при увеличении K увеличивается напряжение обратной связи и входное напряжение падает. В то же время при уменьшении K входное напряжение увеличивается, т. е. отрицательная обратная связь автоматически поддерживает стабильность работы усилителя.

При положительной обратной связи $K_{oc} = K / (1 - \beta K)$.

В этом случае устойчивость работы усилителя ухудшается, что может привести к самовозбуждению усилительного каскада.

В заключение рассмотрим конкретную схему усилителя с отрицательной обратной связью, приведенную на рис. 19.8. Здесь напряжение отрицательной обратной связи снимается с резистора R_2 делителя напряжения $R_1 R_2$. Легко убедиться в том, что обратная связь в данном случае — отрицательная. Действительно, если при изменении u_c потенциал базы увеличивается, то потенциал коллектора уменьшается. Это уменьшение потенциала через цепь обратной связи передается на базу транзистора и напряжения сигнала и обратной связи оказываются в противофазе.

Карточка № 19.4 (195)
Обратная связь в усилителях

Какое из приведенных выражений лишено физического смысла при условии, что $K > 1$?	$K_{oc} = K / (1 + K)$	47
	$K_{oc} = K / (1 + \beta K)$	5
	$K_{oc} = K (1 - \beta K)$	60
	$K_{oc} = K (1 - K)$	39

Продолжение

Каково соотношение между напряжениями $U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{ос}}$ когда $K_{\text{ос}} = K(1 + K)$?	$U_{\text{ос}} < U_{\text{вых}}$	18
	$U_{\text{ос}} > U_{\text{вых}}$	73
	$U_{\text{ос}} = U_{\text{вых}}$	35
Как изменится напряжение обратной связи в схеме на рис. 19.8, если резистор R_2 зашунтировать емкостью?	$U_{\text{ос}}$ не изменится	42
	$U_{\text{ос}}$ увеличится	48
	$U_{\text{ос}}$ уменьшится	14
Из каких резисторов составлены делители постоянного и переменного напряжений в схеме на рис. 19.8?	Делитель $U_{+}: R_1, R_2$ Делитель $U_{-}: R_1, R_2$	64
	Делитель $U_{+}: R_1, R_2, R_k$ Делитель $U_{-}: R_1, R_2$	54
	Делитель $U_{+}: R_1, R_2$ Делитель $U_{-}: R_1, R_2, R_k$	19
	Делитель $U_{+}: R_2, R_1, R_k$ Делитель $U_{-}: R_2, R_1, R_k$	11
	Не действует	3
	Это зависит от соотношения между значениями сопротивлений R_1, R_2 и R_k	21
Известно, что изменение температуры приводит к изменению тока коллектора транзисторов. Действует ли при этом отрицательная обратная связь по постоянной составляющей коллекторного тока в схеме на рис. 19.8?	Действует	53

§ 19.5. МЕЖКАСКАДНЫЕ СВЯЗИ. УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для получения неискаженной формы и заданной мощности полезного сигнала на выходе усилителя необходимо применять несколько каскадов усиления. Между этими каскадами существуют различные способы связи: через разделительные конденсаторы (емкостная), с помощью трансформаторов (трансформаторная), непосредственная (гальваническая).

В УНЧ широко распространена емкостная связь (рис. 19.9). Напряжение полезного сигнала $u_{\text{вых}}$ по-

дают на базу T_1 через разделительный конденсатор C_{p1} . Делитель $R_1 R_2$ определяет напряжение покоя на участке база — эмиттер первого каскада. Цепь R_{21}, C_{21} составляет цепь отрицательной обратной связи по току питания и обеспечивает его стабилизацию. Усиленное по амплитуде напряжение подают через разделительный конденсатор C_{p2} , не пропускающий постоянную составляющую коллекторного напряжения первого каскада на базу транзистора T_2 .

В данном усилителе оба каскада собраны по схеме с общим эмиттером. Известно, что такая схема характеризуется большим выходным и относительно малым входным сопротивлениями. Таким образом, вход последующего каскада оказывается не согласованным с выходом предыдущего. Для согласования применяют трансформаторную связь, при которой обеспечивается максимально возможная мощность на входе последующего каскада (рис. 19.10).

В ряде устройств автоматического контроля измеряют и регулируют такие величины, как температура, давление, механические напряжения и т. д. Эти незлектрические величины преобразуют в медленно меняющиеся токи и напряжения с частотой порядка 1 Гц и меньше. Так как усиление таких медленно меняющихся сигналов невозможно с помощью обычных УНЧ с емкостной или трансформаторной

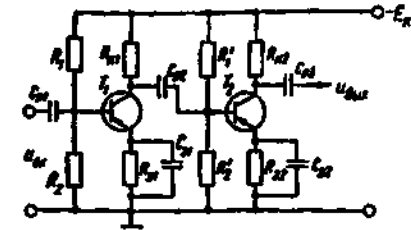


Рис. 19.9. Схема двухкаскадного усилителя с емкостной связью

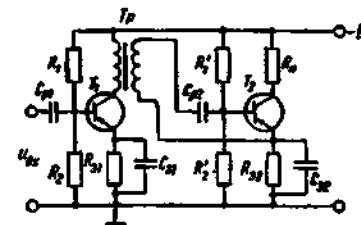


Рис. 19.10. Схема двухкаскадного усилителя с трансформаторной связью

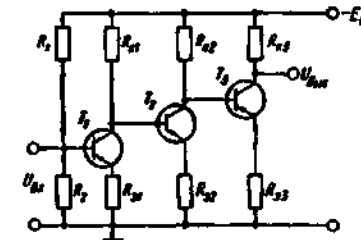


Рис. 19.11. Схема УПТ прямого усиления

связью, применяют специальные усилители с гальванической связью между каскадами — усилители постоянного тока (УПТ).

На вход таких усилителей подают сигналы порядка долей милливольт. Для усиления таких слабых сигналов приходится применять многокаскадный УПТ.

Существует два принципиально различных способа усиления медленно меняющихся сигналов: непосредственно по постоянному току с помощью усилителей прямого усиления и с предварительным преобразованием постоянного тока в переменный с помощью усилителей с преобразованием.

Рассмотрим усилитель прямого усиления (рис. 19.11), состоящий из трех каскадов. Каждый каскад собран по схеме с общим эмиттером, и его работа в принципе не отличается от работы рассмотренных УНЧ. Отсутствие разделительных конденсаторов между каскадами приводит к тому, что постоянная составляющая напряжения предыдущего каскада подается на базу последующего и, следовательно, ее необходимо компенсировать.

Компенсация постоянного напряжения предыдущего каскада обеспечивается постоянным напряжением, которое снимается с резистора R_2 последующего каскада. В частности, сопротивление резисторов R_{22} и R_{23} выбирают такими, чтобы напряжения база-эмиттер транзисторов T_2 и T_3 обеспечивали нормальный режим работы.

Режим покоя транзистора T_1 определяется напряжением делителя $R_1 R_2$, а также напряжением на R_{21} .

Резисторы $R_{21} - R_{23}$ обеспечивают также отрицательную обратную связь по току. Эта обратная связь по постоянной составляющей тока полезна с точки зрения уменьшения дрейфа нуля усилителя. Дрейфом нуля усилителя называют изменение выходного напряжения усилителя, не связанное с изменением входного напряжения. Дрейф может быть вызван изменением напряжения источника питания, температуры окружающей среды, параметров схемы и т. д. Напряжение дрейфа соизмеримо с напряжением сигнала и поэтому вызывает его недопустимые искажения. Для борьбы с дрейфом стабилизируют напряжение источников питания, используют глубокие отрицательные обратные связи, а также произ-

водят специальный подбор деталей и элементов схемы УПТ. Наиболее эффективным методом борьбы с дрейфом в УПТ является применение балансных схем УПТ и схем с преобразованием постоянного напряжения в переменное.

Карточка № 19.8 (223)
Межкаскадные связи. Усилители постоянного тока

Каким должно быть значение емкости разделительных конденсаторов в схеме на рис. 19.9, при котором обеспечивается хорошее выделение постоянной составляющей выходного напряжения в каждом каскаде?	Значение C_p должно быть как можно больше	44
	Значение C_p должно быть как можно меньше	91
	Несущественно	32
Выберите правильное соотношение между емкостным сопротивлением разделительного конденсатора X_c и входным сопротивлением последующего каскада	$X_c > R_{вх}$	12
	$X_c \approx R_{вх}$	28
	$X_c < R_{вх}$	78
	$X_c \ll R_{вх}$	8
В какой из схем, представленных на рис. 19.9 и 19.10, будет обеспечено более равномерное усиление в рабочем диапазоне частот?	В схеме на рис. 19.9	86
	В схеме на рис. 19.10	40
	В обеих схемах равномерность усиления одинакова	55
Каким должно быть соотношение между R_{21} , R_{22} , R_{23} , чтобы обеспечивался одинаковый режим покоя всех трех транзисторов T_1 , T_2 в схеме на рис. 19.11?	$R_{21} = R_{22} = R_{23}$	26
	$R_{21} < R_{22} < R_{23}$	65
	$R_{21} > R_{22} > R_{23}$	46
Что изменится в работе схемы, представленной на рис. 19.11, если убрать резистор R_{21} ?	Работа схемы невозможна без R_{21}	41
	Ухудшается стабильность в работе	20
	Уменьшается коэффициент усиления схемы	13

§ 19.6. ИМПУЛЬСНЫЕ И ИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Импульсному (ключевому) режиму работы транзистора соответствует два крайних состояния: транзистор или заперт, или полностью открыт. В этом режиме транзисторы используют как бесконтактные переключающие устройства. Рассмотрим работу схемы, приведенной на рис. 19.12. В интервалы времени $0-t_1$, t_2-t_3 и т. д., когда на-

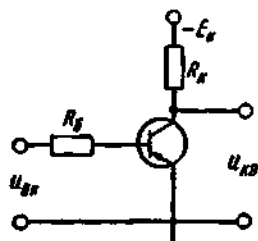


Рис. 19.12. Схема каскада в импульсном режиме работы транзистора

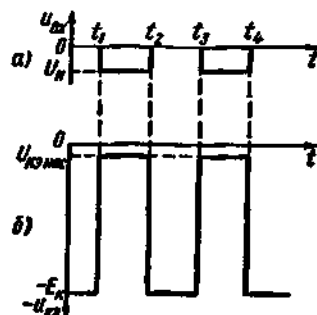


Рис. 19.13. Графики запускаящего напряжения (а) и выходного напряжения (б)

пряжение отсутствует (рис. 19.13, а), переход эмиттер — база заперт и ток коллектора равен нулю. Следовательно, напряжение на коллекторе равно напряжению источника питания ($-E_k$) (рис. 19.13, б) и транзистор заперт. Когда на вход схемы подают отрицательные запускаящие импульсы (интервалы времени t_1-t_2 , t_3-t_4), переход эмиттер — база открывается и в коллекторной цепи проходит ток. Амплитуда импульсов $U_{вх}$ (рис. 19.13, а) выбирается такой, чтобы коллекторный ток при заданных R_k и E_k достигал максимального значения, равного току насыщения $I_{к\text{нас}} \approx E_k/R_k$ (рис. 19.14). При этом напряжение на коллекторе $U_{кз\text{нас}}$ близко к нулю (рис. 19.13, б), т. е. транзистор полностью открыт.

Избирательные усилители применяют в тех случаях, когда необходимо усилить сигнал в достаточно узком диапазоне частот. Распространенным типом избирательных усилителей являются резонансные (рис. 19.15).

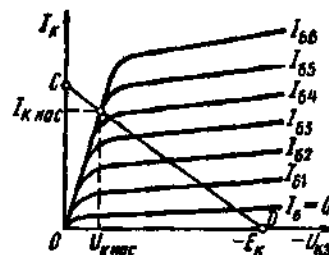


Рис. 19.14. Семейство вольтамперных характеристик и нагрузочная прямая CD каскада в импульсном режиме работы транзистора

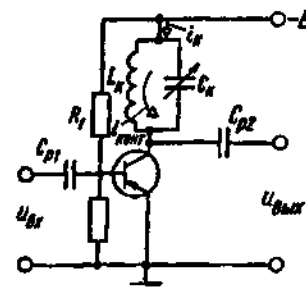


Рис. 19.15. Схема резонансного транзисторного усилителя

В них в качестве нагрузки коллекторной цепи используют параллельный колебательный $L_k C_k$ -контур, настроенный на частоту сигнала f_c . Для сигнала с резонансной или близкой к ней частотами контур имеет большое сопротивление $R_{к\text{рез}}$. Для частот, далеких от резонансной, сопротивление контура мало.

Таким образом, контур позволяет выделить напряжение резонансной и близких к ней частот.

Карточка № 19.6 (339)
Импульсные и избирательные усилители

Как изменится напряжение на коллекторе $U_{к\text{нас}}$ при незначительном уменьшении сопротивления R_k (см. рис. 19.14)?	Значительно уменьшится	10
	Уменьшится незначительно	83
	Незначительно увеличится	87
	Не изменится	89
Как изменится напряжение $U_{к\text{нас}}$ при увеличении тока базы до $I_{б6}$ (см. рис. 19.14)?	$U_{к\text{нас}}$ увеличится	1
	$U_{к\text{нас}}$ не изменится	96
	$U_{к\text{нас}}$ уменьшится	59
Каково соотношение между действующими значениями переменных составляющих тока коллектора i_k и тока в контуре $i_{конт}$ в резонансном режиме (см. рис. 19.15)?	$I_k > I_{конт}$	33
	$I_k \approx I_{конт}$	24
	$I_k < I_{конт}$	37

Для измерения переменного напряжения на контуре (см. рис. 19.15) используют специальный катодный вольтметр. Каким должно быть сопротивление вольтметра R_v по сравнению с сопротивлением контура $R_{к. рез.}$, чтобы вольтметр существенно не влиял на работу усилителя?	$R_v > R_{к. рез.}$	29
	$R_v < R_{к. рез.}$	27
	$R_v \approx R_{к. рез.}$	43
Что произойдет с коэффициентом усиления каскада (см. рис. 19.15), если в цепь эмиттера включить резистор?	Коэффициент усиления увеличится	81
	Коэффициент усиления уменьшится	90
	Коэффициент усиления не изменится	72

ГЛАВА 20

ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

§ 20.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электронный генератор — это устройство, преобразующее электрическую энергию источника постоянного тока в энергию незатухающих электрических колебаний заданной формы и частоты.

Электронные генераторы широко используют в радиоаппаратуре, измерительной технике, устройствах автоматики, электронно-вычислительных машинах и т. д.

По способу возбуждения генераторы подразделяют на генераторы с независимым возбуждением и генераторы с самовозбуждением (автогенераторы). Генераторы с независимым возбуждением являются усилителями колебаний, которые вырабатывают посторонние источники. Автогенераторы сами создают незатухающие колебания за счет использования положительной обратной связи (см. § 19.4).

Среди автогенераторов можно выделить генераторы синусоидальных колебаний и импульсные генераторы. Генераторы синусоидальных колебаний подразделяют на автогенераторы типа LC и автогенераторы типа RC .

§ 20.2. ТРАНЗИСТОРНЫЙ АВТОГЕНЕРАТОР ТИПА LC

Автогенераторы типа LC различают по способу создания положительной обратной связи как автогенераторы с емкостной, автотрансформаторной и индуктивной (трансформаторной) связью. Они состоят из колебательного контура, в котором возбуждаются колебания нужной частоты; усилительного элемента (транзистора), усиливающего сигнал, попадающий на его вход через цепь обратной связи; цепи положительной обратной связи, обеспечивающей подачу энергии с выхода схемы на ее вход в нужном количестве и в должной фазе; источника с постоянной ЭДС, энергия которого преобразуется в колебательную энергию в контуре.

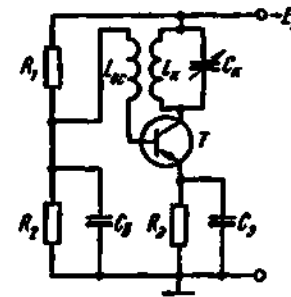


Рис. 20.1. Схема транзисторного автогенератора с индуктивной связью

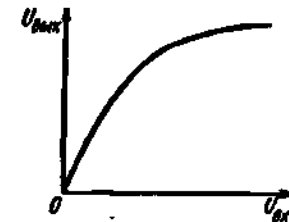


Рис. 20.2. Колебательная характеристика автогенератора

На рис. 20.1 приведена схема транзисторного автогенератора с индуктивной связью. При подключении к источнику питания E_k конденсатор контура C_k заряжается по цепи: $+E_k$, резистор R_k , эмиттер, база, коллектор транзистора T , C_k ($-E_k$). Конденсатор C_k и индуктивная катушка образуют параллельный колебательный контур, и, так как конденсатор C_k накопил определенную энергию, в контуре возникают свободные колебания с частотой f_0 , которая определяется параметрами этого контура. В результате индуктивной связи между катушками L_k и $L_{ос}$ в катушке обратной связи $L_{ос}$ наводится переменное напряжение той же частоты, что и в контуре. Это напряжение подводится к участку эмиттер — база транзистора, что вызывает пульсацию коллекторного тока с частотой f_0 .

Если обратная связь положительная, переменная

составляющая коллекторного тока усиливает колебания в контуре, что вызывает увеличение амплитуды переменного напряжения на входе транзистора. Это, в свою очередь, вызывает новое увеличение амплитуды переменной составляющей коллекторного тока и т. д. Нарастание амплитуды переменной составляющей коллекторного тока ограничено, так как связь между входным и выходным напряжением транзистора определяется характеристикой, приведенной на рис. 20.2. Надо иметь в виду, что для установления режима незатухающих колебаний в контуре недостаточно только обеспечить положительную обратную связь. Необходимо, чтобы потери энергии в контуре были полностью скомпенсированы усилителем за счет энергии источника постоянного тока.

Таким образом, незатухающие колебания в контуре генератора устанавливаются при выполнении двух условий, которые называют условиями самовозбуждения. Это условие баланса фаз, которое обеспечивается положительной обратной связью, и условие баланса амплитуд, зависящее от значения коэффициента обратной связи β .

Карточка № 20.1 (251)
Транзисторный автогенератор типа LC

Чем отличается автогенератор от усилителя?	Характером нагрузки	44
	Видом усилительного элемента	93
	Наличием положительной обратной связи	120
При сборке схемы автогенератора (см. рис. 20.1) было нарушено условие баланса фаз. Каким образом можно обеспечить выполнение этого условия?	Поменять местами провода, идущие к C_k	98
	Заменить катушку L_{oc} на другую	87
	Поменять местами провода, идущие к L_{oc}	84
Какие параметры схемы (см. рис. 20.1) надо изменить, чтобы обеспечить условие баланса амплитуды?	Значение E_k	78
	Значение коэффициента трансформации между L_k и L_{oc}	103
	Соотношение между R_1 и R_2	37

Продолжение

Какую роль в схеме (рис. 20.1) играет конденсатор C_k ?	Обеспечивает цепь переменной составляющей коллекторного тока	72
	Обеспечивает подачу переменного потенциала сигнала обратной связи на эмиттер T	60
	Устраняет отрицательную обратную связь по переменной составляющей	85
Какие параметры схемы автогенератора в основном влияют на частоту колебаний?	$L_k; C_k; C_e; C_b$	95
	$L_k; C_k; L_{oc}$	27
	$L_k; C_k$	59

§ 20.3. ТРАНЗИСТОРНЫЙ АВТОГЕНЕРАТОР ТИПА RC

Автогенераторы типа LC применяют в основном на частотах выше 20 кГц, так как для более низких частот конструкция таких колебательных контуров громоздка. Для получения синусоидальных колебаний на низких частотах применяют более простые и дешевые генераторы типа RC. Простейшая схема такого генератора приведена на рис. 20.3.

Вместо колебательного контура в схеме включен резистор R_k , а положительная обратная связь осуществляется через фазовращательную цепь, состоящую из трех звеньев RC. Если выход данной схемы соединить непосредственно с входом, обеспечив при этом условия самовозбуждения, то генерируемые колебания не будут синусоидальными. Для того чтобы схема вырабатывала именно синусоидальные колебания, положительная обратная связь должна обеспечиваться только для одной определенной гармоники несинусоидальных колебаний. Эту функцию и выполняет фазовращательная цепь RC.

Параметры цепи должны быть выбраны так, чтобы при увеличении коллекторного тока и, следовательно, увеличении потенциала коллектора потенциал базы (рис. 20.3) уменьшался. Иными словами, напряжения на коллекторе и на базе должны находиться в противофазе. Это и есть условие баланса фаз. Покажем

с помощью упрощенной векторной диаграммы (рис. 20.4), как выполняется это условие. При этом будем полагать, что током в каждом последующем звене цепи RC можно пренебречь по сравнению с током в предыдущем звене. Переменная составляющая коллекторного напряжения U_k вызовет в цепи C_1R_1

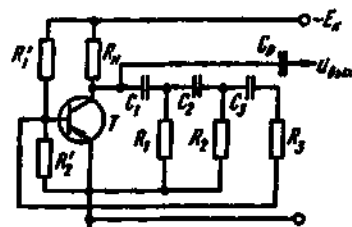


Рис. 20.3. Схема транзисторного автогенератора типа RC

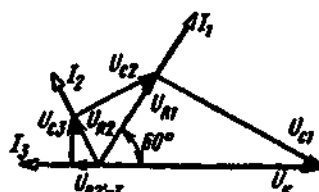


Рис. 20.4. Упрощенная векторная диаграмма напряжений для цепочки RC

ток, опережающий это напряжение по фазе на некоторый угол. Этот угол определяется соотношением между X_{C1} и R_1 и может быть выбран равным 60° . Напряжение U_{R1} , в свою очередь, вызовет в цепи C_2R_2 ток с таким же соотношением параметров, как и в цепи C_1R_1 . Это обеспечит сдвиг по фазе между U_{R1} и U_{R2} также на 60° и т. д. В итоге напряжение на R_2 , приложенное к участку база — эмиттер транзистора T (см. рис. 20.3), окажется сдвинутым по отношению к U_k на 180° . Частота синусоидальных колебаний в схеме определяется параметрами цепи RC и при условии $C_1 = C_2 = C_3 = C$; $R_1 = R_2 = R_3 + R'_2 = R$ $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{6RC})$.

Для выполнения условия баланса амплитуд коэффициент усиления усилителя должен быть больше ослабления, вносимого фазовращательной цепью RC . Для схемы, приведенной на рис. 20.3, это ослабление равно 29.

Карточка № 20.2 (211)
Транзисторный автогенератор типа RC

Коллектор транзистора (см. рис. 20.3) соединили через емкость с базой. Будет ли при этом действовать положительная обратная связь в схеме?	Да	12
	Нет	20
	Это зависит от значения емкости	26

Продолжение

Выберите правильное соотношение между параметрами цепи RC , при котором каждое звено обеспечит одинаковый сдвиг по фазе	$X_{C1}/R_1 > X_{C2}/R_2 > X_{C3}/(R_3 + R'_2)$	11
	$X_{C1}/R_1 < X_{C2}/R_2 < X_{C3}/(R_3 + R'_2)$	49
	$X_{C1}/R_1 = X_{C2}/R_2 < X_{C3}/(R_3 + R'_2)$	47
Обязательно ли выдерживать такое соотношение между параметрами цепи, при котором каждое звено обеспечит одинаковый сдвиг по фазе?	Да	58
	Это зависит от частоты генерируемых колебаний	74
	Нет	61
Как надо изменить параметры цепи RC , чтобы увеличить частоту генерируемых колебаний в два раза?	Уменьшить R в два раза	104
	Уменьшить C в два раза	3
	Уменьшить R и C в $\sqrt{2}$ раз	67
Можно ли количество звеньев цепи RC сократить до двух?	Нет	71
	Да	88
	Это зависит от частоты генерируемых колебаний	64

§ 20.4. ГЕНЕРАТОРЫ ЛИНЕЙНО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ НАПЯЖЕНИЯ

Генераторы линейно изменяющегося (пилообразного) напряжения (ЛИН) должны вырабатывать напряжение, график которого приведен на рис. 20.5. Это напряжение используют для получения развертки электронного луча в различных устройствах (осцилло-

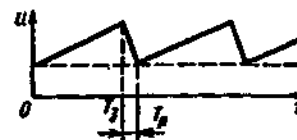


Рис. 20.5. График идеального ЛИН

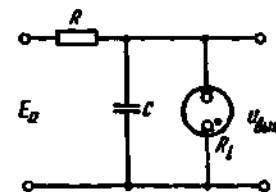


Рис. 20.6. Схема автогенератора ЛИН на неоновой лампе

графах, телевизионных и радиолокационных индикаторах и т. д.). Получение ЛИН, как правило, обеспечивается процессами зарядки или разрядки конденсатора.

Простейший автогенератор пилообразного напряжения построен на неоновой лампе (рис. 20.6). В момент подключения схемы к источнику постоянной ЭДС E_a конденсатор C начинает заряжаться (через резистор R) и напряжение на нем нарастает так, как это показано на рис. 20.7 (период времени T_3). В момент времени t_1 напряжение на конденсаторе C оказыва-

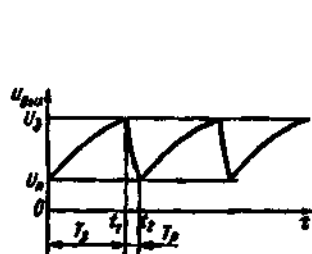


Рис. 20.7. График реального ЛИН

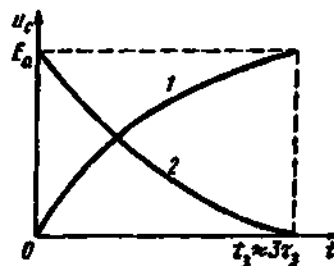


Рис. 20.8. Графики зарядки (1) и разрядки (2) конденсатора

ется равным напряжению зажигания U_z неоновой лампы. При этом сопротивление лампы резко падает и конденсатор C очень быстро разряжается до напряжения потухания лампы U_n (период времени T_p). В момент времени t_2 , когда газовый разряд в неоновой лампе прекращается и ее сопротивление вновь резко возрастает, конденсатор C снова начинает относительно медленно заряжаться до напряжения U_3 и т. д. Таким образом, на выходе схемы возникает пилообразное напряжение.

Необходимо отметить, что зарядка конденсатора в данной схеме происходит не по линейному, а по экспоненциальному закону. На рис. 20.8 показаны кривые, соответствующие законам зарядки и разрядки конденсатора через резистор R .

Время зарядки конденсатора через резистор определяется постоянной времени $\tau_3 = RC$. Практически этот процесс заканчивается полностью через время $t_3 = (3 \div 4)\tau_3$. То же самое можно сказать и о процессе разрядки конденсатора, но если при зарядке напря-

жение на конденсаторе асимптотически приближается к E_a (кривая 1), то при разрядке оно стремится к нулю (кривая 2). Начальный участок экспоненты незначительно отличается от прямой линии и поэтому при достаточно большой разнице между E_a и U_z напряжение на выходе схемы (см. рис. 20.6) близко к линейному.

Данная схема имеет существенные недостатки, связанные с непостоянством напряжения зажигания и потухания лампы, с разбросом параметров резисто-

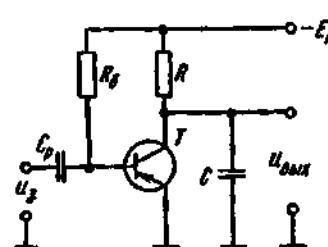


Рис. 20.9. Схема генератора ЛИН на транзисторе

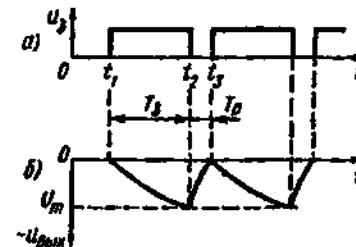


Рис. 20.10. Графики запускающего напряжения (а) и выходного напряжения (б)

ра R и конденсатора C . Все это приводит к изменению времени зарядки и разрядки T_3 и T_p конденсатора, которое определяется как параметрами неоновой лампы, так и постоянными времени зарядки и разрядки $\tau_3 = RC$ и $\tau_p = R_i C$, где R_i — внутреннее сопротивление лампы при разрядке.

Для повышения стабильности работы генератора ЛИН используют генераторы с посторонним возбуждением. Схема такого генератора, собранного на транзисторе, представлена на рис. 20.9. В исходном состоянии транзистор T открыт и насыщен. Следовательно, напряжение на его коллекторе и конденсаторе C близко к нулю (рис. 20.10, а, б).

В момент времени t_1 на базу транзистора T подают положительный запускающий импульс и транзистор запирается, а конденсатор C начинает заряжаться по цепи $+E_k, C, R, -E_k$ (см. рис. 19.9). Таким образом, в течение времени действия запускающего импульса T_3 напряжение на конденсаторе растет (рис. 20.10, б). По окончании действия запускающего импульса, в момент времени t_2 , транзистор открывается и конден-

сатор C быстро разряжается через транзистор T . В момент времени t_3 процесс зарядки повторяется и т. д.

Существенным недостатком рассмотренных схем является плохое использование напряжения источника E_k , так как для получения напряжения, близкого к линейному, конденсатор должен заряжаться до напряжения U_m , которое значительно меньше, чем E_k . В более совершенных схемах используют элементы, которые обеспечивают постоянство тока зарядки конденсатора.

Карточка № 20.3 (161)
Генераторы пилообразного напряжения

Выберите правильное соотношение между напряжением источника E_k и напряжением зажигания лампы, которое обеспечит приемлемую линейность $U_{\text{пил}}$ в схеме на рис. 20.6	$U_k \approx E_k$	21
	$U_k < E_k$	43
	$U_k > E_k$	102
В какой из приведенных схем рис. 20.6 и 20.9 изменение $\tau_s = RC$ вызовет изменение периода следования выходных импульсов?	В схеме на рис. 20.9	17
	В обеих схемах	62
	В схеме на рис. 20.6	114
При каком соотношении между $\tau_s = RC$ и временем зарядки T_s в схеме на рис. 20.9 будет обеспечена хорошая линейность выходного напряжения?	$\tau_s < T_s$	53
	$\tau_s \approx T_s$	30
	$\tau_s > T_s$	40
	$\tau_s \gg T_s$	90
В какой из приведенных схем на рис. 20.6 и 20.9 время разрядки конденсатора должно быть строго лимитировано?	В обеих схемах	56
	В схеме на рис. 20.9	119
	В схеме на рис. 20.6	107
Каково соотношение между внутренним сопротивлением зажатой лампы R_a и погасшей R_m неоновой лампы?	$R_a \approx R_m$	15
	$R_a > R_m$	69
	$R_a < R_m$	115
	$R_a \ll R_m$	45

§ 20.5. МУЛЬТИВИБРАТОР

Мультивибратор представляет собой генератор несинусоидальных колебаний, близких по форме к прямоугольным.

Такие колебания можно рассматривать как сумму большого числа простых гармонических колебаний. Отсюда и название «мультивибратор» или буквально «генератор множества простых колебаний».

Мультивибраторы широко используют в импульсной технике, в ЭВМ и устройствах автоматики в качестве пусковых или переключающих устройств.

Различают три режима работы мультивибраторов: автоколебательный, синхронизации и ждущий.

Рассмотрим симметричный мультивибратор, работающий в режиме автоколебаний (рис. 20.11). При подключении данной схемы к источнику питания E_k

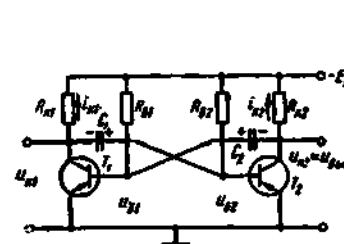


Рис. 20.11. Схема симметричного транзисторного мультивибратора

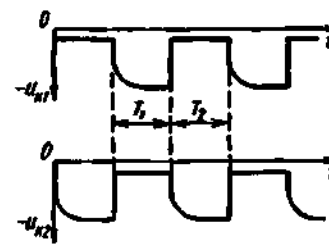


Рис. 20.12. Графики напряжений на коллекторах симметричного мультивибратора

возникает режим неустойчивого равновесия, так как, несмотря на симметрию схемы, в любой момент может нарушиться равенство коллекторных токов.

Если, например, несколько уменьшится ток i_{k1} , то это приведет к уменьшению потенциала на коллекторе T_1 . А так как напряжение на конденсаторе C_1 не может измениться мгновенно, то отрицательный скачок напряжения на коллекторе T_1 передается на участок база — эмиттер транзистора T_2 . Это вызовет увеличение тока коллектора i_{k2} и, следовательно, повышение потенциала коллектора T_2 . Повышение потенциала коллектора T_2 через конденсатор C_2 передается на базу T_1 и ток i_{k1} еще больше уменьшается и т. д. Данный процесс нарастает лавинообразно, тем более что

скачки напряжения на базах увеличиваются за счет усиительного действия транзисторов. В итоге транзистор T_1 окажется запертым, а потенциал его коллектора практически равным $-E_k$. Транзистор T_2 будет полностью открыт и насыщен, а потенциал на его коллекторе — близким к нулю.

В исходном состоянии (до опрокидывания схемы) конденсаторы C_1 и C_2 были заряжены с полярностью, показанной на схеме рис. 20.11, до напряжения $-E_k + R_{k1}i_k$. Во время опрокидывания схемы напряжение на конденсаторах не успевает измениться. После опрокидывания схемы конденсатор C_1 относительно быстро заряжается до напряжения E_k по цепи: $+E_k$, переход эмиттер — база открытого T_2 , C_1 , R_{k1} , $-E_k$. Конденсатор C_2 после запираания T_1 перезаряжается по цепи: $+E_k$, T_2 , C_2 , R_{k1} , $-E_k$. Фактически через резистор R_k в первый момент проходит ток под действием $2E_k$ и, следовательно, к участку база — эмиттер T_1 приложено напряжение $+E_k$, надежно запирающее T_1 . При медленной перезарядке C_2 ток уменьшается, напряжение на R_{k1} падает и, когда $u_{c2} \approx 0$, напряжение на участке база — эмиттер T_1 близко к нулю. Транзистор T_1 открывается, потенциал его коллектора начинает расти, что приводит к росту потенциала базы T_2 и уменьшению потенциала его коллектора, а следовательно, и потенциал базы T_1 . Таким образом, возникает новый лавинообразный процесс и схема снова опрокидывается. При этом T_1 открыт и насыщен, T_2 заперт. После опрокидывания конденсатор C_2 быстро заряжается через R_{k2} до напряжения E_k , а C_1 начинает медленно перезаряжаться аналогично перезарядке C_2 . Процессам, происходящим в схеме, соответствуют графики напряжений, приведенные на рис. 20.12.

Карточка № 20.4 (322)
Мультивибратор

Каким должно быть соотношение между сопротивлениями R_0 и R_k для нормальной работы схемы, приведенной на рис. 20.11?	$R_0 > R_k$	34
	$R_0 \approx R_k$	13
	$R_0 < R_k$	24
Какими параметрами схемы симметричного мультивибратора определяется длительность импульсов на коллекторах транзистора?	Постоянной времени зарядки $\tau_z = R_k C$	96
	Постоянной времени перезарядки $\tau_n = R_k C$	52

Продолжение

Каково соотношение между напряжениями на C_1 и C_2 в период времени, когда T_1 открыт, а T_2 заперт?	$u_{c1} > u_{c2}$	73
	$u_{c1} < u_{c2}$	76
	$u_{c1} = u_{c2}$	19
В схеме симметричного мультивибратора $T_1 = T_2$ (см. рис. 20.12). Каким будет соотношение между T_1 и T_2 , если $C_1 > C_2$?	$T_1 = T_2$	5
	$T_1 > T_2$	33
	$T_1 < T_2$	97
Каким будет соотношение между T_1 и T_2 , если в схеме (см. рис. 20.11) $R_{k1} > R_{k2}$?	$T_1 > T_2$	54
	$T_1 < T_2$	82
	$T_1 = T_2$	63

§ 20.6. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ

Электронно-лучевыми трубками (ЭЛТ) называют электровакуумные приборы, в которых управляемый электрическими или магнитными полями поток электронов, сформированный в электронный луч, используется для преобразования электрических сигналов в световые.

По способу фокусировки и отклонения электронного луча различают ЭЛТ: а) с электростатическим управлением, когда электронный луч фокусируется и отклоняется электрическим полем; б) с электромагнитным управлением, когда фокусировка и отклонение луча осуществляются магнитным полем.

Функционально ЭЛТ подразделяют на: осциллографические трубки, служащие для наблюдения и изучения периодических сигналов и получения осциллограмм, применяемые в основном в измерительной технике; индикаторные трубки — для регистрации объектов в радиолокационных и радионавигационных устройствах; приемные телевизионные трубки — для преобразования электрического видеосигнала в сигнал изображения.

ЭЛТ с электростатическим управлением. Основными для ЭЛТ (рис. 20.13) являются следующие узлы. Электронная пушка, которая служит для

создания электронного луча и фокусирования его на экране. Она помещена в узкой удлиненной части стеклянного баллона и состоит из катода, управляющего электрода, двух анодов.

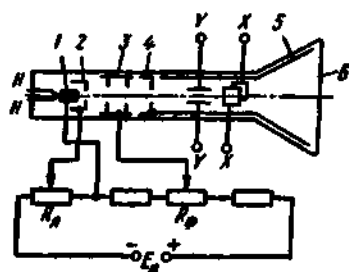


Рис. 20.13. Устройство и схема включения ЭЛТ с электрическим управлением

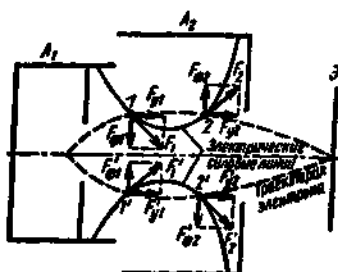


Рис. 20.14. Схема фокусировки и ускорения электронного луча с помощью двух анодов

Отклоняющая система, смещающая луч в двух взаимно перпендикулярных направлениях и состоящая из двух пар пластин $X-X$ и $Y-Y$.

Экран 6 предназначен для преобразования кинетической энергии электронов луча в световую. Для этого на внутреннюю сторону торцевой части ЭЛТ наносят тонкий слой вещества, способного светиться при бомбардировке электронами. Это вещество называется люминофором. Основой люминофора может служить сульфид цинка, вольфрамово-кислый кальций и т. д. Состав люминофора определяет цвет свечения экрана.

В процессе бомбардировки экрана электроны, оседая на нем, увеличивают его отрицательный заряд. Поэтому для предотвращения запирания трубки ее внутреннюю поверхность покрывают токопроводящим слоем из графита 5 (аквадагом), который соединяют со вторым анодом. Тогда вторичные электроны, выбиваемые из экрана электронным лучом, притягиваются аквадагом и на экране не накапливается отрицательный заряд.

Рассмотрим более подробно устройство и назначение отдельных элементов электронной пушки.

Катод 1 выполнен в виде никелевого цилиндра, торцевая часть которого покрыта активированным слоем. Внутри цилиндра помещена нить $H-H$, служащая для нагревания катода.

Управляющий электрод 2 представляет собой никелевый цилиндр с отверстием (диафрагмой) в торцевой части и служит для регулирования яркости свечения пятна на экране трубки. Управляющий электрод соединен с потенциометром яркости R_n и имеет отрицательный потенциал относительно катода. Меняя потенциал, можно регулировать количество электронов в луче. При некотором значении потенциала ни один электрон не может преодолеть тормозящее поле управляющего электрода и трубка оказывается запертой.

Аноды 3 и 4 выполнены в виде цилиндров разных диаметров. В аноде 3 имеется две, а в аноде 4 — одна диафрагма. На аноды относительно катода подают большое положительное напряжение (на первый $\sim 0,5$ кВ, на второй — несколько киловольт). Аноды служат для ускорения электронов луча и их фокусирования.

На рис. 20.14 представлена схема, поясняющая фокусирующее и ускоряющее действие системы анодов. Электрическое поле между анодами неоднородно и направлено от анода A_2 к аноду A_1 , так как потенциал A_2 выше потенциала A_1 . На электрон в этом поле действует сила, направленная по касательной к силовой линии в точке, где в данный момент находится электрон. На электроны, находящиеся в точках 1 и 1', в области первого анода действуют силы F_1 и F_1' , которые могут быть разложены на продольные составляющие F_{11} и F_{11}' , ускоряющие электроны, и поперечные $F_{\perp 1}$ и $F_{\perp 1}'$, под действием которых электроны движутся к оси трубки (фокусирующее действие). В точках 2 и 2' в области второго анода продольные составляющие ускоряют электроны в том же направлении, а фокусирующие $F_{\perp 2}$ и $F_{\perp 2}'$ отклоняют электроны от оси трубки. Следовательно, фокусирующее действие первого анода эквивалентно собирающей линзе, а второго — рассеивающей.

Таким образом, всю фокусирующую систему можно рассматривать как электростатическую линзу.

Так как собирающее действие первого анода сильнее, чем рассеивающее действие второго (так как в области A_2 скорость движения электронов меньше), поперечное перемещение к оси трубки больше, чем от нее. Поэтому электроны луча сходятся в некоторой

точке, лежащей на продольной оси трубки. При изменении с помощью потенциометра напряжения между анодами изменяют значения и конфигурацию электрического поля, а следовательно, и положение фокуса на оси, которое таким образом можно совместить с плоскостью экрана.

ЭЛТ с электромагнитным управлением. Конструкция трубки (рис. 20.15,а) отличается от рассмотренной (см. рис. 20.13) тем, что в ней функции второго

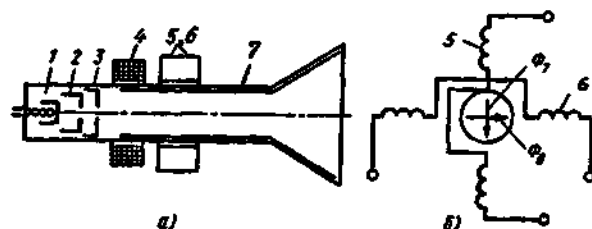


Рис. 20.15. Схемы ЭЛТ с электромагнитным управлением (а) и отклоняющей системы (б)

анода выполняет аквадаг 7. Оба анода 2, 3 служат для ускорения электронов, эмиттированных катодом 1 вдоль оси трубки. Фокусировка луча производится магнитным полем фокусирующей катушки 4. В процессе фокусировки происходит закручивание электронов в спираль, сходящуюся в определенной точке на оси трубки. Изменение постоянного тока катушки приводит к изменению поля, что изменяет положение точки фокуса.

Управление лучом осуществляется также с помощью магнитного поля двух отклоняющих катушек 5 и 6 (рис. 20.15,б), через которые проходят токи соответствующей формы.

Рассмотрим обозначения ЭЛТ. Первый элемент обозначения — число, которое определяет диагональ или диаметр экрана в сантиметрах. Второй элемент — две буквы, обозначающие тип трубки: ЛО — осциллографическая трубка с электростатическим отклонением луча, ЛМ — трубка с электромагнитным отклонением, ЛК — телевизионная трубка. Третий элемент — число, показывающее номер разработки. Четвертый элемент — буква, обозначающая цвет свечения и длительность послесвечения; А — синий цвет, короткое послесвечение (10^{-5} – 10^{-3} с), Б — белый цвет, среднее послесвечение (10^{-2} –0,1 с) и т. д. Например, 67ЛК2Б — телевизионная трубка с диагональю 67 см, свечение белое.

Карточка № 20.5 (229)
Электронно-лучевые трубки

Какому положению движка потенциометра R_x (см. рис. 20.13) соответствует минимальная яркость свечения экрана?	Крайнему правому	77
	Крайнему левому	94
	Среднему	89
Через какой электрод трубки замыкается основная часть анодного тока?	Через первый анод	111
	Через второй анод	117
	Через аквадаг	20
В какой точке на продольной оси трубки электроны имеют максимальную скорость?	За первым анодом	68
	За вторым анодом	109
	За пластинами	75
	У экрана	86
Происходит ли фокусирование электронного луча в пространстве между первым анодом и катодом?	Да	7
	Нет	18
	Это зависит от конструкции анода и катода	14
Каков характер сил, действующих на электроны в трубке с электромагнитным управлением между фокусирующей и отклоняющей катушками?	Только электромагнитные силы Лоренца	99
	И электромагнитные, и электрические	83

§ 20.7. ЭЛЕКТРОННЫЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

Электронный осциллограф — это прибор, который служит для записи и визуальных наблюдений электрических сигналов, меняющихся по времени, а также для измерения электрического напряжения, частоты, временных интервалов.

Рассмотрим работу осциллографа, используемого для визуального наблюдения переменного напряжения (рис. 20.16). В осциллографах применяют трубки с электростатическим управлением. Так как любой периодически изменяющийся сигнал, как правило, изображается с помощью временной диаграммы, необходимо обеспечить временную характеристику (ось вре-

мени) на экране осциллографа. Это можно осуществить горизонтальной разверткой луча, происходящей с постоянной скоростью, для чего на горизонтально отклоняющие пластины трубки $X - X$ через усилитель /

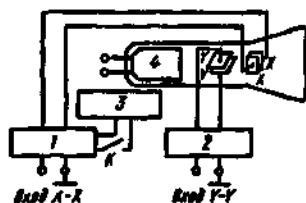


Рис. 20.16. Упрощенная структурная схема электронного осциллографа

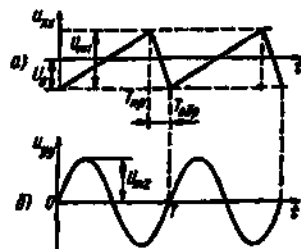


Рис. 20.17. Напряжение развертки (а) и исследуемое осциллографом напряжение (б)

подают напряжение пилообразной формы (рис. 20.17, а). В начальный момент времени между пластинами действует напряжение $-U_0$, смещающее световое пятно в левую часть экрана. Затем напряжение между пластинами $X - X$ начинает линейно нарастать и световое пятно совершает равномерное движение слева направо. Это перемещение называется прямым ходом луча и происходит за время $T_{пр}$.

В момент времени, когда развертывающее напряжение достигает максимума, происходит резкий спад напряжения до значения $-U_0$ и электронный луч совершает обратный ход за время $T_{обр}$. При этом трубка автоматически запирается. Затем процесс медленного нарастания повторяется снова и т. д. В результате послесвечения люминофора на экране трубки появляется горизонтальная светящаяся линия, служащая осью времени.

Если теперь на вход осциллографа $Y - Y$ подавать какое-нибудь периодически изменяющееся напряжение, например синусоидальное (рис. 20.17, б), то после усиления это напряжение прикладывается к вертикально отклоняющим пластинам $Y - Y$ (см. рис. 20.16). Это вызовет отклонение луча в вертикальном направлении сначала вверх, а затем вниз и т. д.

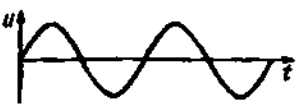
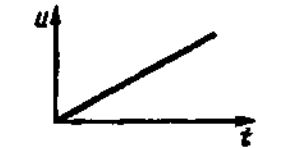
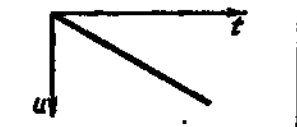
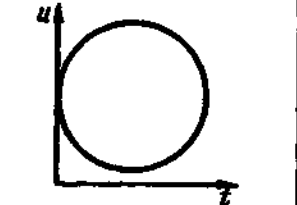
В результате одновременного действия полей на электронный луч полей развертывающего и иссле-

дуемого сигналов на экране возникает временная развертка последнего (в нашем случае это будет синусоида). Для получения устойчивого изображения необходимо, чтобы отношение периодов пилообразного напряжения и изучаемого сигнала составляло целое число.

Для измерения частоты периодического сигнала, подаваемого на вход $Y - Y$, на вход $X - X$ подают синусоидальное напряжение, снимаемое с генератора стандартных сигналов. При этом генератор пилообразного напряжения от усилителя / отключают (см. рис. 19.16). Если, например, оба сигнала — и изучаемый, и стандартный синусоидальный — имеют одинаковую амплитуду, то при сдвиге фазы между ними, равном $\pi/2$, и равенстве частот на экране появится окружность. Следовательно, частота исследуемого сигнала равна частоте стандартного, отсчитываемого по шкале генератора стандартных сигналов.

Карточка № 20.6 (330)
Электронный осциллограф

Выберите зависимость, которая соответствует линейно-изменяющемуся пилообразному напряжению	$u = kt^2$	106
	$u = kt$	51
	$u = k/t$	4
Напряжение развертки имеет форму, приведенную на графике. Каким будет изображение на экране, если $u_{yy} = U_m \sin \omega t$ (периоды u_{xx} и u_{yy} одинаковы)?		35
		92
		41

Каким будет изображение на экране, если период синусоидального изучаемого сигнала T в два раза больше периода развертывающего напряжения?		80
		36
Осциллограф работает в режиме измерения частоты. При этом $u_{uy} = U_m \sin \omega t$; $u_{ux} = U_m \cdot \sin \omega t$.		70
Каким будет изображение на экране?		100
		50
Каким должно быть соотношение между временем послесвечения экрана t_p и периодом развертки T_p , чтобы условия наблюдения были оптимальны?	$t_p < T_p$	118
	$t_p > T_p$	6
	$t_p \approx T_p$	81

§ 20.8. АНАЛОГОВЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ВОЛЬТМЕТР

Электронные вольтметры применяют в тех случаях, когда измерительный прибор должен обладать большим входным сопротивлением и иметь высокую чувствительность. Такой прибор представляет собой соче-

тание электронного усилителя и обычного магнито-электрического измерителя.

Структурная схема электронного вольтметра для измерения постоянных напряжений представлена на рис. 20.18. Делитель напряжения 1 расширяет пределы измерения прибора. Усилитель постоянного тока 2 повышает чувствительность вольтметра.

Рис. 20.18. Структурная схема электронного вольтметра постоянного напряжения



Так как УПТ прямого усиления, рассмотренные в § 19.5, обладают рядом существенных недостатков, главным из которых является заметный дрейф нуля, в электронных вольтметрах, как правило, используют мостовые схемы. Рассмотрим одну из возможных схем такого УПТ (рис. 20.19).

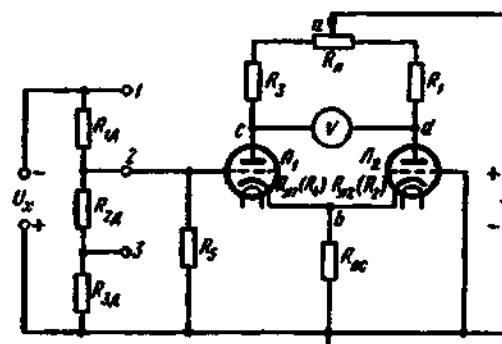


Рис. 20.19. Схема лампового вольтметра с мостовым УПТ

В схеме плечи моста образованы резисторами R_1 (часть R_n), R_3 (другая часть R_n), лампами L_1 и L_2 , которые эквивалентны резисторам R_2 и R_4 схемы, приведенной на рис. 8.13. Напряжение источника подводится к диагонали моста $a-b$. Измерительный прибор включен в диагональ $c-d$.

Потенциометр R_n дает возможность установить стрелку измерительного прибора на нуль при коротком замыкании входных клемм УПТ. Резистор обратной связи R_{oc} служит для увеличения стабильности работы схемы.



Рис. 20.20. Структурная схема комбинированного вольтметра

При подаче на вход схемы измеряемого напряжения U_x анодный ток лампы L_2 уменьшается, равновесие моста нарушается. При этом измерительный прибор регистрирует измеряемое напряжение.

Делитель напряжения, образованный резисторами $R_{1a} - R_{2a}$, дает возможность расширить пределы измерения вольтметра, однако он снижает его входное сопротивление.

Для измерения переменных напряжений низкой и высокой частоты используются также электронные вольтметры. При этом измеряемое напряжение сначала выпрямляют с помощью электронной лампы или полупроводникового диода, а затем подают на УПТ.

Достаточно часто используют приборы, обеспечивающие измерение как постоянных, так и переменных напряжений (рис. 20.20).

Карточка № 20.7 (148)
Аналоговый электронный вольтметр

Пусть в схеме на рис. 20.19 $R_d = R_{1a} + R_{2a} + R_{3a} = R_b = R$. Определите, в каком положении переключателя делителя входное сопротивление схемы минимально	В положении 2	22
	В положении 1	39
	В положении 3	57
	Выходное сопротивление схемы не зависит от положения переключателя	8
Какое положение переключателя напряжения соответствует максимальному пределу измерения?	Положение 1	28
	Положение 3	65
Что происходит с потенциалом точек с и d в схеме (см. рис. 20.19) при увеличении измеряемого напряжения?	φ_c увеличится, φ_d уменьшится	2
	φ_c уменьшится, φ_d увеличится	16
	φ_c увеличится, φ_d не изменится	108
	φ_c уменьшится, φ_d не изменится	10

Продолжение

Каким должно быть соотношение между напряжением записки L_1 и измеряемым напряжением для нормального функционирования схемы?	$U_x > U_{зап}$	38
	$U_x < U_{зап}$	32
	$U_x = U_{зап}$	48
Как повлияет на работу схемы непосредственное соединение сетки L_1 с корпусом?	Уменьшится чувствительность схемы	113
	Увеличится погрешность измерений	79
	Схема не будет работать	110

§ 20.9. ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ВОЛЬТМЕТР

Цифровые измерительные приборы (ЦИП) применяют для измерения различных электрических величин, таких, как постоянные и переменные напряжения и токи, сопротивления, индуктивности, емкости и др.

Необходимо иметь в виду, что измеряемые величины, как правило, непрерывны, а ЦИП измеряют дискретные (отдельные) значения (отсюда и названия ЦИП, а не потому, что результат представляется в цифровой форме).

Любой ЦИП содержит два основных узла: аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который преобразует плавно изменяющуюся величину в дискретную (числовой код), и цифровое отсчетное устройство, которое отображает в цифровой форме значение измеряемой величины.

ЦИП подразделяют на электромеханические и электронные. Последние обладают очень высоким быстродействием (до 10^6 измерений в секунду) и поэтому находят самое широкое применение, вытесняя электромеханические ЦИП, которые обеспечивают скорость измерения 10 имп/с.

Существуют различные методы преобразования непрерывной величины в дискретную. Рассмотрим метод с численно-импульсным кодированием на примере цифрового вольтметра с промежуточным преобразованием измеряемой величины во временной интервал (рис. 20.21). Приборы такого типа надежны, обладают большой точностью и быстродействием, отличаются относительно простой схемой.

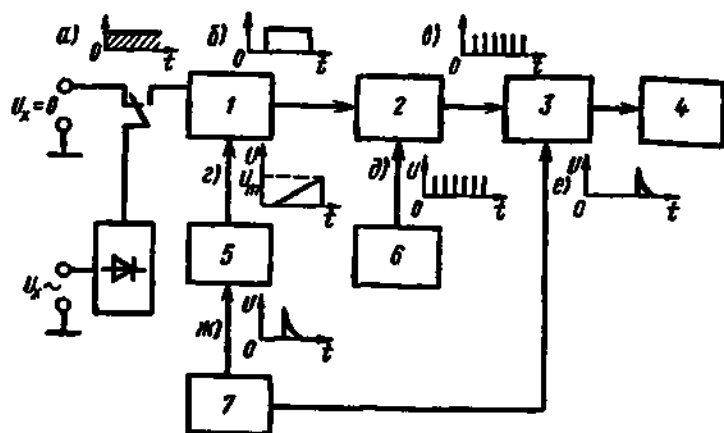


Рис. 20.21. Структурная схема цифрового вольтметра с промежуточным преобразованием сигнала во временной интервал

Измеряемое постоянное или выпрямленное напряжение U_x (графика а) подают на один вход сравнивающего устройства 1. На другой вход подается пилообразное напряжение (график з) с генератора пилообразного (компенсирующего) напряжения 5, который запускается импульсами управляющего устройства 7 (график ж). Этот импульс одновременно определяет начало прямоугольного импульса (графика б) на выходе сравнивающего устройства, который откроет электронный ключ 2. Сигналы генератора импульсов образцовой частоты 6 (график д) проходят через электронный ключ и поступают на вход электронного счетчика 3 (график в) до тех пор, пока линейно нарастающее напряжение не станет равным измеряемому напряжению U_x . В этот момент заканчивается прямоугольный импульс на выходе сравнивающего устройства и электронный ключ запирается.

Сигнал с электронного счетчика поступает на отсчетное устройство 4, представляющее собой цифровой индикатор того или иного типа. В настоящее время самое широкое распространение получили газоразрядные индикаторы.

Управление цифровыми индикаторами осуществляется дешифраторами, которые переводят результат из двоичной в десятичную систему счисления.

Очевидно, что количество сигналов генератора импульсов, проходящих через ключ, прямо пропор-

ционально длительности прямоугольного импульса сравнивающего устройства. Длительность прямоугольного импульса, в свою очередь, прямо пропорциональна значению измеряемого напряжения.

Управляющие импульсы (график е) следуют с определенной периодичностью, обеспечивая сбрасывание информации отсчетного устройства и ее периодическое возобновление. Таким образом, продолжительность отсчета определяется периодом следования этих импульсов.

В качестве примера можно привести характеристики прибора ВК7-10А/1, работающего по принципу, изложенному выше. Его пределы измерения по постоянному напряжению 10—100—1000 В, быстродействие 30 имп/с, он производит отсчет четырех значений.

Карточка № 20.8 (152)
Цифровой электронный вольтметр

В каком режиме работает генератор пилообразного напряжения?	В режиме самовозбуждения	91
	В ждущем режиме	23
Как повлияет увеличение частоты следования сигналов генератора импульсов образцовой частоты на точность измерения?	Точность измерений не изменится	1
	Точность измерения повысится	105
	Точность измерений понизится	116
Как повлияет нестабильность частоты следования сигналов генератора импульсов на точность измерения?	Ухудшается точность измерения	46
	Не влияет на точность измерения	31
Следует ли стабилизировать частоту повторения импульсов управляющего устройства?	Да	55
	Нет	66
	Это зависит от требований к точности измерений	9
Какое соотношение между измеряемым напряжением U_x и максимальным значением пилообразного напряжения U_m (см. рис. 20.21, з) обеспечит нормальную работу схемы?	$U_m = U_x$	25
	$U_m < U_x$	42
	$U_m > U_x$	112

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

§ 21.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Развитие электроники определяется постоянным совершенствованием характеристик элементной базы и аппаратуры по следующим направлениям: уменьшение габаритов и массы (миниатюризация); повышение надежности за счет сокращения соединительных линий, совершенствования контактных узлов и взаимного резервирования элементов; уменьшение потребляемой мощности; усложнение задач и соответствующих им схемных решений при одновременном удешевлении каждого отдельного элемента.

Существенные изменения в полупроводниковой технике связаны, во-первых, с переходом к интегральным микросхемам (ИМС) и, во-вторых, с переходом к большим интегральным схемам (БИС).

Интегральной называют микросхему с определенным функциональным назначением, изготавливаемую не сборкой и распайкой отдельных активных и пассивных элементов, а целиком, в едином технологическом процессе. Примерами интегральных схем могут служить усилители различных сигналов, логические схемы вычислительной техники, генераторы синусоидальных, импульсных или пилообразных напряжений, триггеры, изготовленные как единое целое в объеме одного полупроводникового кристалла или в тонких пленках. Эти схемы обычно дополняют навесными компонентами.

К пассивным элементам электронных схем относят резисторы, конденсаторы, индуктивные катушки, трансформаторы, к активным — диоды, транзисторы, тиристоры и др. Интегральные микросхемы содержат десятки и сотни пассивных и активных элементов. Показатель степени сложности микросхемы характеризуется числом содержащихся в ней элементов и компонентов.

Большие интегральные схемы также изготавливают в объеме одного кристалла. Они характеризуются большей сложностью и служат в качестве отдельных

блоков электронной аппаратуры, например запоминающего устройства, процессора и т. д.

Степень и характер интеграции элементов микросхем определяются прежде всего уровнем технологии.

Карточка № 21.1 (231)
Общие сведения

Какие направления характерны для совершенствования элементной базы электроники?	Повышение надежности	1
	Снижение потребляемой мощности	31
	Миниатюризация	61
	Все перечисленные	91
Какие особенности характерны для ИМС и БИС?	Миниатюрность	121
	Сокращение внутренних соединительных линий	151
	Комплексное изготовление (технология)	2
	Все перечисленные	32
Какой элемент электронных схем является активным?	Конденсатор	92
	Трансформатор	122
	Диод	152
	Активное сопротивление	62
Можно ли в кристалле объемом 1 мм ² разместить схему, содержащую 1000 резисторов, конденсаторов, диодов, транзисторов и других элементов?	Можно	3
	Нельзя	33
Какое количество генераторов и усилителей электрических колебаний может быть размещено в объеме одного полупроводникового кристалла?	1	63
	10	93
	100	123
	Любое из указанных выше	153

§ 21.2. ГИБРИДНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

Технология гибридных интегральных микросхем базируется на использовании толстых и тонких пленок, нанесенных на керамическое основание. Пленки изготавливаются из специальных паст.

Пассивные элементы формируются в пленке, а активные в виде миниатюрных бескорпусных полупроводниковых приборов размещаются над пленкой и соединяются с пленочными элементами продольными выводами (рис. 21.1).

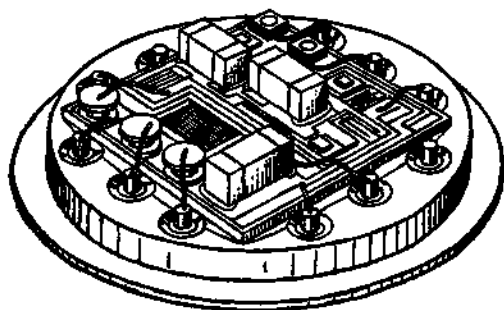


Рис. 21.1. Гибридная микросхема

Навесными могут изготавливаться также и некоторые пассивные элементы: конденсаторы относительно большой емкости, индуктивные катушки, трансформаторы.

При создании схемы на круглую или квадратную подложку по специальной технологии наносят различные пленки, из которых формируются резисторы, конденсаторы, соединительные линии и контактные площадки.

Навесные элементы располагают на подложке или над подложкой. Иногда их помещают в углублениях подложки или в сквозных окнах и заливают эпоксидной смолой. Размеры навесных элементов выбирают возможно минимальными. Диоды и транзисторы обычно изготавливают в виде кристаллов объемом около 1 мм^3 .

Важную роль в обеспечении надежности микросхемы и снижения ее собственных шумов играет ка-

чество контактных соединений. Для получения хорошего контакта широко применяют лазерную технику, термокомпрессию, ультразвуковую сварку.

Контакты навесных элементов изготавливают в виде тонких проволок, балок или шариков. Для проволочных контактов (рис. 21.2) применяют золотую или позолоченную медную проволоку диаметром в несколько



Рис. 21.2. Проволочный монтаж кристаллов

десятков микронметров. Балочные контакты имеют вид плоских консолей длиной 100 мкм . Жесткие шариковые и балочные контакты удобны при автоматизации процесса сборки и пайки схемы.

Наибольшие технологические сложности возникают при изготовлении индуктивных катушек и трансформаторов. Поэтому микросхемы стремятся проектировать так, чтобы они содержали минимум таких элементов. В случае необходимости микроиндуктивности могут быть сформированы из пленки, а элементы с относительно повышенной индуктивностью — в виде навесных катушек. Таким катушкам часто придают плоскую форму, а сердечники их делают разомкнутыми.

Материалом для сердечника обычно служат ферриты и карбонильное железо. Добротность пленочных индуктивных катушек невелика. У навесных катушек она достигает десятков единиц.

Современная технология гибридных интегральных микросхем позволяет получить плотность пассивных и активных элементов порядка 100 см^{-2} , при этом более высокую плотность имеют тонкопленочные схемы.

Собранную гибридную микросхему заключают в металлический или пластмассовый корпус, изолирующий ее от внешних воздействий (влаги, пыли и др.). Размеры корпуса составляют единицы или десятки миллиметров. Контактные выводы размещают в определенном порядке, а корпус нередко имеет срез или выступ для обеспечения ориентировки при монтаже.

Карточка № 21.2 (298)
Гибридные интегральные микросхемы

Какие микросхемы называются гибридными?	В которых используются тонкие и толстые пленки	4
	В которых используются пассивные и активные элементы	34
	В которых используются пленочные и навесные элементы	64
Какие элементы целесообразно делать навесными?	Транзисторы и индуктивные катушки	94
	Резисторы и конденсаторы	124
	Резисторы и трансформаторы	154
Какой вид сварки применяют для соединения навесных и пленочных элементов?	Ультразвуковая	5
	Лазерным лучом	35
	Термокомпрессионная	65
	Все перечисленные	95
Какие контакты применяют для соединения элементов гибридных микросхем?	Проволочные	125
	Шариковые	155
	Балочные	6
	Все перечисленные	36
Какие пленки применяют для изготовления гибридных микросхем?	Диэлектрические	66
	Проводящие	96
	Резистивные	126
	Все перечисленные	7

§ 21.3. ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

Толстыми принято называть пленки, толщина которых превышает 1 мкм. Чаще всего используют пленки толщиной в несколько десятков микрон. Иногда толщина пленки достигает 150—200 мкм.

Основанием толстопленочной схемы служит отполированная пластинка из специального стекла, кварца или керамики. На эту подложку методом трафаретной печати наносят слой пасты, состав которой зависит от характера изготавливаемых элементов.



Рис. 21.3. Нанесение пасты на подложку:
1 — паста; 2 — трафарет; 3 — подложка

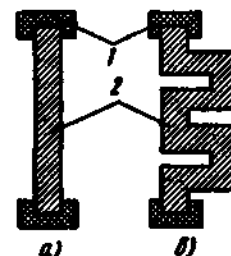


Рис. 21.4. Пленочные резисторы с малым (а) и большим (б) сопротивлениями:
1 — контактная площадка; 2 — резистор

После снятия трафарета (маски) подложку с рисунком из нанесенной пасты подвергают термической обработке при температуре порядка 1000 К. В результате образуется фигурная пленка, толщина которой зависит от толщины фольги, из которой изготовлен трафарет. На полученный рисунок накладывают другой трафарет и с помощью пасты другого состава наносят новую пленку. При изготовлении сложных схем эти процессы могут повторяться многократно. Процесс нанесения пасты на подложку показан на рис. 21.3. Для обеспечения необходимой точности и воспроизводимости параметров схемы, а также повышения производительности труда этот процесс автоматизирован. Толщина подложки 1 мм, ширина и длина — несколько сантиметров.

Для изготовления проводников и контактных площадок толстопленочных схем применяют пасту, содержащую порошки металлов с высокой проводимостью.

мостью, устойчивых к химическим и температурным воздействиям (платина, золото, серебро, палладий), и стекло, которое в составе пасты обеспечивает прочное сцепление пленки с подложкой после обжига. Ширина толсто пленочных проводников, получаемых этой технологией, от 100 мкм до 0,5 мм.

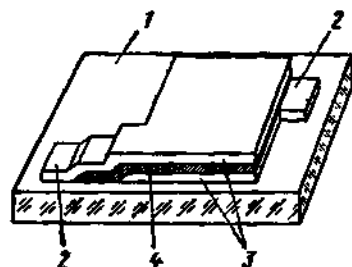


Рис. 21.5. Пленочный конденсатор:
1 — подложка; 2 — контактная площадка; 3 — проводящий слой, 4 — диэлектрический слой

Толсто пленочные резисторы изготавливают из смеси порошков серебра и палладия со стеклом. Чем больше содержание стекла, тем выше сопротивление пасты. На значение сопротивления влияют также размеры и форма резистора (рис. 21.4). Сопротивление изготовленных резисторов может существенно отличаться от номинального значения, поэтому после контроля его «доводят» до требуемого, уменьшая толщину пленки с помощью абразивов или делая надрезы лазерным лучом.

Толсто пленочные конденсаторы (рис. 21.5) получают последовательным формированием пленок из проводниковой и диэлектрической паст. Для диэлектрической пасты используют порошки титаната бария и сегнетокерамических материалов с высоким значением диэлектрической проницаемости.

Конденсаторы повышенной емкости, а также индуктивные катушки и трансформаторы в толсто пленочных схемах обычно делают навесными.

Толсто пленочные схемы имеют ряд преимуществ, обеспечивающих им широкое применение прежде всего в устройствах, требующих большой точности и стабильности параметров пассивных элементов. Они надежны и сравнительно недороги, а использование навесных элементов позволяет уменьшить число пересечений в плоскости и количество выходных контактов.

Сформированную схему помещают в герметичный корпус или заливают компаундом.

Карточка № 21.3 (302)
Толсто пленочные микросхемы

Укажите: а) толщину подложки; б) толщину пленки толсто пленочных микросхем	а) 1 мм; б) от 0,001 до 0,2 мм	37
	а) 1 мкм; б) свыше 1 мкм	67
	а) 1 мм; б) 150—200 мкм	97
Из какого материала изготавливаются подложки пленочных микросхем?	Керамика	127
	Кварц	8
	Стекло	38
	Из всех перечисленных	98
Какие компоненты входят в пасты, используемые для нанесения проводящих и резистивных толстых пленок?	Смесь порошков драгоценных металлов со стеклом	128
	Порошок титаната бария	9
	Порошок из сегнетокерамики	39
Каким образом обеспечивается высокая точность параметров элементов толсто пленочных схем?	Подбором состава пасты	69
	Изменением размеров	99
	Термической обработкой при 1000 К	129
Что не характерно для толсто пленочных микросхем?	Надежность	68
	Экономичность	10
	Стабильность параметров	70
	Отсутствие навесных элементов	40

§ 21.4. ТОНКО ПЛЕНОЧНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

К тонким относят пленки, толщина которых составляет десятые и сотые доли микрометра.

При изготовлении ИМС по тонко пленочной технологии для токопроводящих линий, с помощью которых

соединяются пленочные элементы микросхемы, и контактных площадок для подсоединения навесных элементов применяют различные металлы, имеющие высокую электропроводность: алюминий, медь, серебро, золото, никель, хром, олово, их соли и сплавы. Металлы должны быть устойчивы к химическим воздействиям и иметь хорошую адгезию к подложке.

Для изготовления обкладок конденсаторов чаще всего применяют алюминий и медь; индуктивные элементы (рис. 21.6) изготавливают из никеля, серебра или хрома.



Рис. 21.6. Пленочные индуктивные катушки

Для получения резистивных элементов используют тантал, титан, никель, хром и их сплавы, а также углерод и кремний.

Изолирующие диэлектрические пленки получают окислением внешних слоев металлических пленок или нанесением покрытий из диэлектрических материалов.

Для нанесения тонких пленок на подложку применяют различные методы: вакуумное напыление, катодное распыление, химическое осаждение и электролитическое анодирование.

Метод вакуумного напыления иллюстрируется рис. 21.7. Материал для изготовления пленки помещают в тугоплавкий тигель из платины или вольфрама. Эту систему плотно закрывают колпаком, давление под которым понижают до 10^{-3} Па, затем тигель нагревают до температуры примерно 1000 К. Материал начинает интенсивно испаряться, осаждаясь на более холодной подложке. Осажденная пленка должна быть однородной и плотно соединяться с подложкой, для чего ее поверхность должна быть хорошо очищена от посторонних примесей. Для этого подложку подогревают. Между испарителем и подлож-

кой устанавливают экран, который поглощает молекулы, не попадающие на нее. Осаждающиеся на экране дорогостоящие металлы в дальнейшем смывают и используют вторично.

Для создания композитных пленок в камере размещают несколько испарителей.

Если в рассмотренной схеме нагрев испарителей осуществляется электрическим током, то для создания пленок из тугоплавких материалов, например вольфрама, титана, молибдена, нагрев производят электронным лучом, направленным непосредственно на испаряющуюся поверхность.

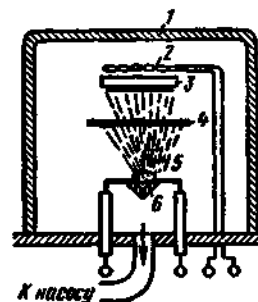


Рис. 21.7. Схема вакуумного напыления:
1 — колпак; 2 — подогреватель подложки; 3 — подложка; 4 — экран; 5 — испаряющий материал; 6 — подогреватель

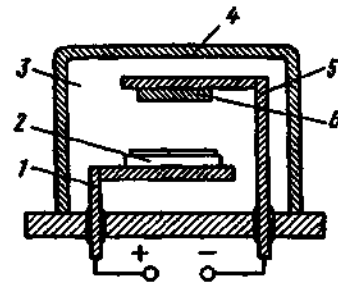


Рис. 21.8. Схема катодного распыления:
1 — анод; 2 — подложка; 3 — объем, заполненный газом; 4 — колпак; 5 — катод; 6 — распыляющийся материал

Вакуумное напыление можно использовать во всех случаях, однако испарение материалов с высокой температурой кипения — достаточно трудная задача. Поэтому широкое применение находит также метод катодного распыления (рис. 21.8).

При катодном распылении рабочий объем камеры заполняют инертным газом при давлении около 1 Па, а к электродам подводят постоянное напряжение в несколько тысяч вольт. Газ в камере ионизируется, и положительные ионы газа, устремляясь к катоду, выбивают из распыляемого материала молекулы, которые осаждаются на подложке, образуя пленку. Так как разгон ионов осуществляется электрическим полем, процесс распыления может идти

при относительно низких температурах распыляемого материала. Метод катодного распыления применяют для создания пленок из таких материалов, как тантал, титан, молибден, вольфрам, платина.

При химическом осаждении в камеру, где помещается подложка, по различным трубопроводам подают газообразные реагенты. В результате химической реакции выделяются молекулы металла или его солей, которые и осаждаются на подложке. Ненужные продукты реакции откачиваются.

Электролитическое анодирование производят в жидком электролите, куда помещают подложку и материал пленки, растворяющийся в электролите. Подложку (анод) подсоединяют к плюсу источника постоянного тока, а материал пленки (катод) — к минусу.

Так как при изготовлении микросхемы нанесение пленок на подложку производят многократно, для получения определенной строго рассчитанной конфигурации каждого слоя применяют фотолитографию.

Карточка № 21.4 (131)
Тонкопленочные микросхемы

Какие материалы применяют для изготовления тонких пленок?	Алюминий, медь, серебро, золото	100
	Тантал, титан, никель, углерод	130
	Вольфрам, молибден	11
	Все перечисленные	41
Какой метод не используется при изготовлении тонких пленок для микросхем?	Вакуумное напыление	71
	Химическое осаждение	101
	Электролитическое осаждение	131
	Трафаретная печать	12
Каким образом защищают подложку от загрязнения при вакуумном напылении тонкой пленки?	Глубоким вакуумом	42
	Экраном	72
	Подогревом	102

Продолжение

В каких случаях целесообразно применять метод катодного распыления?	При создании проводящих пленок	132
	При создании резистивных пленок	13
	При создании тугоплавких пленок	43
Как образуются молекулы для формирования пленки при методе химического осаждения?	Выбиваются электронным лучом	73
	Выбиваются положительными ионами	103
	Выделяются при химической реакции газов	133

§ 21.5. ФОТОЛИТОГРАФИЯ

Процесс фотолитографии начинается с изготовления негатива. На двухслойной пленке с прозрачной основой и зачерненной поверхностью вычерчивают необходимый рисунок. Делается это с помощью ручного или автоматического координатографа, который снимает непрозрачный слой в местах, где должны быть «белые» контуры. С негатива размером 1 м² делают уменьшенный отпечаток с помощью специальной камеры. Обычно уменьшение производится в две-три ступени, пока отпечаток не достигнет нужных размеров. Окончательный отпечаток делают на фотопластинке и называют фотошаблоном. Стеклопленочная основа фотошаблона должна быть идеально чистой и плоскопараллельной.

Следующий этап фотолитографии состоит в нанесении фоторезиста на подложку микросхемы или на напыленную ранее пленку. Фоторезистами называют вещества (обычно эмульсии на основе высокомолекулярных соединений), имеющие свойство после облучения менять способность к растворению в специально подобранных средах.

Фоторезисты делятся на негативные и позитивные. В первых под действием облучения образуются нерастворимые, а во вторых, наоборот, растворимые участки. Фоторезист можно наносить окунанием подложки в эмульсию, с помощью пульверизатора

или центрифугированием. В последнем случае получают наиболее однородную и прочную пленку фоторезиста.

При центрифугировании на подложку наносят каплю фоторезиста и помешают в центрифугу. Под действием центробежной силы фоторезист равномерно и плотно (без пузырьков и щелей) распределяется по всей поверхности.

Нанесенный фоторезист просушивают сначала при температуре окружающей среды, а затем в сушильном шкафу при 400 К.

После этого на поверхность, покрытую пленкой фоторезиста, накладывают фотошаблон и экспонируют в ультрафиолетовом свете. В пленке из негативного фоторезиста при облучении образуются нерастворимые участки, которые после проявления остаются на подложке и экранируют ее от напыления. В позитивном фоторезисте облучение формирует растворимые участки, на месте которых после проявления образуются окна. Через эти окна напыляемый материал достигает подложки и оседает на ней.

После напыления проводящей или резистивной пленки фоторезист смывают и на поверхности остаются необходимые элементы тонкопленочной схемы.

Для получения микросхем высокого качества последовательно применяют два вида фоторезистов. Это позволяет получить хорошее совмещение пассивных элементов схемы, контактных площадок и токопроводящих дорожек.

Карточка № 21.5 (245)
Фотолинтография

Что такое фотошаблон?	Пленка с рисунком, вычерченным с помощью координатографа	14
	Отпечаток на стеклянной фотопластинке	44
Какой метод не применяется для нанесения негативного фоторезиста?	Вакуумное напыление	74
	Окунание в фоторезистивную эмульсию	104
	Опыление обложки из пульверизатора	134
	Центрифугирование	15

Продолжение

Какой фоторезист надо применить, чтобы сохранить участки фоторезистивной пленки под затененными участками фотошаблона?	Позитивный	45
	Негативный	75
	Можно тот и другой	105
Когда смывают фоторезист?	После облучения	135
	После проявления	16
	После напыления тонкой пленки	46
Какие элементы микросхемы требуют строгого совмещения друг с другом?	Резисторы и контактные проводочки	76
	Резисторы и конденсаторы	106
	Контактные площадки и токопроводящие дорожки	136

§ 21.6. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

Полупроводниковые интегральные микросхемы изготавливают на одном кристалле введением легирующих примесей в определенные микрообласти. Современные технологии позволяют создавать в приповерхностном объеме кристалла весь набор активных и пассивных элементов, а также межэлементные соединения в соответствии с топологией схемы.

В качестве активных элементов ИМС наряду с биполярными широко применяются транзисторы типа МДП. МДП-транзисторы проще в изготовлении, дают больший процент выхода годных изделий, позволяют получить более высокую плотность размещения приборов, потребляют меньшую мощность, дешевле биполярных.

Однако у микросхем на основе МДП-транзисторов есть существенный недостаток — сравнительно высокая инерционность. Поэтому там, где требуется вы-

сокое быстродействие, в частности в электронных вычислительных машинах, предпочтение отдают ИМС на биполярных транзисторах.

Один из важных критериев оценки ИМС, характеризующий уровень интеграции,— это отношение числа *p-n-p*-переходов к числу внешних выводов (вентиль/контакт). Чем больше это отношение и чем меньше потребляемая мощность (лучше условия теплоотдачи), тем надежнее электронные блоки на базе микросхем (сравнивать следует блоки одинаковой функциональной сложности). У простых логических схем это отношение меньше единицы. С повышением сложности ИМС отношение вентиль/контакт достигает десяти и более.

Основой полупроводниковых интегральных микросхем чаще всего служит кремний. На одной пластинке кремния диаметром 75 мм и толщиной 0,2 мм можно сформировать до 10 000 полупроводниковых ИМС.

Широкое применение кремния для производства полупроводниковых ИМС обусловлено прежде всего способностью кремния сохранять полупроводниковые свойства при относительно высоких температурах (до 400 К).

Существенным является и то, что при нагревании пластины кремния в кислородной среде на ее поверхности образуется пленка SiO_2 . Она защищает кристалл и сформированные в нем миниобласти с заданным типом электропроводности от загрязнений, из нее формируется маска для локальной диффузии примесей, она может выполнять роль диэлектрика в схеме.

ИМС в отполированной пластине кремния изготовляют групповым методом: тысячи одинаковых схем формируют одновременно. Затем в пластине алмазным резцом делают насечки по границам схем и разламывают ее на кристаллики. Полученные заготовки снабжают внешними выводами, герметизируют, помещают в корпуса и оформляют в виде серийных электронных приборов.

Групповая обработка обеспечивает высокую стандартизацию и экономичность производства.

Возможность серийного производства ИМС была подготовлена созданием и совершенствованием планарно-эпитаксиальной технологии.

Карточка № 21.6 (210)
Полупроводниковые интегральные микросхемы

Какие микросхемы могут быть изготовлены без навесных элементов?	Тонкопленочные	17
	Толстопленочные	47
	Полупроводниковые	77
Какие транзисторы не применяются в полупроводниковых интегральных микросхемах?	Биполярные	107
	Полевые с затвором в виде <i>p-n</i> -перехода	137
	Полевые с изолированным затвором	18
Чем объясняется применение в качестве основы микросхем кремния, а не германия?	Свойствами пленки из диоксида кремния	48
	Работоспособностью кремния при высоких температурах	78
	Тем и другим	108
Какие функции выполняет пленка диоксида кремния в полупроводниковых микросхемах?	Защита микрообласти от загрязнений	138
	Служит для создания масок при введении легирующих примесей в строго определенные микрообласти	19
	Изолирует элементы микросхемы	49
	Все перечисленные	79
В полированной пластине кремния диаметром 75 мм и толщиной 0,2 мм сформировано 4000 одинаковых микросхем. Укажите примерные размеры одной микросхемы	$1 \times 1 \times 0,2$ мм	109
	$0,1 \times 0,1 \times 0,2$ мм	139
	$2 \times 2 \times 0,2$ мм	20

§ 21.7. ПЛАНАРНО-ЭПИТАКСИАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИМС

Процесс осаждения молекул вещества на монокристаллическую пластину (подложку) с образованием пленки, повторяющей ее структуру, называют эпитаксией.

Процесс эпитаксии может быть прямым и не-

прямым. При прямом процессе полупроводниковый материал распыляют и его атомы осаждаются на подложке. В непрямом процессе распыляют химические соединения полупроводникового материала, молекулы которого диссоциируют, и ионы полупроводника оседают на подложке, повторяя ее кристаллическую структуру.

В практике распространены два метода создания кремниевого эпитаксиального слоя: восстановление кремния из его тетрахлорида водородом и термическое разложение соединений кремния (пиролиз).

Водородное восстановление тетрахлорида кремния осуществляют при температуре 1500 К по следующей реакции: $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + 4\text{HCl}$. Этот метод легко управляем и дает возможность получить эпитаксиальный слой с заданными параметрами.

В процессе наращивания эпитаксиальный слой кремния можно легировать донорными и акцепторными примесями. При этом в кварцевый реактор, где размещена монокристаллическая подложка, вместе с парами SiCl_4 и молекулярным H_2 подают газообразные соединения водорода с мышьяком (AsH_3), фосфором (PH_3) или бором (B_2H_6). Подложки в кварцевом реакторе крепят на графитовом основании. Нагрев осуществляют индукционными токами высокой частоты.

Процесс термического разложения соединений кремния протекает при температурах на 150—200 К меньших, чем восстановительный процесс. В реакции пиролиза $\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$ выделяется атомарный кремний, оседающий на монокристаллической подложке.

Для повышения качества эпитаксиальных слоев кремния применяют комбинацию методов восстановления и пиролиза.

Различают однослойные и многослойные эпитаксиальные структуры кремния. Однослойные структуры диаметром 25—40 мм представляют собой кремниевую монокристаллическую пластину толщиной 0,2 мм, покрытую эпитаксиальной кремниевой пленкой толщиной от 8 до 15 мкм. У многослойных структур пленка наращивается с двух сторон пластины.

Наша промышленность изготавливает также гетероэпитаксиальные структуры, в которых кремниевый слой наращивается на монокристаллическую сапфировую подложку.

Применение эпитаксии в технологии интегральных схем более чем в десять раз увеличило выход годной продукции, значительно сократило время технологического процесса и улучшило экономические показатели.

(Ответьте на карт. № 21.7а)

Карточка № 21.7а (196)
Планарно-эпитаксиальная технология изготовления ИМС

Какая пленка называется эпитаксиальной?	Полученная осаждением молекул	50
	Полученная осаждением мелких кристаллов	80
	Повторяющая структуру монокристаллической подложки	110
	Все перечисленные	140
Какой метод основан на непрямом процессе эпитаксии?	Восстановление кремния водородом из тетрахлорида кремния	21
	Пиролиз	51
	Тот и другой	81
Можно ли нарастить эпитаксиальный слой с заданным типом проводимости?	Можно	111
	Нельзя	141
Толщина кремниевой монокристаллической пластины 0,2 мм, толщина эпитаксиального слоя 15 мкм. Укажите толщину многослойной структуры	215 мкм	22
	230 мкм	52
	430 мкм	82
Какую подложку не используют для получения эпитаксиальной кремниевой пленки?	Кремниевую	112
	Германиевую	142
	Сапфировую	23

Планарную технологию изготовления полупроводниковых приборов начали внедрять в промышленное производство в 60-х годах. Полупроводниковые микросхемы, изготавливаемые по этой технологии, формируются в тонком приповерхностном слое кристалла, образуя плоские конфигурации.

Основу планарной технологии составляют уже известные процессы:

1) окисление кремниевой подложки с целью защиты ее поверхности пленкой двуокиси кремния (иногда в качестве защитной пленки используют другой диэлектрик, например нитрид кремния Si_3N_4);

2) превращение защитной пленки в маску заданной конфигурации с помощью фотолитографии;

3) диффузия легирующих примесей в верхний слой подложки через окна в маске.

Планарная технология позволяет получать в подложке или в эпитаксиальном слое легированные области, измеряемые единицами микрометров.

Изготовление полупроводниковой интегральной микросхемы начинается с формирования в подложке изолированных областей («карманов»). Существуют различные способы получения и изоляции таких областей. Рассмотрим один, наиболее распространенный, способ — диффузию примеси в эпитаксиальный слой с последующей изоляцией кармана с помощью p - n -перехода (рис. 21.9).

Технологический процесс состоит из десяти этапов:

1) на монокристаллическую кремниевую пластинку p -типа толщиной 0,2—0,4 мм наращивают эпитаксиальный слой кремния n -типа толщиной 15—20 мкм;

2) при нагревании в кислородной среде на поверхности эпитаксиального слоя образуется пленка диоксида кремния SiO_2 ;

3) в центрифуге или с помощью пульверизатора на поверхность оксидной пленки наносят фоторезист;

4) на высушенную многослойную пластину накладывают стеклянный фотошаблон с заданным микрорисунком и осуществляют экспозицию фоторезиста в ультрафиолетовом свете;

5) фотошаблон снима-

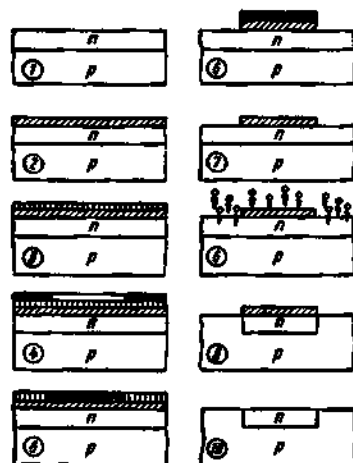


Рис. 21.9. Этапы процесса образования изолированной области n -типа

ют; засвеченный фоторезист имеет измененную структуру;

6) специально подобранным растворителем засвеченные участки фоторезиста и расположенную под ними пленку диоксида кремния растворяют, обнажая эпитаксиальный слой;

7) растворителем, не действующим на пленку диоксида кремния, смываются остатки фоторезиста;

8) в газовой среде осуществляют диффузию акцепторной примеси в открытые участки эпитаксиального слоя;

9) под действием акцепторной примеси обнаженные участки эпитаксиального слоя изменяют тип электропроводности (n -тип на p -тип); участки, защищенные пленкой диоксида, сохранили электропроводность n -типа;

10) смывают защитную пленку диоксида кремния.

Пластина со сформированными «карманами» поступает на последующие операции.

(Ответьте на карт. № 21.7 б.)

Карточка № 21.7 б (231)

Планарно-эпитаксиальная технология изготовления ИМС

Каким образом получают пленку диоксида кремния при изготовлении полупроводниковой микросхемы?	Окислением монокристаллической кремниевой пластины	53
	Окислением эпитаксиального слоя	83
	Наносят на эпитаксиальный слой с помощью пульверизатора	113
Каким образом наносят фоторезист?	Окислением эпитаксиального слоя	143
	С помощью пульверизатора или центрифуги	24
	Через фотошаблон	54
Что остается на поверхности эпитаксиального слоя после удаления остатков фоторезиста?	Рисунок микросхемы из пленки диоксида кремния	84
	Отдельные области эпитаксиального слоя с электропроводностью n -типа («карманы»)	114

	Отдельные области эпитаксиального слоя с электропроводностью p -типа	144
Каким образом получают «карманы»?	Диффузией акцепторной примеси в эпитаксиальный слой n -типа через окна в маске	25
	Диффузией донорной примеси в эпитаксиальный слой p -типа через окна в маске	55
Когда смывают защитную пленку диоксида кремния?	По окончании изготовления микросхемы	86
	Перед передачей пластины с «карманами» на последующие операции	115

§ 21.8. ЭЛЕМЕНТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСХЕМ И ИХ СОЕДИНЕНИЕ

Универсальным элементом монокристаллической микросхемы служит p - n -переход, являющийся слоем, изолирующим микрообласти, сформированные в кристалле.

Этот переход может выполнять роль вентиля (диода). Структуры из нескольких p - n -переходов служат транзисторами, тиристорами и другими активными элементами. Запертый обратным постоянным напряжением p - n -переход выполняет роль конденсатора. Обратное сопротивление p - n -перехода играет роль высокоомного резистора. Для получения резисторов с сопротивлением в сотни килоом используют входные клеммы эмиттерных повторителей, собранных на p - n -переходах. В качестве небольших сопротивлений используют просто участки полупроводникового кристалла (эпитаксиального слоя), от которого сделаны контактные выводы.

Определенные трудности связаны с получением индуктивных катушек, поэтому монокристаллические микросхемы обычно проектируют без них.

Многослойные структуры с несколькими p - n -переходами получают, повторяя процессы, рассмотренные в предыдущем параграфе: окисление, формирование маски, диффузию донорных или акцепторных примесей в микрообласти. Пример многослойной структуры приведен на рис. 21.10.



Рис. 21.10. Многослойная структура с тремя p - n -переходами

Сложные микросхемы требуют многократного снятия и повторного нанесения новой маски методом фотолитографии. Смена масок может осуществляться до полутора десятков раз. При этом важную проблему составляет совмещение масок в соответствии с топологией схемы. На рис. 21.11 приведена часть полупроводниковой микросхемы, представ-

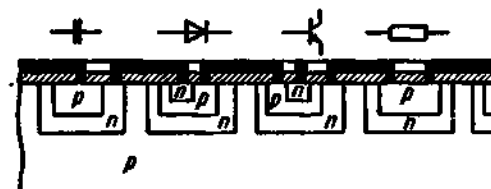


Рис. 21.11. Структура части полупроводниковой ИМС

ляющая собой однокаскадный усилитель на транзисторе.

Сформированную планарную структуру покрывают пленкой оксида кремния, в которой вытраивают окна для напыления алюминиевых или золотых контактов.

Достаточно сложные схемы не удается выполнить без пересечения токопроводящих дорожек. В этих случаях, а также для повышения компактности схемы соединения напыляют в два слоя и более, разделенных изолирующими пленками. Кроме внутризlementных соединений напыляют стандартизованные по размерам контактные площадки для подвода питания, входных и выходных сигналов.

Полностью сформированные и испытанные на отсутствие брака интегральные микросхемы крепят на керамическом основании корпуса, имеющего внешние выводы. Контактные площадки соединяют с внеш-

ними выводами с помощью тончайших золотых проволочек (рис. 21.12). Для повышения прочности соединения и уменьшения переходного сопротивления между контактной площадкой и проволочкой применяют термокомпрессионную (нагрев и давление) или ультразвуковую сварку.

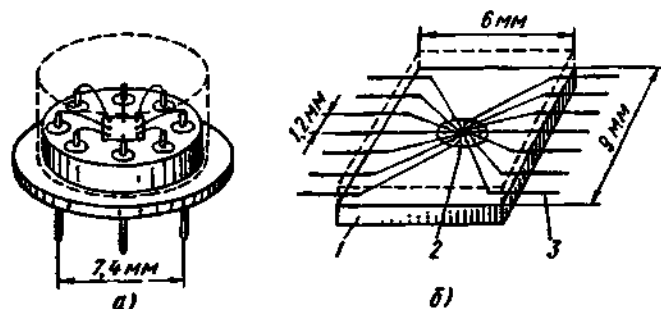


Рис. 21.12. Монтаж интегральных схем:
а — в круглом корпусе; б — в плоском корпусе; 1 — керамика;
2 — контактные площадки; 3 — выводы

После выполнения проволочных соединений схемы герметизируют, заливая компаундами на основе эпоксидных или кремнийорганических смол.

Корпуса интегральных микросхем изготавливают из металлических сплавов, стекла, керамики и различных пластмасс, обладающих механической и электрической прочностью, коррозионной стойкостью и не вызывающих химического загрязнения кристалла микросхемы.

Карточка № 21.8 (145)
Элементы полупроводниковых микросхем и их соединение

Какие элементы микросхемы нельзя получить с помощью р-п-перехода?	Конденсаторы и резисторы	85
	Диоды и транзисторы	145
	Трансформаторы и индуктивные катушки	26
	Все перечисленные	56

Продолжение

Каким образом формируются транзисторы в «карманах»?	Диффузией примесей через повторно сформированные маски	116
	Одновременно с «карманами» с помощью усложненных масок	146
	Тем и другим способом	27
Каким образом элементы микросхемы соединяют между собой?	Напылением золотых или алюминиевых дорожек через окна в маске	57
	Пайкой лазерным лучом	117
	Термокомпрессией	87
	Всеми перечисленными способами	147
С какой целью при изготовлении микросхемы напыляют контактные площадки?	Для подсоединения внешних выводов	28
	Для обеспечения пересечения токопроводящих дорожек	58
Каким образом герметизированную микросхему соединяют с источниками питания и другими внешними устройствами?	С помощью клемм	88
	С помощью тонких проволочных выводов	118

§ 21.9. ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

В основу классификации ИМС могут быть положены различные признаки.

Одним из таких признаков служит технология изготовления. Мы установили, что в зависимости от технологии различают гибридные и полупроводниковые ИМС. В свою очередь, гибридные ИМС делят на толстопленочные и тонкопленочные, а в группе полупроводниковых ИМС выделяют подгруппу совмещенных интегральных микросхем.

Технология изготовления совмещенных ИМС не имеет принципиальных отличий от рассмотренных выше технологий. Название совмещенных эти ИМС получили потому, что в них оптимальным образом

сочетаются достоинства полупроводниковых и пленочных элементов, при этом активные элементы схемы изготавливают в приповерхностном слое полупроводникового кристалла, а пассивные — в тонкой пленке, нанесенной на его поверхность.

Признаком классификации интегральных микросхем является также уровень интеграции. По этому признаку выделяют ИМС с малой степенью интеграции (от 1 до 10 логических элементов)*; со средней степенью интеграции (от 10 до 100 логических элементов); с высокими степенями интеграции или большие интегральные схемы БИС с количеством логических элементов, превышающим 100.

Еще одним классификационным признаком служит назначение ИМС, когда их делят на логические и линейные. Логические ИМС используют в цифровых электронных вычислительных машинах, схемах автоматики и радиоэлектроники, для построения запоминающих устройств и логических блоков, линейные — для построения аналого-цифровых преобразователей, усилителей сигналов, низко- и высокочастотных генераторов.

Маркировка ИМС осуществляется в соответствии с ГОСТом и отображает некоторые особенности приборов. Она включает три элемента. Принадлежность прибора к ИМС обозначают индексом К. Второй элемент определяет технологическую разновидность схемы: цифрами 1, 5, 7 обозначаются полупроводниковые ИМС, цифрами 2, 4, 6, 8 — гибридные. Третий элемент маркировки — двузначное число — номер серии, указывающий функциональную принадлежность микросхемы.

Интегральные микросхемы применяются во всех областях современной техники, где используют полупроводниковые приборы. Малые габариты и массы, большая надежность, высокая стабильность и воспроизводимость параметров, низкий уровень собственных шумов, малое потребление энергии позволяют ИМС успешно конкурировать со схемами, собранными на дискретных элементах.

Особенно велико значение интегральных микросхем для дальнейшего развития вычислительной техники, автоматики, телеизмерительной техники, систем управления технологическими процессами в промышленности и сельском хозяйстве, проводной,

* Один логический элемент содержит до восьми схемных компонентов

радио- и телевизионной связи, всех видов транспорта.

Микроэлектроника позволила расширить теоретические и экспериментальные исследования в космосе, биологии, физике. Она применяется и в автоматах, работающих на Луне и Марсе, и при изучении биотоков в клетках живого организма. Микроэлектроника позволила создать приемник радиопередач, помещающийся в дужке очков, телевизор, встроенный в браслет для ручных часов, карманную вычислительную машину и т. д.

Карточка № 21.9 (187)
Применение интегральных микросхем

Какие микросхемы называют совмещенными?	Построенные на тонких и толстых пленках	148
	Построенные на пленочных и планарно-эпитаксиальных элементах	29
К какой степени интеграции относятся ИМС, содержащие 500 логических элементов?	К малой	59
	К средней	89
	К высокой	119
Как различают ИМС по назначению?	Усилительные и генераторные	149
	Вычислительные и запоминающие	30
	Логические и линейные	60
В маркировке ИМС после буквы К стоит четная цифра. Укажите разновидность микросхемы	Полупроводниковая	90
	Гибридная	120
	Совмещенная	150
В каких областях техники применение ИМС особенно эффективно?	В ракетной и космической технике	156
	В вычислительной технике	157
	В автоматике	158
	Во всех перечисленных	159

ЦИФРОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ. МИКРОПРОЦЕССОРЫ И МИКРОЭВМ

§ 22.1. СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ

В современной вычислительной технике наряду с десятичной широко применяются другие системы счисления. Все эти системы относятся к позиционным, обеспечивающим наиболее экономную запись чисел и формализацию арифметических операций.

Принцип построения всех позиционных систем одинаков: выбирают основание a , для записи первых чисел натурального ряда выбирают $a - 1$ различных символов, например 1, 2, 3, 4, 5, которые называют цифрами, отсутствие единиц того или иного разряда обозначают символом 0, основание системы всегда записывают как 10 , в записи числа указывают, сколько в нем содержится единиц (первый разряд, 10^0), сколько оснований, возведенных в первую степень (второй разряд, 10^1), сколько оснований, возведенных во вторую степень (третий разряд, 10^2), и т. д.

Например, в десятичной системе счисления запись 2095 означает $2 \cdot 10^3 + 0 \cdot 10^2 + 9 \cdot 10^1 + 5 \cdot 10^0$, т. е. число состоит из двух тысяч, девяти десятков и пяти единиц. В шестеричной системе счисления запись 125 означает $1 \cdot 10^2 + 2 \cdot 10^1 + 5 \cdot 10^0$, т. е. число состоит из одной тридцатшестерки, двух шестерок и пяти единиц (10 в шестеричной системе означает шесть).

Возникновение десятичной системы, вероятно, связано с наличием десяти пальцев на руках человека, которые мы и сейчас еще используем для счета (загибая соответствующее их количество). У десятичной системы нет специфических преимуществ, но историческая традиция и привычка, вырабатываемая у каждого человека с детства, делают эту систему практически незаменимой. Поэтому, используя для вычислений другие системы счисления, конечный результат всегда представляют в десятичной системе.

С точки зрения структуры все позиционные системы идентичны, однако некоторые из них имеют определенные преимущества. Так, основание двенадцатеричной системы следует считать более «круглым», чем основание десятичной, так как оно имеет четыре делителя.

Наиболее экономичной по количеству требуемых для записи чисел разрядосимволов является трюичная система. Преимущество восьмеричной системы — ее простая связь с двоичной.

Двоичная система счисления занимает особое положение: это система с наименьшим возможным основанием (для записи чисел требуется всего два символа), выполнение арифметических операций над числами максимально упрощено.

Именно возможность изображать числа с помощью всего двух символов — 1 и 0 — делает эту систему предпочтительной для цифровых электронных вычислительных машин. Числа в двоичной системе могут быть представлены последовательностью импульсов: наличие импульса соответствует единице, его отсутствие — нулю. При этом существенные колебания высоты отдельных импульсов, неизбежные вследствие помех, не приводят к сбою в вычислениях. Важно, чтобы импульс не был потерян полностью.

Карточка №22.1 (205)
Системы счисления

В какой системе счисления нельзя написать 125?	В пятеричной	1
	В шестеричной	21
	В восьмеричной	41
В какой системе счисления запись 10 означает 5 ₁₀ .	В двоичной	61
	В пятеричной	81
	Ни в какой	101
Сколько единиц в десятичной системе означает запись в двоичной системе: $1 \cdot 10^{10} + 0 \cdot 10^1 + 1 \cdot 10^0$?	Три	121
	Четыре	141
	Пять	161
Какое преимущество двоичной системы обеспечивает ей широкое применение в ЦЭВМ?	Экономичность	181
	Минимальное количество символов	201
	Простота перевода в восьмеричную систему	221
Цифры изображаются импульсами разной высоты. Какая система более устойчива к помехам?	Десятичная	241
	Трюичная	261

§ 22.2. ПЕРЕВОД ЧИСЕЛ ИЗ ОДНОЙ СИСТЕМЫ В ДРУГУЮ

В двоичной системе любое число записывается с помощью одной цифры и знака 0, обозначающего разряд, в котором цифра отсутствует. Попробуем записать некоторые числа в двоичной системе счисления, при этом называть их будем в десятичной системе.

0 — первый разряд не содержит единицы: записано «число» 0.

1 — первый разряд содержит единицу: записано число 1.

10 — первый разряд не содержит единицы, второй разряд содержит единицу: записано число 2 (основание системы в первой степени).

11 — записано число 3 (одна двойка + одна единица).

100 — записано число 4 (одна четверка или основание во второй степени).

101 — число 5 (одна четверка + одна единица).

110 — число 6 (одна четверка + одна двойка).

Далее: $111_2 = 7_{10}$, $1000_2 = 8_{10}$, $1001_2 = 9_{10}$, $1010_2 = 10_{10}$, $1011_2 = 11_{10}$ и т. д. Здесь индекс при числе указывает основание системы.

Если в десятичной системе каждая единица разряда слева в десять раз больше единицы разряда, примыкающего справа, то в двоичной системе единица разряда слева в два раза больше единицы разряда справа. Так, в десятичном числе справа налево идут единицы, десятки, сотни и т. д., а в двоичном числе — единицы, двойки, четверки и т. д.

Например, запись в двоичной системе 10011 означает $1 \cdot 10^{100} + 0 \cdot 10^{11} + 0 \cdot 10^{10} + 1 \cdot 10^1 + 1 \cdot 10^0$. В привычной десятичной системе получим $1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 16 + 0 + 0 + 2 + 1 = 19$. Таким образом, $10011_2 = 19_{10}$.

В общем случае, если надо число из двоичной системы перевести в десятичную, то мысленно (или на бумаге) определяем значение единицы каждого разряда, а затем суммируем полученные числа: $11010_2 = 1 \cdot 16 + 1 \cdot 8 + 0 \cdot 4 + 1 \cdot 2 + 0 \cdot 1 = 16 + 8 + 2 = 26_{10}$.

Аналогично поступают при любой системе счисления, например при троичной: $1202_3 = 1 \cdot 27 + 2 \cdot 9 + 0 \cdot 3 + 2 \cdot 1 = 27 + 18 + 2 = 47_{10}$.

Так же просто осуществляется и обратный переход из десятичной системы в двоичную (или любую другую). Для перехода необходимо последовательно разделить десятичное число на основание новой системы. Например, переведем число 19 в двоичную систему: $19 : 2 = 9(1)$, т. е. 19 содержит девять двоек и одну единицу; следовательно, число имеет вид ...1. Девять двоек нельзя записать в одном разряде двоек, поэтому посмотрим, сколько в девяти двойках четверок, для чего девять двоек снова разделим на два: $9 : 2 = 4(1)$, т. е. девять двоек можно представить как четыре четверки и одну двойку, а число — в виде ...11. Четыре четверки нельзя записать в одном разряде, поэтому, продолжая деление, находим количество восьмерок и остаток четверок $4 : 2 = 2(0)$, а число имеет вид ...011. Далее находим, сколько раз по 16 содержится в числе, в остатке получим восьмерки $2 : 2 = 1(0)$. Следовательно, число содержит один раз шестнадцать, не содержит восьмерок и окончательно принимает вид 10011. Таким образом, $19_{10} = 10011_2$.

Аналогично можно перевести число 19 в троичную систему:

$19 : 3 = 6(1)$ — число 19 содержит шесть троек и одну единицу; $6 : 3 = 2(0)$ — шесть троек содержат две девятки и нуль троек. Итак, $19_{10} = 201_3$.

Рассмотрим еще пример: $88_{10} = ?_6$.

$88 : 5 = 17(3)$, $17 : 5 = 3(2)$, т. е. $88_{10} = 323_5$.

Чтобы не впадать каждый раз в изложение уже приведенных рассуждений, перевод формализуют, производя деление в целых числах до нулевого результата и записывая все остатки, указанные в скобках, снизу вверх.

Например,

$$\begin{array}{r} 19 \overline{) 2} \\ (1) \ 9 \overline{) 2} \\ (1) \ 4 \overline{) 2} \\ (0) \ 2 \overline{) 2} \\ (0) \ 1 \overline{) 2} \\ (1) \ 0 \end{array}$$

(еще раз убеждаемся, что $19_{10} = 10011_2$).

Перевод вручную чисел из одной недесятичной системы в другую недесятичную можно производить в два этапа: сначала недесятичное число перевести в десятичное, а затем десятичное в новую систему. ЭВМ

осуществляет такой перевод непосредственно минуя десятичную систему.

Карточка № 22.2 (150)
Перевод чисел из одной системы в другую

Укажите запись двоичного числа 1100_2 в десятичной системе счисления	10	262
	11	2
	12	42
Укажите запись троичного числа 1100_3 в десятичной системе счисления	12	242
	24	62
	36	102
Укажите запись в десятичной системе счисления числа 110_6	10	22
	20	222
	30	82
Укажите запись в двоичной системе счисления десятичного числа 21_{10}	102	142
	10101	202
	100110	182
Укажите запись в троичной системе счисления десятичного числа 21_{10}	210	122
	201	162
	101	3

§ 22.3. АРИФМЕТИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ С ДВОИЧНЫМИ ЧИСЛАМИ

Арифметические операции с двоичными числами предельно просты, о чем свидетельствуют таблицы поразрядного сложения и умножения

$$\begin{array}{ll} 0+0=0, & 0 \times 0=0, \\ 0+1=1, & 0 \times 1=0, \\ 1+1=0 \text{ (единица переходит в старший разряд)}, & 1 \times 1=1 \end{array}$$

Если бы утвердилась двоичная система, не требовалось бы затрачивать время на запоминание таблицы умножения. В качестве примера осуществим сложение двух двоичных чисел:

$$\begin{array}{r} + 1001101 \\ 1101011 \\ \hline 10111000 \end{array}$$

Или в десятичной системе: $77+107=184$.

В машинных операциях с двоичными числами важное значение имеет дополнительный код. Чтобы получить дополнительный код двоичного числа, надо в этом числе заменить 0 на 1, а 1 — на 0 и к полученному числу прибавить 1. Например, если исходное число равно 10010 , то дополнительный код равен $01101+1=01110$.

Для упрощения (а следовательно, повышения надежности) арифметических устройств вычислительных машин предпочитают вычитание числа заменить его сложением в дополнительном коде. Умножение и деление тоже заменяют сложением соответственно в прямом и дополнительном кодах.

Таким образом, все арифметические операции в машине сводятся к одной: сложению двоичных чисел.

В математике разработаны численные методы (алгоритмы) определения с заданной точностью практически всех функций, например трансцендентных ($\ln x \approx 6,3x/\ln^4 x$ и т. д.), и решения всех уравнений (алгебраических, разностных, дифференциальных, линейных и нелинейных), а также их систем.

Эти численные методы сводят решение уравнения к последовательности (иногда очень длинной) арифметических операций над числами, т. е. в конечном счете к сложению двоичных чисел.

Карточка № 22.3 (196)
Арифметические операции с двоичными числами

Укажите результат сложения двоичных чисел 1001 и 11001	11111	263
	100010	4
	10101	43
Укажите результат сложения двоичных чисел 1111 и 111	11111	243
	10110	63
	100000	103

Найдите дополнительный код двоичного числа 0111	1000	23
	1001	223
	1010	83
Для выполнения какой операции нет необходимости в дополнительном коде?	Вычитания	143
	Деления	203
	Умножения	183
Можно ли решение уравнений $729x^{12} + (9x^3y + y^4)^3 - (9x^4 + 3xy^3)^3 - y^{12} = 0$; $(x^4)^3 + (\sqrt{3x^2y + y^4})^3 = (x^4 + \sqrt{3xy^3})^3 + (y^4)^3$ свести к сложению двоичных чисел?	Можно	123
	Нельзя	163

§ 22.4. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

Разнообразие назначений и характеристик вычислительных машин, исключительно высокие темпы их совершенствования и быстрая смена поколений привели к большому разнообразию структурных схем ЭВМ.

Рассмотрим принцип действия ЦЭВМ применительно к ставшей уже классической схеме универсальной вычислительной машины (рис. 22.1), на которой можно выделить семь функциональных блоков.

Арифметическое устройство (АУ) предназначено для выполнения арифметических операций с двоичными числами. Оно может выполнять также ограниченное число логических операций (сравнение, отрицание, инверсия, дизъюнкция, конъюнкция и др.).

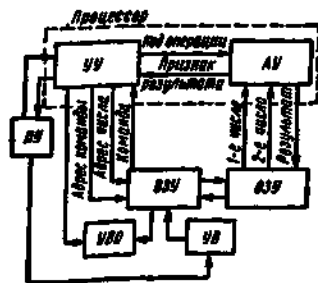


Рис. 22.1. Структурная схема ЦЭВМ

Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) позволяет хранить сравнительно небольшой объем информации, необходимой для производства вычислений на том или ином заранее выделенном этапе решения задачи. Скорость выбора информации из ОЗУ и передачи ее в арифметическое устройство соответствует скорости выполнения

арифметических и логических операций в АУ.

Внешнее запоминающее устройство (ВЗУ) — хранилище основного массива информации, необходимого для решения задачи, а также справочных данных и стандартных программ. Скорость выбора информации из ВЗУ на несколько порядков ниже скорости выбора информации из ОЗУ.

Устройство управления (УУ) определяет порядок и содержание работы отдельных блоков в соответствии с программой, записанной в ВЗУ.

Пульт управления (ПУ) предназначен для ручного ввода в машину командной информации оператора («Пуск», «Запись программы»). Пульт снабжен кнопками для включения и выключения цепей и mnemonicскими схемами для отображения состояния блоков (контроль).

Устройство ввода информации (УВ) предназначено для записи программ и другой информации в ВЗУ. Информация может поступать по каналам связи в виде непрерывных сигналов. Такую информацию устройство ввода кодирует, т. е. преобразует в дискретные сигналы (двоичные числа).

Устройство вывода и отображения информации (УВО) предназначено для выдачи решений в виде буквенно-цифровых текстов или графических построений на экране. УВО может также выдавать сигналы для систем автоматического управления (САУ).

В машинах последних поколений блоки АУ и УУ обычно объединяют. Такой объединенный блок называют процессором. Для хранения и выбора информации кроме ВЗУ и ОЗУ можно установить ряд промежуточных блоков, причем чем больше быстродействие, тем меньше объем памяти блока. Все запоминающие блоки иногда определяют понятием «память» машины, а блоки ввода и вывода информации — «канал связи».

В процессе работы машина последовательно выполняет операции, записанные в программе.

Программа представляет собой последовательность команд, а каждая команда — набор двоичных чисел. Первое число команды — это код операции, которую надо выполнить (например, 001 означает «сложить два числа»), второе число команды — адрес (номер или координаты) ячейки памяти, в ко-

торой записано первое слагаемое, третье число команды — адрес другого слагаемого, четвертое число команды — адрес ячейки памяти, в которую должен быть записан результат сложения (сумма двух двоичных чисел). Таким образом, команда — это последовательность импульсов, соответствующих тем разрядам, в которых записаны единицы: 00101101... 10010. Рассмотренная команда называется трехадресной. В машинах используют и другие типы команд.

Карточка № 22.4 (201)
Структурная схема цифровой электронной
вычислительной машины

Какие операции выполняет арифметическое устройство?	Арифметические	264
	Логические	5
	Арифметические и логические	44
Какое из устройств, ОЗУ или ВЗУ, обеспечивает большую скорость выбора информации?	ОЗУ	244
	ВЗУ	64
	Это зависит от устройства управления	104
Какое из устройств, УУ или ПУ, обеспечивает автоматическое управление работой вычислительной машины?	УУ	24
	ПУ	224
	То и другое	84
Что называется процессором?	Устройство управления, объединенное с арифметическим устройством	144
	ОЗУ, объединенное с ВЗУ	204
	Несколько объединенных блоков электронной вычислительной машины	184
Какие элементы входят в команду?	Код операции	124
	Адреса слагаемых	164
	Адрес результата	25
	Все перечисленные	45

§ 22.5. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЦЭВМ

Программа разрабатывается программистом, записывается условными знаками и переводится на перфорированные карты с помощью ручных (клавишных) перфорационных машин. Затем с перфокарт программу автоматически вводят в память машины (ВЗУ).

После нажатия кнопки «Пуск» на пульте ручного управления машина начинает работать автоматически. Устройство управления передает в ВЗУ адрес первой команды. Записанная по этому адресу команда поступает в устройство управления, которое код операции передает в арифметическое устройство, а адреса чисел последовательно передает в ВЗУ. Найденные по этим адресам числа поступают в ОЗУ и оттуда в арифметическое устройство.

Арифметическое устройство выполняет заданную кодом операцию и направляет результат в ОЗУ, где он хранится некоторое время или передается в ВЗУ по адресу, указанному устройством управления. По получении результата арифметическое устройство вырабатывает двоичное число (признак результата, например 1), которое поступает в устройство управления и добавляется к адресу первой команды. Таким образом формируется адрес второй команды, который устройством управления передается в ВЗУ. Записанная по этому адресу команда передается в УУ и т. д.

По ходу решения задачи встречаются команды «Выдать промежуточный результат», «Переписать очередной блок чисел из ВЗУ в ОЗУ», «Освободить те или иные ячейки ОЗУ» (стереть записанные в них использованные и в дальнейшем ненужные числа) и др.

Перенесение чисел из ВЗУ в ОЗУ и обратно производится параллельно с работой АУ, что обеспечивает независимость скорости вычислений от скорости выборки чисел из ВЗУ.

Получив команды «Вывести результат» и «Стоп», устройство управления запускает печатающие машины и прерывает процесс вычислений.

Так как быстродействие машины очень велико, программа может предусматривать решение сразу нескольких задач. Например, обучающий комплекс

на базе ЦЭВМ способен одновременно вести диалог с десятками и сотнями учащихся. Это возможно потому, что человек реагирует на задания и указания машины несравненно медленнее, чем она обрабатывает и оценивает вводимые в нее ответы.

Самые разнообразные числовые и логические задачи машина решает с помощью ограниченного набора однотипных элементов. Рассмотрим некоторые из них.

Карточка № 22.6 (327)
Принципы действия ЦЭВМ

Где хранится программа, управляющая автоматическим решением задач: $x > y > x > 2^{n-1}$; $(x^2)^3 + (\sqrt{3x^2y + y^2})^2 = (x^2 + \sqrt{3xy^2} + (y^2)^2) \cdot y_2 \approx 3x/2m^2 x?$	В записях математика-программиста	361
	На перфорированных картах	6
	Во внешнем запоминающем устройстве	86
	В устройстве управления	245
Какая информация поступает: а) из УУ в ВЗУ, б) из ВЗУ в УУ?	а) Адрес команды; б) информация	65
	а) Адрес команды; б) команда	105
	а), б) Команда	26
Откуда поступает информация в арифметическое устройство?	Из УУ	225
	Из УУ и ОЗУ	85
	Из ОЗУ и ВЗУ	145
Для чего служит признак результата?	Для формирования следующей команды	205
	Для формирования адреса следующей команды	185
	Для записи чисел в ОЗУ	125
	Для записи результата в ВЗУ	165
Каким образом происходит запуск УВО?	Кнопкой «Пуск»	46
	Устройством управления	66

§ 22.6. ТРИГГЕРЫ

Триггер — это схема с двумя устойчивыми состояниями.

На рис. 22.2 приведена упрощенная схема триггера, собранного на электронных лампах. Так как выходные сигналы таких триггеров имеют вид постоянных по значению напряжений, их называют потенциальными или статическими.

Триггеры обеспечивают классификацию и запоминание импульсов, поступающих на вход. Если на вход поступает положительный импульс, то на одном из выходов устанавливается высокий потенциал, который сохраняется неограниченно долго, до поступления отрицательного импульса. Потенциал на другом выходе в это время равен нулю. При поступлении на вход отрицательного импульса триггер переходит в другое состояние, при котором потенциал на втором выходе возрастает до максимума, а потенциал на первом — уменьшается до нуля.

Широко применяются триггеры, у которых переход из одного состояния в другое вызывается каждым последующим импульсом одной и той же полярности.

Рассмотрим работу потенциального триггера. Предположим, что входной сигнал отсутствует, а характеристики двух половин схемы абсолютно одинаковые. При подключении напряжения отрицательного смещения U_{cm} обе лампы заперты. Если теперь подать анодное напряжение E_a , то на обоих выходах появятся напряжения, равные ($U_{вых1} = U_{вых2} = E_a$), приложенные через сопротивления R_{oc} к сеткам ламп и компенсирующие напряжение U_{cm} . Лампы начнут открываться, через них пройдут анодные токи, создавая падение напряжения на R_{a1} и R_{a2} . Выходные напряжения $U_{вых1} = E_a - R_{a1}I_{a1}$ и $U_{вых2} = E_a - R_{a2}I_{a2}$ уменьшатся, их компенсирующее действие ослабит и U_{cm} частично прикроет обе лампы. В результате установится

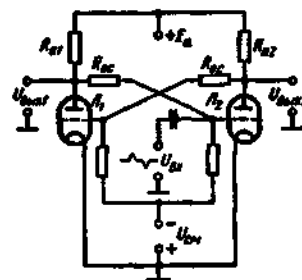


Рис. 22.2. Принципиальная схема потенциального триггера на ламповых триодах

некоторое среднее положение, при котором через лампы проходят равные токи, а равные между собой выходные напряжения меньше анодного напряжения на IR_{a1} и IR_{a2} соответственно.

Такой усредненный режим неустойчив и в действительности существовать не может, так как предположение об абсолютной симметрии схемы нереально. Пусть по случайным причинам $U_{вых 1}$ чуть превысило $U_{вых 2}$. Тогда лампа L_2 откроется чуть больше, ее анодный ток возрастет и напряжение $U_{вых 2}$ уменьшится, так как увеличится падение напряжения на R_{a2} . С уменьшением $U_{вых 2}$ ослабнет его компенсирующее действие на сетку L_1 . Лампа L_1 немного прикроется, что приведет к уменьшению анодного тока I_{a1} и дальнейшему увеличению $U_{вых 1}$. При этом лампа L_2 откроется еще больше и т. д. В конечном счете в результате лавинообразного процесса лампа L_2 откроется полностью ($I_{a2} = I_{max}$), а лампа L_1 полностью закроется ($I_{a1} = 0$). Напряжение $U_{вых 1}$ достигнет максимума $U_{вых 1} = E_a$, а $U_{вых 2}$ — минимума: $U_{вых 2} = E_a - R_{a2}I_{a2}$.

Мы разделили реальный процесс на логически связанные между собой этапы только для уяснения его сущности. На самом деле все изменения токов и напряжений происходят одновременно, и после включения триггер практически мгновенно устанавливается в одно из устойчивых состояний.

Предположим, что после включения анодного E_a и сеточного U_{cm} напряжений триггер установился в состояние, при котором лампа L_1 закрыта, $U_{вых 1}$ минимально, а лампа L_2 открыта и $U_{вых 2}$ минимально. Подадим на вход последовательно разнополярные импульсы. При поступлении импульса отрицательной полярности закроется на короткое время лампа L_2 . Этого достаточно, чтобы состояние триггера изменилось, а лампа L_2 так и осталась закрытой по окончании импульса. Действительно, как только закроется L_2 , напряжение $U_{вых 2}$ возрастет и откроет лампу L_1 . При этом $U_{вых 1}$ резко уменьшится и перестанет блокировать напряжение отрицательного смещения на лампе L_2 , в результате этого лампа L_2 будет закрыта уже не напряжением импульса, а напряжением U_{cm} . До прихода следующего импульса триггер устойчиво поддерживает минимальное $U_{вых 1}$ и максимальное $U_{вых 2}$. Через некоторое время на

вход поступит положительный импульс, который вновь откроет лампу L_2 , и триггер перейдет в первоначальное состояние.

(Ответьте на карт. № 22.6а.)

Карточка № 22.6а (201)

Триггеры

Сколько устойчивых состояний имеет триггер?	3	266
	2	246
	1	106
Почему выходные напряжения равны E_a , если лампы полностью заперты напряжением смещения?	Потому что анодные токи ламп равны нулю	226
	Потому что выходные клеммы подсоединены параллельно к клеммам источника E_a	146
Могут ли лампы L_1 и L_2 открываться одновременно при подаче на их сетки положительного напряжения от источника E_a ?	Могут	206
	Практически не могут	186
Как изменится абсолютное значение отрицательного смещения на сетке L_2 при увеличении тока через L_1 ?	Не изменится	126
	Увеличится	166
	Уменьшится	7
Входной импульс закрыл лампу L_1 . Как изменяется ток лампы L_2 ?	Уменьшится, затем возрастет до максимума	27
	Возрастет до максимума, затем уменьшится	47
	Возрастет до максимума и останется максимальным	67

Полная схема потенциального (статического) триггера изображена на рис. 22.3. Эта схема симметрична, напряжение смещения в ней создается ячейкой $R_{cm}C_{cm}$, а конденсаторы C , блокирующие сопротивления обратной связи, ускоряют переход триггера из одного состояния в другое. Триггер реагирует только на однополярные импульсы. Полярность запускающих импульсов определяется типом транзисторов.

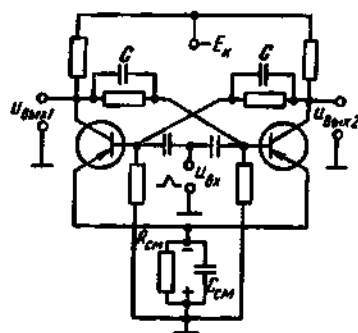


Рис. 22.3. Полная схема потенциального триггера.

Динамические триггеры также имеют два состояния. При этом в одном состоянии напряжение на выходе равно нулю, а в другом — вырабатывается непрерывная последовательность импульсов.

В технике применяются триггеры, собранные на туннельных диодах, тиристорах или магнитных элементах.

Запуск триггера, сопровождаемый его переходом из одного состояния в другое, осуществляется подачей напряжения на базу или коллектор транзистора через специальную схему запуска. Схема запуска содержит элементы (конденсаторы, резисторы, диоды, транзисторы, импульсные трансформаторы), позволяющие сформировать импульс необходимой для запуска амплитуды и длительности.

Различают два вида запуска триггера: раздельный и счетный (общий).

При раздельном запуске импульсы на левый и правый транзисторы подают поочередно. Причем используют две серии импульсов, смещенные во времени таким образом, чтобы максимумы импульсов одной серии приходились на интервалы между импульсами другой. Импульс первой серии, поступивший на правый транзистор триггера, либо подтверждает его нулевое состояние, либо переводит в это состояние (при этом левый транзистор переходит в состояние «1»). Затем импульс второй серии поступает на левый транзистор и переводит его в нулевое состояние (при этом правый транзистор переходит в состояние «1»). Таким образом, триггеры поочередно переводятся из одного состояния в другое. Если при раздельном запуске подавать только одну серию однополярных импульсов, то состояние триггера меняться не будет.

При счетном запуске импульс одной серии одновременно подают на оба транзистора. При этом каждый импульс вызывает запуск триггера и переход его из одного состояния в другое.

В некоторых случаях параллельно одному из вы-

ходов триггера включают сигнальную лампу (неоновую). Тогда по зажиганию лампы можно судить о состоянии триггера, например лампа горит — «1», лампа погасла (напряжение исчезло) — «0».

Карточка № 22.66 (397)

Триггеры

Каким будет абсолютное значение напряжения $U_{вых}$ при подаче на вход триггера импульса положительной полярности?	Максимальным	87
	Минимальным	267
	Равным нулю	247
Чем отличается динамический триггер от статического?	Количеством состояний	227
	Характером выходного сигнала	147
	Полярностью запускающих импульсов	20
Каково назначение схемы запуска триггера?	Сформировать импульсы необходимой амплитуды	187
	Сформировать импульсы необходимой длительности	127
	Сформировать импульсы заданной полярности	167
	Обеспечить все названные функции	8
	Раздельный	28
Какой запуск надо использовать для подсчета количества однополярных импульсов в серии?	Счетный	48
	Тот и другой	68
	Раздельным	83
Как называется вход триггера, изображаемый на схемах раздвоенной стрелкой?	Счетным	107

§ 22.7. ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В формальных рассуждениях существенную роль играет истинность (или ложность) выражений типа «если ... то ...». Например, «если шинный и карбюраторный заводы поставят комплектующие изделия, то

автомобильный завод сможет выполнить план». Но поставка комплектующих деталей зависит от многих условий. Если истинность утверждения о выполнении плана рассматривать как функцию истинности условий, то возникают длинные цепочки логических рассуждений. Анализировать такие цепочки, представленные в словесной форме, трудно. На помощь приходит алгебра логики, основы которой были заложены английским математиком Булем.

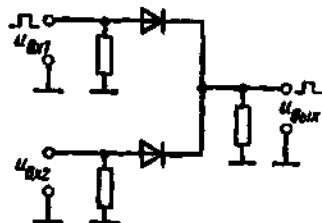


Рис. 22.4. Схема логического сложения

В свою очередь, математические построения Буля могут моделироваться с помощью электрических или электронных схем. Эти схемы, широко применяемые в вычислительной технике, и называются логическими элементами. Рассмотрим некоторые из них.

На рис. 22.4 представлена логическая схема, моделирующая рассуждения, в которые входит слово ИЛИ. Например, «если шинный ИЛИ карбюраторный заводы не поставят комплектующие изделия, то автомобильный завод не сможет выполнить план». Истинность следствия «автомобильный завод не выполнит план» зависит от истинности условий «шинный завод не поставит свои изделия», ИЛИ «карбюраторный завод не поставит свои изделия», ИЛИ (очевидно) «шинный и карбюраторный заводы не поставят изделия».

Из схемы видно, что сигнал на выходе возникает, если сигнал поступит на первый или на второй вход или на оба входа сразу. Сопротивления предназначены для обеспечения согласования триггера с выходами схем, к которым он подсоединен (источниками сигналов), и входом схемы, которой он выдает свой

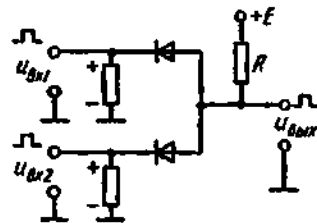


Рис. 22.5. Схема логического умножения

сигнал. Полупроводниковые диоды обеспечивают отсутствие замыкания входов друг на друга.

На рис. 22.5 изображена схема, в которой выходной сигнал появляется только тогда, когда на оба входа одновременно поданы сигналы. Действительно, при отсутствии на входе сигнала ток от источника (+E) проходит через сопротивление R и одно или оба сопротивления, шунтирующие вход. При этом напряжение источника падает на сопротивлении R и напряжение на выходе схемы близко к нулю. Если на входы поступают импульсы, то на входных сопротивлениях появляется падение напряжения определенной полярности. Эти напряжения направлены навстречу ЭДС источника и ток через сопротивление R не проходит, вследствие чего на выходе действует высокое напряжение ($U_{\text{вых}} = E$).

Схему на рис. 22.4 условно изображают квадратом со словом ИЛИ (см. рис. 22.6). Отсутствие сигнала обозначено «0», а наличие — «1». Анализируя состояния схемы при различных комбинациях сигналов на входе, можно составить следующую таблицу:

$$\begin{array}{ll} 0+0=0, & 0+1=1, \\ 1+0=1, & 1+1=1. \end{array}$$

Эта таблица совпадает (кроме последней строки) с таблицей сложения двоичных чисел. Поэтому схему ИЛИ называют схемой логического сложения или схемой дизъюнкции.

Схему на рис. 22.5 обозначают квадратом с буквой И, так как сигнал на выходе появляется тогда, когда есть сигнал на первом и втором входах. Для нее аналогичным образом можно составить таблицу, отражающую соотношение сигналов на входе и выходе:

$$\begin{array}{ll} 0 \times 0 = 0, & 1 \times 0 = 0, \\ 0 \times 1 = 0, & 1 \times 1 = 1. \end{array}$$

Эта таблица совпадает с таблицей умножения двоичных чисел. Поэтому схему И называют схемой логического умножения или схемой конъюнкции.

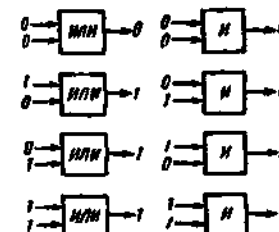


Рис. 22.6. Условное обозначение схем логического сложения ИЛИ и умножения И и комбинации входных и выходных сигналов

В вычислительной технике широко применяют также схему НЕ, у которой сигнал на выходе равен «1», если сигнал на входе равен «0», и, наоборот, на выходе равен «0», если на входе «1». Применяются и некоторые другие логические схемы.

Карточка № 22.7 (282)
Логические элементы

Каково назначение логических схем?	Моделировать логические рассуждения	108
	Моделировать логические высказывания	268
	Отображать зависимость между истинностью высказываний	248
Какую операцию выполняет схема И?	Логическое сложение	228
	Конъюнкцию	148
	Дизъюнкцию	208
Какую операцию выполняет схема ИЛИ?	Логическое умножение	188
	Конъюнкцию	128
	Дизъюнкцию	168
Какие схемы моделируют логические операции: а) $1 \times 1 = 1$; б) $1 + 1 = 1$?	а) ИЛИ, б) И	9
	а) И, б) ИЛИ	29
Работа схемы описывается следующими зависимостями: $x_{вых} = 1$ при $x_{вх1} = 0$; $x_{вых} = 0$ при $x_{вх2} = 1$.	Логического умножения	49
	Логического сложения	69
	Логического отрицания	89
Какая это схема?		

§ 22.8. СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ

Для подсчета и отображения количества импульсов в двоичном коде применяют счетчик, схема которого представлена на рис. 22.7. Каждый триггер отображает один разряд числа, поэтому рассматриваемая схема способна вести счет до максимального четырехразрядного двоичного числа 1111 (пятнадцать).

Перед началом счета на отдельные входы триг-

ггеров подают импульс сброса, который переводит в нулевое состояние триггеры, находящиеся в состоянии «1», и подтверждает нулевое состояние остальных триггеров. Это означает, что в счетчике записано двоичное число 0000.

При поступлении на счетный вход первого импульса правый крайний триггер переходит в состояние «1». Напряжение на его выходе увеличивается от «0» до «1», при этом на счетный вход второго триггера через конденсатор поступает импульс. Однако его полярность такова, что второй триггер не запускается. В схеме записано число 0001. При поступлении на счетный вход схемы второго импульса первый триггер перейдет в состояние «0». При этом напряжение на его выходе уменьшится до нуля и через конденсатор на счетный вход второго триггера поступит импульс запускающей полярности. Второй триггер перейдет в состояние «1», и в схеме будет записано число 0010. Третий импульс на входе схемы переведет ее в состояние 0011, четвертый — в состояние 0100 и т. д. до 1111.

Если к выходам триггеров подключить неоновые лампочки, то двоичное число, записанное в счетчике, можно прочесть. Для того чтобы это число передать в нужный момент времени другим блокам машины, выходы триггеров подключают к схемам логического умножения И. Пока напряжение на клемме «считывание» равно нулю, число хранится в счетчике, так как схемы И сигналы не пропускают. При подаче считывающего импульса схемы И, к которым от «своего» триггера поступает сигнал «1», откроются и записанное число поступит к потребителю.

В рассматриваемой схеме каждый подсчитываемый импульс вызывает последовательное срабатывание триггеров. В частности, если записано число 0111, то пришедший импульс заставит последовательно сработать все четыре триггера, после чего установится число 1000. У многоразрядных (длинных) счетчиков время последовательного срабатывания триггеров оказывается неприемлемо большим.

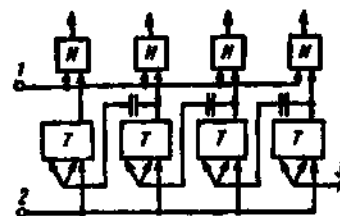


Рис. 22.7. Схема четырехразрядного двоичного счетчика: 1 — считывание; 2 — сброс; 3 — счетный вход

Поэтому, усложнив схему дополнительными логическими элементами и линиями задержки сигналов, изготавливают счетчики со сквозным переносом. В таких счетчиках поступившая единица сразу находит свое место в «свободном» разряде, а все разряды справа практически одновременно переводятся в нулевое положение.

Карточка № 22.8 (287)
Счетчик импульсов

Сколько триггеров необходимо, чтобы отобразить число 1023_{10} ?	24	109
	12	209
	10	269
Какую полярность имеет импульс на выходе первого справа триггера (см. рис. 22.7) при поступлении на счетный вход третьего импульса?	Запускающую	249
	Незапускающую	149
Что произойдет со вторым справа триггером при поступлении на счетный вход пятого импульса?	Из состояния «0» перейдет в состояние «1»	229
	Из состояния «1» перейдет в состояние «0»	189
	Останется в состоянии «1»	129
	Останется в состоянии «0»	169
Зачем нужны схемы И в схеме счетчика?	Чтобы осуществить считывание числа	10
	Чтобы осуществить считывание числа по команде	90
Счетчик находится в состоянии 1011 . Сколько триггеров сработает (изменит свое состояние) при поступлении на счетный вход очередного импульса?	Один	30
	Два	70
	Три	50
	Четыре	110

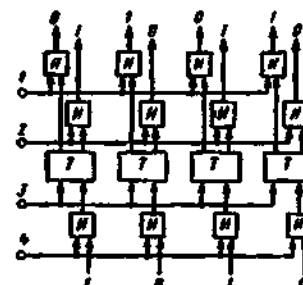
§ 22.9. РЕГИСТРЫ

Регистрами называется схема из логических элементов и триггеров, предназначенная для записи и хранения одного двоичного числа.

При необходимости число может быть считано в прямом или обратном коде. Регистр можно также использовать для сдвига числа влево или вправо на один или несколько разрядов и преобразования числа, разряды которого одновременно поступают каждый по своей шине (параллельный код), в последовательность импульсов в одной шине (последовательный код). В регистре возможно также и обратное преобразование последовательного кода в параллельный.

Схема регистра для записи, хранения и выдачи числа в прямом и обратном параллельном кодах показана на рис. 22.8. Перед записью числа на шину «Сброс» подают импульс и все триггеры устанавли-

Рис. 22.8. Схема регистра для приема, хранения и выдачи двоичных чисел в прямом и обратном кодах (на приемных входах число 1010):
1 — выдача в обратном коде; 2 — выдача в прямом коде; 3 — сброс; 4 — прием



ваются в нулевое положение. Затем импульс подают на шину «Прием» и разряды записываемого числа через схемы И поступают в соответствующие триггеры. Если в разряде числа записана единица (импульс), то триггер устанавливается в единичное, а если в разряде записан 0 (импульс отсутствует), то в нулевое состояние. В таком виде число хранится до поступления импульса сброса.

Если число надо списать в прямом коде, то подают импульс на шину «Выдача в прямом коде». При этом сигналы с правых выходов триггеров через схемы И поступают к потребителю. Число в обратном коде считывается точно так же, но с левых выходов триггеров.

На рис. 22.9 представлена схема сдвигающего регистра. В схему включены *линии задержки D*, назначение которых — замедлять прохождение импульсов.

Пусть в регистре записано число 1010. Подадим на шину «Сдвиг» импульс, устанавливающий все триггеры

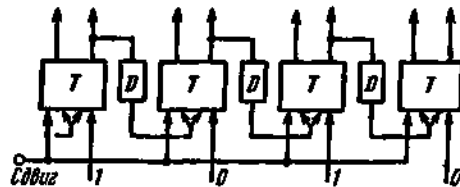


Рис. 22.9. Схема сдвигающего регистра

ггеры в нулевое положение. Те триггеры, которые были в состоянии 0, останутся в этом состоянии, а триггеры, которые были в состоянии 1, будут запущены и перейдут в состояние 0. Некоторое время, определяемое временем задержки импульса в линии *D*, все триггеры находятся в этом состоянии. При запуске триггера на его выходе вырабатывается импульс, который, пройдя линию задержки, поступает на счетный вход правого соседнего триггера и переводит его в состояние «1». В результате в регистре окажется записанным число 0101, сдвинутое относительно исходного на один разряд вправо.

Если на вход «Сдвиг» подать серию сдвигающих импульсов, то записанное число можно полностью «вытеснить» из регистра. При этом каждому сдвигающему импульсу на выходе правого крайнего триггера последовательно соответствуют либо «0», либо «1» в зависимости от значения вытесняемого разряда. Таким образом, на выходе правого крайнего триггера вырабатывается последовательный код записанного в регистре числа.

Несколько усложнив схему логическими элементами, можно получить регистр, сдвигающий число не только вправо, но и влево и выполняющий преобразование не только параллельного кода в последовательный, но и обратное преобразование.

Можно ли с помощью регистра сосчитать количество импульсов?	Можно	210
	Нельзя	270
На шину «Прием» (см. рис. 22.8) подан импульс «1». Какие триггеры (считая справа) срабатывают?	Первый	150
	Первый и второй	230
	Второй и четвертый	190
	Все четыре	250
Можно ли одновременно считать число (см. рис. 22.8) в прямом и обратном кодах?	Можно	130
	Нельзя	170
Сколько импульсов надо подать на шину «Сдвиг», чтобы записанное в регистре число представить в последовательном коде?	Один	11
	Два	91
	Четыре	31
Какие операции может выполнить регистр?	Выдать число в прямом и обратном кодах	71
	Сдвинуть разряды числа влево или вправо	51
	Преобразовать параллельный код в последовательный и обратно	111
	Все перечисленные	131

§ 22.10. СУММАТОР

Основу арифметического устройства составляет сумматор, предназначенный для сложения двух двоичных чисел. Так как сложение чисел осуществляется поразрядно, сумматор строят из одnorазрядных сумматоров ОС-3, имеющих три входа, которые нужны для того, чтобы сложить два одnorазрядных числа и единицу переноса, возникающую в случае сложения двух двоичных единиц: $1+1=10$. В свою очередь, одnorазрядный сумматор на три входа состоит из двух одnorазрядных сумматоров на два входа ОС-2 (рис. 22.10).

ОС-2 собирают из схем логического сложения, умножения и отрицания. Последовательно прослежи-

вая значения сигналов на входе и выходе логических элементов сумматора, можно убедиться, что его работа описывается следующей таблицей:

$$\begin{array}{ll} 0+0=0, & 1+0=1, \\ 0+1=1, & 1+1=0. \end{array}$$

При этом в первых трех случаях на шине «Перенос» (на рис. 22.10 обозначена стрелкой, направленной

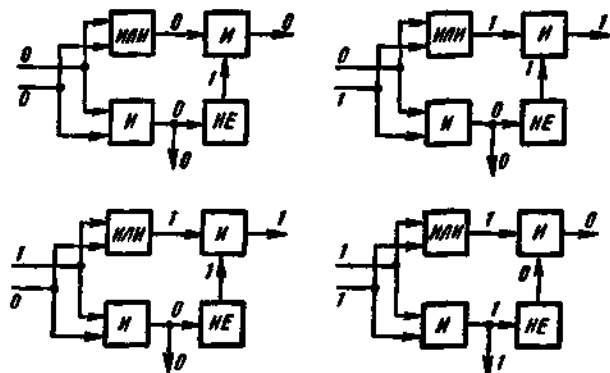


Рис. 22.10. Схема одноразрядного сумматора двоичных чисел на два входа при различных комбинациях сигналов на входе

ной вниз) образуется «0», а в последнем случае — «1». Полученная таблица полностью совпадает с таблицей суммирования одноразрядных двоичных чисел с учетом переноса единицы в старший разряд.

Схема одноразрядного сумматора на три входа ОС-3 (рис. 22.11) состоит из двух ОС-2 и схемы логического сложения ИЛИ. Рассматривая работу сумматора ОС-3 при различных комбинациях сигналов на входе, можно убедиться, что она описывается

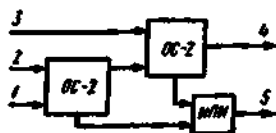


Рис. 22.11. Схема одноразрядного сумматора двоичных чисел на три входа:
1 — второе слагаемое; 2 — первое слагаемое; 3 — перенос из предыдущего разряда; 4 — сумма; 5 — перенос в последующий разряд

таблицей сложения трех одноразрядных двоичных чисел

$$\begin{array}{lll} 0+0+0=0, & 0+1+1=0(1), & 1+1+0=0(1), \\ 0+0+1=1, & 1+0+0=1, & 1+1+1=1(1), \\ 0+1+0=1, & 1+0+1=0(1), & \end{array}$$

где в скобках помечены единицы переноса.

Некоторые возможные комбинации входного сигнала показаны на рис. 22.12.

Одноразрядный сумматор позволяет складывать числа в последовательном коде, когда одноименные

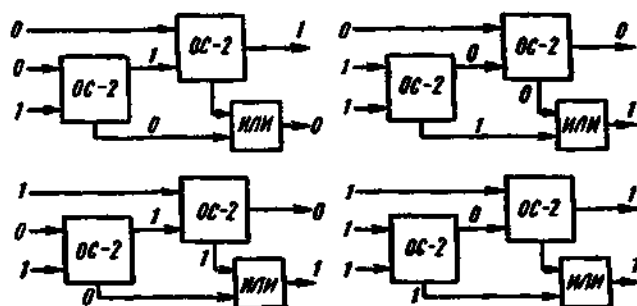


Рис. 22.12. Схема сумматора на три входа при различных комбинациях входных сигналов

разряды двух чисел последовательно подают на вход схемы. Для ускорения операции сложения используют сумматоры, в которых все разряды двух чисел одновременно складываются попарно. Принципиальная схема такого сумматора изображена на рис. 22.13. Одноименные (или сдвинутые) разряды чисел, хранящихся в регистрах слагаемых, по команде устройства управления подают на входы ОС-3. Количество ОС-3 определяет максимальную разрядность чисел. Результаты сложения каждой пары разрядов и единицы переноса (если она образуется) одновременно записываются в регистр суммы.

Время сложения двух чисел в схеме многоразрядного сумматора практически равно времени сложения

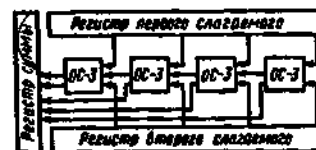


Рис. 22.13. Принципиальная схема многоразрядного сумматора

одной пары разрядов. Такое сокращение времени, затрачиваемого на операцию сложения двух чисел, достигается за счет существенного усложнения арифметического устройства.

Соединяя сумматоры и регистры с помощью управляющих коммутирующих цепей, получают устройства умножения и деления.

Карточка № 22.10 (157)

Сумматор

Все ли возможные режимы работы ОС-2 отображены на рис. 22.10?	Все	211
	Не все	271
На шину «Перенос» (см. рис. 22.11) из предшествующего разряда ОС-3 поступила «1». Первое слагаемое равно «0», второе также «0». Какие сигналы появятся на шинах: а) «Сумма»; б) «Перенос в последующий разряд»?	а) 0, б) 0	251
	а) 1, б) 0	151
	а) 0, б) 1	231
Из регистра первого слагаемого в сумматор (см. рис. 22.13) передано число 1011, из регистра второго слагаемого — число 111. Какое число поступит в регистр суммы?	10110	191
	10010	131
	1111	171
	10000	12
Сколько и каких сумматоров нужно для сложения двух двоичных чисел в последовательном коде?	Один ОС-2	92
	Один ОС-3	32
	Это зависит от разрядности чисел	72
Сколько и каких сумматоров требуется для сложения двух двоичных чисел в параллельном коде?	Два ОС-2	52
	Два ОС-3	112
	Это зависит от разрядности чисел	132

§ 22.11. АРИФМЕТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО

Арифметическим устройством (АУ) называется блок электронной вычислительной машины, в котором осуществляются арифметические и логические операции с двоичными числами.

Основные операции, выполняемые элементами арифметического устройства, сводятся к сложению двух чисел, нахождению логических функций двух переменных, сдвигу разрядов влево или вправо. Последовательно применяя эти операции, производят сложение, вычитание, умножение и деление любого количества чисел и определение логических функций многих переменных.

Точность выполнения арифметических операций зависит от количества разрядов машинных чисел и формы представления чисел. Чем большим количеством разрядов представлено машинное число («слово»), тем меньше ошибка при его округлении в случае выхода значащих разрядов за пределы разрядной сетки. Увеличение количества разрядов требует увеличения «длины» регистров и сумматоров при параллельном кодировании чисел или увеличения времени выполнения операций при последовательном. Следует также учитывать, что увеличение длины разрядной сетки приводит к уменьшению количества чисел, которые могут храниться в памяти машины, если емкость ее задана.

Поэтому количество разрядов для записи двоичных чисел в машине выбирают с учетом ее назначения и условий эксплуатации; в микроЭВМ (типа «Электроника») оно составляет 16, в больших универсальных машинах — несколько десятков.

На точность работы машины существенное влияние оказывает и форма представления чисел. Различают форму с фиксированной запятой и форму с плавающей запятой.

При фиксированной запятой несколько упрощается как схема арифметического устройства, так и процесс выполнения операций. В частности, исключается промежуточный этап нормализации чисел.

При плавающей запятой рациональнее используется разрядная сетка АУ и повышается точность вычислений.

В больших универсальных машинах предусматривается возможность обработки чисел как в той, так и в другой форме. При фиксированной запятой используют естественную запись чисел, при плавающей — нормализованную.

У нормализованных чисел различают мантиссу и

порядок. Мантисса всегда меньше единицы, содержит все разряды числа, но без нулей, предшествующих старшему значащему разряду. Порядок — это степень основания, на которую умножают мантиссу. Порядок определяет действительное место запятой в числе.

Рассмотрим примеры записи чисел в естественной и нормализованной форме в двоичной системе, а также машинную запись чисел.

Естественная запись	Нормализованная запись
1011,0010,	0,10110010 · 10 ¹⁰⁰ ,
10,101101,	0,10101101 · 10 ¹⁰ ,
0,0010101101,	0,10101101 · 10 ⁻¹⁰ ,

Машинная запись			
00	10110010	00	100,
00	10101101	00	010,
00	10101101	11	010,

а	б	в	г

В машинной записи числа два разряда *а* отводят для записи знака мантиссы (00 — плюс, 11 — минус); определенное число разрядов *б* — для записи мантиссы, два разряда *в* — для записи знака порядка; несколько разрядов *г* — для записи порядка (степени основания).

Нетрудно убедиться, что число 0,0010101101 не уместилось бы в восьмиразрядной сетке и часть значащих разрядов была бы потеряна, а точность вычислений снижена. Применяя нормализованную запись, можно сохранить все разряды числа. Для этого требуются дополнительные машинные разряды записи числа, однако нетрудно понять, что в целом это выгодно и тем больше, чем длиннее разрядная сетка машины.

Преимуществом двоичной системы служит простота арифметических операций. Так, при умножении двоичных чисел процесс сводится к сложению множимого с самим собой, но сдвинутым на один или несколько разрядов влево:

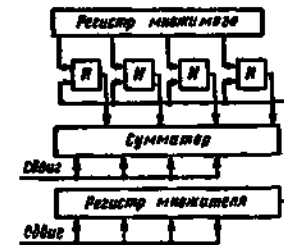
$$\begin{array}{r}
 \text{а) } \begin{array}{r} \times 100110 \\ 1001 \\ \hline 100110 \\ + 000000 \\ + 000000 \\ 100110 \\ \hline 101010110 \end{array} \qquad
 \text{б) } \begin{array}{r} \times 100110 \\ 1001 \\ \hline 100110 \\ + 100110 \\ \hline 101010110, \end{array}
 \end{array}$$

где 000000 — нулевые, а 100110 — значащие частичные произведения.

Сравнение примеров а) и б) показывает, что умножение на нулевой разряд эквивалентно сдвигу значащего частичного произведения на одну позицию влево.

Принципиальная упрощенная схема устройства умножения четырехразрядных двоичных чисел изображена на рис. 22.14. Множимое и множитель записаны в соответствующие регистры. При подаче им-

Рис. 22.14. Принципиальная схема устройства умножения четырехразрядных двоичных чисел



пульса на шины «Сдвиг» множитель вытесняется из регистра, а разряды сумматора сдвигаются на одну позицию. Если из регистра множителя «вытесняется» единица, то на схемы логического умножения И поступает импульс и множимое из своего регистра передается в сумматор. Если из регистра множителя «вытесняется» нуль, то схемы И закрыты и число в сумматоре сдвигается без суммирования. При этом длина сумматора либо должна быть в два раза больше длины регистров, либо должно быть предусмотрено округление произведения.

Если в схему ввести преобразователь кодов и производить не сложение, а вычитание частичных произведений (сложение в дополнительном коде), то можно получить схему деления двоичных чисел.

Карточка № 22.11 (203)
Арифметическое устройство

Какие операции выполняет арифметическое устройство?	Умножение	212
	Логическое сложение	272
	Сдвиг разрядов двоичного числа	252
	Все перечисленные	152
Как изменяется точность вычислений с увеличением количества триггеров в регистрах и сумматорах?	Увеличивается	232
	Точность вычислений не зависит от количества триггеров	192
Перечислите все элементы нормализованной записи числа	Мантисса, порядок	173
	Знак числа, мантисса, знак порядка, порядок	172
	Знак мантиссы, мантисса, знак порядка, порядок	13
	Знак числа, мантисса, порядок	93
Для чего применяется нормализованная запись чисел?	Для уменьшения количества разрядов	33
	Для уменьшения количества значащих разрядов	73
	Для повышения точности вычислений	53
Можно ли деление чисел заменить сложением?	Нельзя	113
	Можно, если складывать сдвинутые разряды	133
	Можно, если складывать сдвинутые разряды в дополнительном коде	153

§ 22.12. ОПЕРАТИВНОЕ ЗАПОМИНАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО

Для запоминания чисел, используемых непосредственно в арифметическом устройстве, служат регистры, каждый из которых рассчитан на одно двоичное число.

Для хранения большого количества чисел, время выбора которых измеряется микросекундами, применяют ОЗУ. Основу конструкции современных ОЗУ составляют ферритовые кольца (диаметром 1—2 мм), пронизанные проводами (рис. 22.15). Пропуская через провод импульсы тока, можно намагни-

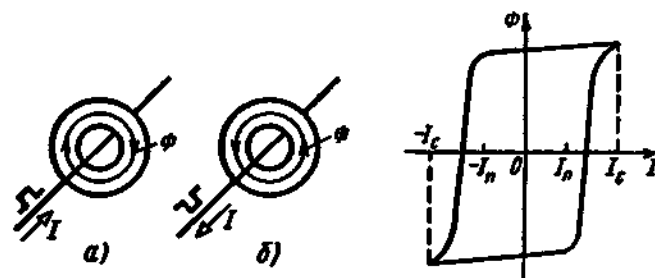


Рис. 22.15. Запись числа в ферритовом кольце: а—1; б—0

Рис. 22.16. Кривая перемагничивания ферритового кольца ОЗУ

чивать кольца в прямом (например, по часовой стрелке) (а) или в обратном (б) направлениях. Кольцо, намагниченное в одном направлении, хранит информационную единицу, в другом — нуль.

Для того чтобы устранить влияние помех и получить хорошо сформированные импульсы при считывании записанной информации, ферритовое кольцо должно иметь кривую перемагничивания, близкую к прямоугольной (рис. 22.16). Видно, что случайный ток помехи в пределах от $-I_n$ до $+I_n$ не приводит к изменению направления магнитного потока в сердечнике и почти не влияет на значение Φ . В настоящее время ферромагнитные материалы получают с практически прямоугольной петлей гистерезиса. Влияние помех на работу ОЗУ уменьшают за счет схемных решений. Например, для записи одного разряда («0» или «1») можно использовать два кольца, включенных соответствующим образом.

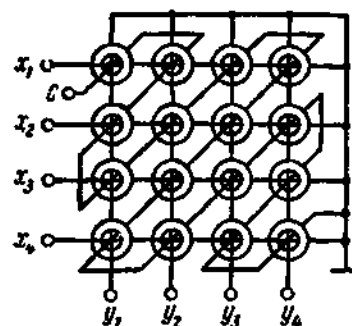


Рис. 22.17. Схема ферритовой матрицы

Упрощенная схема ферритовой матрицы для запоминания и воспроизведения 16 одноразрядных двоичных чисел представлена на рис. 22.17. По каждой из шин x_1, x_2, x_3, x_4 и y_1, y_2, y_3, y_4 можно подавать импульсы тока $I_c/2$, где I_c — ток срабатывания (перемангничивания) ферритового кольца.

Предположим, что по адресу x_2y_4 надо записать «1», а по адресу

x_4y_1 — «0». Тогда на шины x_2 и y_4 одновременно подают импульсы тока $I_c/2$. Этого тока недостаточно для перемангничивания кольца, поэтому только одно из них, в котором шины x_2 и y_4 пересекаются, а импульсы тока действуют одновременно, намагнитится в прямом направлении и будет хранить «1». Если на шины x_4 и y_1 одновременно подать отрицательные импульсы тока ($-I_c/2$), срабатывает только одно колечко на пересечении шин x_4 и y_1 , которое намагнитится в обратном направлении и будет хранить информационный «0». Аналогичным образом записывают числа и в другие ячейки матрицы.

Таким образом, каждое колечко имеет свой адрес, состоящий из двух чисел (x и y), и хранит одно число («0» или «1»).

Для считывания числа, записанного по какому-либо адресу, например x_2y_2 , на шины x_2 и y_2 одновременно подают отрицательные импульсы тока ($-I_c/2$). Очевидно, эти импульсы не смогут изменить состояние ни одного из колец, кроме того, которое находится на пересечении шин. Если в этом кольце записан «0», то его состояние не изменится, так как импульсы тока создадут магнитный поток, совпадающий по направлению с магнитным потоком кольца. При этом напряжение на клемме «С» считывающей шины равно нулю. Если в кольце x_2y_2 записана «1», то при одновременном действии двух импульсов тока кольцо перемангнитится, а его магнитный поток изменится от $(+\Phi)$ до $(-\Phi)$. В соответствии с законом электромагнитной индукции изменяющийся

магнитный поток наведет в считывающей шине ЭДС, в результате чего на клемме «С» появится импульс напряжения (тока). В рассматриваемом случае записанная информация при считывании стирается. В ЭВМ используют также устройства с регенерацией считанной информации.

Количество запоминаемых чисел определяется количеством ферритовых колец в матрице. Так как их адреса записывают в виде двоичных чисел, то количество колец равно 2^n , где $n = 1, 2, 3, \dots$

Матрицу, изображенную на рис. 22.17, можно использовать для записи одноразрядных чисел. Для записи и считывания многоразрядных чисел в параллельном коде необходима своя матрица для каждого разряда. Например, при 45-разрядной сетке необходимо 45 матриц, образующих блок (куб). Количество чисел, которое можно записать в таком кубе, $x_{\max}^2 = y_{\max}^2$. В универсальных машинах предусмотрена установка не одного, а нескольких кубов. Меняя количество включенных кубов, можно менять объем памяти ОЗУ.

Карточка № 22.12 (176)
Оперативное запоминающее устройство

Почему объем памяти ОЗУ ограничен десятками тысяч чисел?	Хранить большее количество чисел нет необходимости	213
	Чтобы сохранить малое время обращения	273
	Чтобы повысить надежность хранения чисел	253
Почему ферритовые кольца ОЗУ должны иметь прямоугольную характеристику перемангничивания?	Чтобы уменьшить время обращения	233
	Чтобы обеспечить надежное хранение чисел	193
	Чтобы увеличить объем памяти	14
Укажите значение импульсов тока I на шинах ферритовой матрицы, при котором невозможно записать числа по его адресу.	$I = I_c/2$	94
	$I > I_c/2$	34
	$I < I_c/2$	74

Укажите значение импульсов тока I на шинах ферритовой матрицы, при котором возможно считывание числа по его адресу	$I > I_d/2$	54
	$I < I_d/2$	114
	Только $I = I_d/2$	134
Сколько ферритовых колец необходимо для записи тысячи шестнадцатиразрядных чисел?	1000	154
	16	174
	16000	194

§ 22.13. ВНЕШНИЕ ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Чем сложнее и разнообразнее задачи, решаемые вычислительной машиной, тем большим количеством чисел она должна оперировать. В современных универсальных ЦЭВМ память рассчитана на хранение и воспроизведение десятков и сотен миллионов чисел.

Накопители таких больших объемов информации на ферритовых кольцах становятся громоздкими и дорогостоящими. Поэтому накопители строят на магнитных лентах, барабанах или дисках, которые позволяют хранить большое количество чисел, но имеют сравнительно малую скорость выборки нужного числа. Время считывания числа по его адресу (время обращения) у таких устройств лежит в пределах от сотых долей до сотен секунд.

Принцип записи информации на движущийся носитель (например, магнитную ленту) поясняется рис. 22.18. Записывающая головка, основу которой составляет сердечник из магнитомягкого материала с обмоткой, крепится неподвижно. Сердечник имеет воздушный зазор, примыкая к которому движется лента с линейной скоростью v . Через обмотку сердечника пропускают импульсы тока, создающие магнитный поток Φ , который замыкается через магнитный слой ленты, обладающий большой коэрцитивной силой. Положительные импульсы тока намагничивают ленту в одном направлении, отрицательные — в другом. Намагниченные участки ленты хранят двоичную информацию неограниченно долго. При считывании информации обмотка магнитной головки подключается к усилителю, на выходе которого появляются импульсы ЭДС, индуцируемой переменным магнитным потоком,

создаваемым в сердечнике намагниченными участками движущейся ленты.

На одном миллиметре длины ленты может быть размещено несколько десятков единиц двоичной информации. Допустимая плотность записи тем выше, чем меньше воздушный зазор между магнитной головкой и носителем информации. Наибольшая плотность достигается, когда носитель касается головки, однако это не всегда целесообразно, так как снижает срок службы головки и носителя.

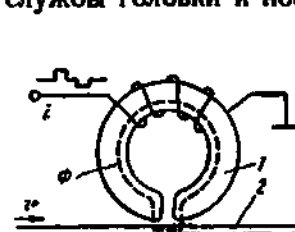


Рис. 22.18. Схема магнитной записи информации на движущийся магнитный носитель:
1 — сердечник магнитной головки; 2 — магнитная лента

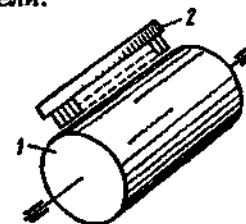


Рис. 22.19. Схема накопителя информации на магнитном барабане:
1 — барабан; 2 — обмотка с головками для записи и считывания информации

Принцип действия запоминающего устройства (накопителя информации) на магнитном барабане показан на рис. 22.19. Магнитный цилиндр приводится во вращение электродвигателем. Частота вращения, достигающая нескольких тысяч оборотов в минуту, поддерживается постоянной. Вдоль образующих цилиндра устанавливается обмотка с магнитными головками. Количество головок равно количеству разрядов принятой в машине разрядовой сетки (двоичного числа). Кроме того, одна головка используется для записи и считывания адреса числа. С помощью этой головки на крайнюю дорожку барабана записывают синхронизирующую последовательность единиц. Затем головку переводят в режим считывания и через усилитель подключают к счетчику импульсов. Показания счетчика обрываются с началом каждого следующего оборота барабана. В результате его показания всегда равны номеру (адресу) образующей цилиндра (двоичного числа), на которой в каждый момент времени находится обмотка с магнитными головками.

Емкость памяти на магнитном барабане составляет сотни тысяч двоичных чисел, а время обращения — сотые доли секунды. В комплект универсальной вычислительной машины включают несколько магнитных барабанов, характеристики которых (средние значения емкости и быстродействия) позволяют использовать их в качестве буферных средств между памятью на магнитных лентах и памятью на ферритовых кольцах. По команде устройства управления в необходимый момент времени тот или иной массив информации с магнитных лент переписывают на магнитный барабан, откуда он может быть впоследствии сравнительно быстро подан в ОЗУ. В последнее время для той же цели широко применяют магнитные диски. Несколько дисков диаметром до 1 м монтируют на одной оси. Информацию записывают с двух сторон каждого диска, обойма с магнитными головками располагается вдоль его радиуса. При той же скорости обращения, что и у магнитных барабанов, объем памяти при записи на магнитных дисках возрастает до десятков миллионов двоичных чисел.

Практически неограниченный объем информации, исчисляемый сотнями миллионов и миллиардами чисел, может храниться в накопителях на магнитных лентах. Обычно используют ленту шириной 35 мм. Для уменьшения вероятности искажения одну и ту же информацию записывают на двух дорожках (дублируют). По окончании записи производят контрольное считывание и, если хотя бы два числа с дублирующих друг друга дорожек не совпадут, участок записи бракуют. В адресе числа сначала указывают номер зоны ленты, а затем номер числа в зоне.

Ленты длиной до 600 м хранят в кассетах, которые устанавливают в лентопротяжный механизм до начала решения задачи. Скорость ленты в лентопротяжном устройстве 2 м/с.

Карточка № 22.13 (234)
Внешние запоминающие устройства

Время обращения 1 с. На каком носителе работает память машины?	На ферритовых кольцах	214
	На магнитном барабане	274
	На магнитной ленте	254

Продолжение

Емкость запоминающего устройства 200 000 чисел. На каком носителе оно работает?	На ферритовых кольцах	234
	На магнитном барабане	15
	На магнитной ленте	195
При равных габаритах какое устройство обеспечивает больший объем памяти?	Ферритовые матрицы	95
	Магнитный барабан	175
	Магнитные диски	35
Сколько магнитных головок устанавливают в обойме магнитного барабана при параллельном коде?	Равное количеству разрядов	155
	На единицу больше, чем количество разрядов разрядной сетки	75
	Равное удвоенному количеству разрядов разрядной сетки	135
Длина ленты ВЗУ 360 м, скорость движения ленты в лентопротяжном устройстве 2 м/с. Каково максимальное время выбора информации?	3 мкс	55
	2 с	115
	3 с	215

§ 22.14. УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ

По мере усложнения вычислительных машин полная централизация управления стала неэкономичной. Поэтому в современных машинах осуществляется децентрализация управления при сохранении центрального устройства выбора и расшифровки команд программы. Центральное устройство обычно объединяют с арифметическим и называют процессором.

Другие блоки машины оснащены собственными устройствами управления, вступающими в работу по сигналам процессора.

Устройство управления универсальной ЦЭВМ имеет следующие основные составляющие: регистры для хранения выполняемой команды, для адреса следующей команды и некоторой другой информации; дешифратор команды, распределяющий сигналы управле-

ния по исполнительным цепям; блок формирования тактовых импульсов, задающий темп выполнения команды и вырабатывающий сигналы (импульсы), с помощью которых выполняется команда.

На вход дешифратора поступает команда (двоичное n -разрядное число). Количество выходов дешифратора равно 2^n . Каждому числу на входе соответствует импульс в одной строго определенной выходной цепи.

На рис. 22.20 изображена принципиальная схема одноступенчатого дешифратора трехразрядного двоич-

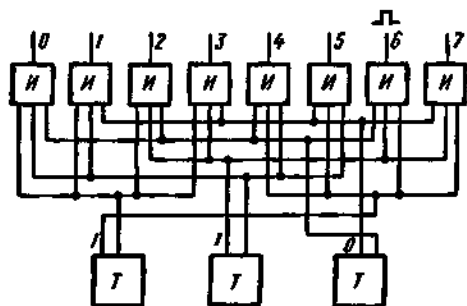


Рис. 22.20. Схема одноступенчатого дешифратора

ного числа с восемью выходами ($2^3=8$). Каждый разряд хранится в триггере и прямым кодом снимается с левого выхода триггера, а обратным — с правого. Сигналы «0» и «1» с обоих выходов триггеров подают на схемы логического умножения И, у которых импульс на выходе появляется только в том случае, когда на все три входа поданы единицы. На рис. 22.20 в триггерах записано двоичное число 110 (шесть). Проследив прохождение сигналов по соединительным шинам, нетрудно убедиться, что три единицы поступают только на входы шестой схемы И. На остальные схемы И подается хотя бы один «0». Следовательно, импульс появится только на шестой управляющей шине. При поступлении в триггеры другого числа управляющий импульс появится на другой (соответствующей) шине.

Недостаток одноступенчатого дешифратора — необходимость схем логического умножения с большим числом входов, равным числу разрядов двоичного

числа. Увеличив количество логических элементов, можно снизить число входов каждого элемента. На рис. 22.21 приведена схема двухступенчатого дешифратора трехразрядных чисел, построенного на двухвходовых элементах И. Если команда многоадресная, строят многоступенчатые (пирамидальные) дешифраторы на элементах И с несколькими входами.

В универсальных машинах используют десятки различных команд, которые подразделяются на арифметические (арифметические операции, сдвиг, нормализация), логические и служебные

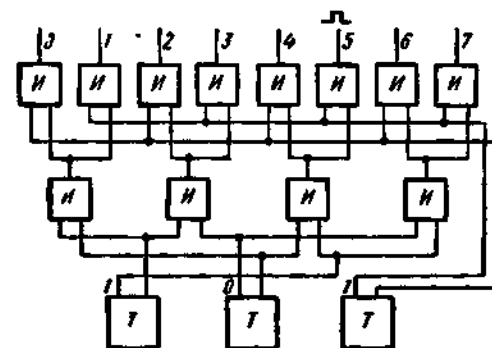


Рис. 22.21. Схема двухступенчатого дешифратора

(вызов числа в АУ, запись числа по адресу, ввод и вывод данных).

Выполнение каждой команды складывается из ряда последовательных этапов — микроопераций. Одна микрооперация соответствует одному тактовому импульсу. Различные команды выполняются как определенная последовательность микроопераций, многие из которых являются общими: установка в нуль регистра или сумматора, обращение к ОЗУ, запись числа в регистр, передача числа в сумматор.

Управление бывает синхронным и асинхронным. При синхронном управлении любая команда выполняется за одно и то же количество тактовых импульсов, рассчитанное на выполнение наиболее «длинной» команды. В этом случае при выполнении коротких команд часть тактовых импульсов не используется (пропускается).

При асинхронном управлении на каждую команду расходуется столько тактовых импульсов, сколько необходимо. При этом для выполнения каждой операции создается своя схема. Пример такой частной схемы управления приведен на рис. 22.22. Тактовый импульс подают на цепь, состоящую из линий задерж-



Рис. 22.22. Схема процесса асинхронного управления

ки. Этот импульс поочередно с интервалами, определяемыми временем задержки, попадает на управляющие шины, которые скоммутированы в порядке выполнения микроопераций. По окончании набора микроопераций импульс подают на следующую схему, которая управляет выполнением другой команды. При асинхронном управлении экономится время за счет исключения холостых тактовых импульсов, но существенно усложняется аппаратура.

В настоящее время чаще всего в универсальных ЦЭВМ используют смешанный способ асинхронно-синхронного управления.

Карточка № 22.14 (179)
Устройство управления

Чем определяется скорость выполнения команды?	Скоростью работы регистров	275
	Скоростью работы дешифратора	235
	Блоком формирования тактовых импульсов	255
Сколько входов и выходов имеет дешифратор пятиразрядных двоичных чисел?	5 входов, 32 выхода	16
	5 входов, 25 выходов	196
	2 входа, 5 выходов	96

Продолжение

На вход дешифратора поступило двоичное число (команда) 10011. На каком выходе появится управляющий импульс?	На одиннадцатом	176
	На девятнадцатом	36
	Это зависит от кода числа	156
При равной разрядности дешифруемых двоичных чисел у какого дешифратора больше входов?	У одноступенчатого	76
	У многоступенчатого	136
	Одинаково у того и другого	56
При каком управлении: а) сокращается время выполнения команд; б) существенно усложняется схема УУ?	а), б) При синхронном	116
	а), б) При асинхронном	216
	а) При синхронном; б) при асинхронном	236

§ 22.15. УСТРОЙСТВО ВВОДА ИНФОРМАЦИИ

В зависимости от назначения ЦЭВМ различают два типа устройств ввода исходной информации. В машины, предназначенные для решения математических задач теоретического и прикладного (инженерного, статистического, планового) характера, информацию вводят в дискретной (числовой) форме.

В машины, предназначенные для управления объектами или технологическими процессами, информацию вводят непосредственно в виде физических характеристик и параметров и только в самой машине ее преобразуют в числовую форму. Такие ЦЭВМ широко применяются в ракетной и авиационной технике, в технике связи и на транспорте, в металлургической, химической, нефтеперерабатывающей, пищевой и других отраслях промышленности.

Для преобразования непрерывных физических величин в дискретные сигналы и обратно разработаны приборы-преобразователи.

Рассмотрим устройства ввода цифровой информации, в том числе рабочей программы машины, в ее долговременную память.

Исходная информация в виде двоичных разрядов с помощью клавишных перфорационных машин вручную наносится на бумажную ленту или картонную карту. Каждый символ (десятичная цифра, русская или латинская буква, знак арифметической или логической операции, знак препинания и т. д.) кодируют последовательностью отверстий («1») и пропусков (отсутствие отверстия — «0»). Наиболее распространены семиразрядный (ГОСТ 10859—64) и пятизначный телеграфный коды, в которых на каждый символ отводится семь или пять позиций-дорожек.

Ширина ленты равна 25 мм, длина — несколько сотен метров. Отверстия круглые, диаметром 1,8 мм, закодированный символ занимает одну строку.

Перфокарта стандартного размера 187×82 мм позволяет записать 960 двоичных знаков в виде 80 колонок по 12 разрядов в каждой. Отверстия в перфокарте имеют прямоугольную форму (3,2×1,4 мм). Для ориентирования перфокарты один ее угол срезан.

Считывание информации с перфорированных носителей и запись ее в память машины осуществляются автоматически контактным или фотоэлектрическим способом. В первом случае стопку ориентированных перфокарт укладывают в подающее устройство, которое последовательно карту за картой перемещает их под линией щеточных контактов, количество которых равно числу строк. При прохождении отверстия контакт кратковременно замыкается, возникает электрический импульс, соответствующий «1». Считывание всех разрядов строки осуществляется одновременно. Во втором случае отверстие в перфоленте открывает доступ к фотоэлементу, сфокусированному к лучу источника света, в результате чего возникает импульс тока.

Импульс фототока усиливается электронным усилителем и поступает в ЦЭВМ. Считывание всех разрядов строки производится также одновременно, для чего требуется от пяти до восьми фокусирующих систем и фотоэлементов.

Скорость считывания информации с перфоленты фотоэлектрическим способом достигает 1000 строк/с. При использовании перфокарт скорость считывания информации уменьшается до 50 символов/с.

На промышленных предприятиях управляющие

ЦЭВМ могут быть оснащены высокоэффективными устройствами ввода информации способом «чтения» данных. При этом рисунки, символы и другие пометки, сделанные карандашом на поле стандартного бланка, преобразуются в импульсную двоичную информацию с помощью фотоэлементов, реагирующих на отраженный от бланка свет, и схем, реализующих специальную программу считывания. Такие читающие устройства значительно облегчают обработку бланков отчетной документации.

Электронно-оптические считывающие устройства в сотни и тысячи раз ускоряют обработку графиков и осциллограмм, полученных при экспериментальных исследованиях.

Разработаны также магнитные считывающие устройства, преобразующие в последовательность электрических сигналов информацию, записанную чернилами, в которые добавлен магнитный порошок.

Карточка № 22.15 (384)
Устройства ввода информации

В каком виде вводят информацию в арифметическое устройство ЦЭВМ?	В дискретной форме	276
	В виде непрерывных сигналов	256
	Это зависит от назначения ЦЭВМ	17
Каким образом записывается информация в ВЗУ?	Вручную с помощью клавишных перфорационных машин	197
	Автоматически	97
Сколько фотоэлементов требуется для фотоэлектрического считывания информации, записанной на перфоленте телеграфным кодом?	5	177
	8	37
	Это зависит от ширины ленты	157
Сколько щеточных контактов требуется для считывания информации с перфокарты?	12	77
	960	137
	Это зависит от количества просечек	57

В каких случаях целесообразно применять электронно-оптические считывающие устройства?	Для обработки бланков отчетной документации	117
	Для обработки осциллограмм	217
	Для обработки графиков	237
	Во всех перечисленных	257

§ 22.16. УСТРОЙСТВА ВЫВОДА И ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Информация, накапливаемая в ЦЭВМ при обработке исходных данных по заданной программе, хранится в устройствах памяти в виде двоичных чисел или двоичных кодов различных символов.

Из внешней памяти машины информация может быть выведена на бумагу или экран электронно-лучевой трубки устройствами выхода. Эти устройства вместе с устройствами ввода информации обеспечивают двустороннюю связь (диалог) человека с машиной или машины с машиной.

Устройства вывода делятся на два типа: выдающие информацию на машинном языке в виде, удобном для восприятия ее другой машиной; в виде, удобном для восприятия ее человеком.

В первом случае выводимая информация автоматически записывается кодовыми отверстиями на перфоленту или перфокарты. Механизм для пробивки отверстий состоит из электромагнитов, фиксирующих или освобождающих пуансоны, на которые воздействует ударная планка. После пробивки строки кодовых отверстий механизм перемещает ленту на один шаг. В устройстве для перфорации лент — восемь пуансонов (по числу дорожек), из которых один предназначен для пробивки синхронизирующих отверстий. В устройствах для перфорирования карт количество пуансонов увеличивается до 80.

Устройства вывода на машинном языке перфо-

рируют ленты со скоростью до 300 строк/с. Перфорирование карт осуществляется со скоростью нескольких сотен карт в минуту.

Выведенная из машины информация хранится и по необходимости используется повторно или многократно.

При решении комплексной задачи несколькими машинами одновременно обмен информацией между ними осуществляется по линиям связи передачей кодовых импульсов напряжения (тока).

Вывод информации в форме, удобной для человека, может быть произведен на печатающие или экранные устройства.

Печатающие устройства подразделяют на механические (последовательной и параллельной печати) и немеханические.

Выводимые из машины двоичные числа преобразуются в десятичные, а двоичные коды символов расшифровываются. Отпечатанная информация состоит из четких контрастных знаков, устойчивых к влиянию света, тепла, влажности.

В качестве устройств последовательной печати широко используют электрифицированные пишущие машинки, телеграфные аппараты типа СТА-2М и телетайпы. Скорость работы таких устройств составляет 2000—2500 слов/ч.

Устройства параллельной печати фиксируют на бумажной ленте сразу целую строку. Скорость работы таких устройств существенно превосходит скорость работы устройства последовательной печати. Так, например, алфавитно-цифровое печатающее устройство на 128 разрядов (АЦПУ-128) печатает 400 строк/мин.

Чтобы выходные устройства не ограничивали быстродействия ЦЭВМ, применяют немеханические печатающие устройства. Магнитографическое устройство для скоростной печати буквенно-цифровой информации переносит на бумагу скрытое изображение регистрируемых символов, создаваемое на вращающемся магнитном барабане импульсами тока, которые пропускают через записывающую магнитную головку. Скрытое изображение проявляется специальным магнитографическим порошком. Освободившийся участок магнитного барабана размагничивается и подготавливается для новой записи. Скорость магнитографи-

ческой записи составляет несколько тысяч знаков в секунду.

Еще более высокие скорости печати (десятки и сотни тысяч знаков в секунду) достигаются в ксерографических и электрографических печатающих устройствах.

Экранные устройства, созданные на основе электронно-лучевых трубок, позволяют отображать не только знаковую, но и графическую информацию.

В последнее время широко распространены устройства, обеспечивающие как ввод, так и вывод информации одним пользователем со своего рабочего места. Такие устройства, называемые терминалами, могут быть расположены как в вычислительном центре, так и на значительных расстояниях от него (до нескольких тысяч километров). В последнем случае связь терминала с вычислительным центром осуществляется либо по проводам, либо по радиолиниям, в том числе линиям космической связи.

Делаются попытки организовать «естественный» диалог человека с машиной, когда ввод информации в машину и вывод ее из машины будет произведен в речевой форме.

Карточка № 22.16 (250)
Устройства вывода и отображения информации

Для каких целей используются: а) ручные клавишные перфораторы; б) автоматические перфораторы?	а), б) Для вывода информации	277
	а) Для ввода информации; б) для вывода информации	18
	а) Для вывода данных; б) для ввода данных	198
Какие устройства выдают информацию из ЦЭВМ в виде, удобном для человека?	Клавишные перфораторы	98
	Автоматические перфораторы	178
	Пишущие машинки	38
Какое устройство вывода относится к немеханическим?	Телетайп	158
	Телеграфный аппарат	78

Продолжение

Какое устройство вывода относится к механическим?	Электрифицированная пишущая машинка	138
	Магнитографическое печатающее устройство	58
	Ксерографическое	118
	Электрографическое	218
	Экранное	238
Может ли одна вычислительная машина иметь несколько терминалов?	АЦПУ	258
	Может	278
	Не может	19

§ 22.17. ПОНЯТИЕ О ПРОГРАММИРОВАНИИ

Процесс решения задачи на ЦЭВМ начинается с ее математической формулировки и составления уравнения или системы уравнений, связывающих искомые значения или функции с исходными данными. Затем разрабатывают способ решения задачи, при этом широко используют численные методы решения дифференциальных, алгебраических и других уравнений.

Программирование состоит из разработки алгоритма решения задачи и записи его на одном из алгоритмических языков, с которого и осуществляется перевод на язык машины. Составление программ непосредственно на машинном языке производится редко и только для задач ограниченной сложности. При разработке программ широко используют стандартные подпрограммы для решения типовых задач и вычисления наиболее распространенных функций (тригонометрических, экспоненциальных, логарифмических).

Один из наиболее распространенных алгоритмических языков АЛГОЛ-60 ориентирован на программирование решений главным образом математических задач. В его алфавит включены арабские цифры, строчные и прописные буквы латинского и русского алфавитов, знаки арифметических и логических опе-

раций, знаки отношений («больше», «меньше», «не больше», «не меньше», «равно», «не равно»), разделители, указатели следования и некоторые другие символы.

Для алгоритмического описания процессов решения задач по обработке данных используют КОБОЛ. Применяют и другие алгоритмические языки, например ЯЛС, ФОРТРАН. При решении задачи программой предусматривается определенная точность, которая выражается через максимально допустимую погрешность вычислений. Если погрешность выходит за допустимые пределы, то увеличивают количество машинных операций (при использовании итерационных методов) или количество разрядов в записи числа. При этом увеличивается количество ячеек памяти, необходимое для хранения чисел, и существенно возрастает время решения задачи.

Во избежание ошибок, возникающих вследствие сбоев аппаратуры, промахов программистов и операторов, до запуска программа проходит длительный процесс отладки на машине. Сначала проводится отладка по отдельным этапам решения задачи, а затем и комплексная.

Развитие методов программирования привело к созданию операторного метода, в котором алгоритм решения задачи записывается на алгоритмическом языке логических схем (ЯЛС) и автоматически передается в машину. В СССР был разработан транслятор — программирующая программа ПП-1.

Широко применяют математическое обеспечение ЦЭВМ, под которым понимают комплект вспомогательных программ, позволяющих решать ряд задач без разработки для них специальных программ, помочь программисту при выполнении ряда работ и поддерживать наиболее выгодный режим работы ЦЭВМ.

Одним из способов повышения производительности ЦЭВМ стало мультипрограммирование, при котором программа рассчитывается на одновременное решение нескольких задач. Такая возможность появляется при более полной загрузке отдельных блоков машины. Например, во время записи данных для решения одной задачи в ВЗУ арифметическое устройство может выполнять арифметические операции для другой задачи.

Карточка № 22.17 (317) Понятие о программировании

Какой этап подготовки решения задачи на машине не относится к программированию?	Выбор или разработка численного метода решения задачи	279
	Запись алгоритма решения на алгоритмическом языке	20
	Перевод с алгоритмического языка на машинный	199
	Запись программы в ВЗУ	99
Какой язык целесообразно использовать для описания алгоритма решения задач по подведению итогов выполнения плана предприятия?	АЛГОЛ или БЭЙСИК	179
	КОБОЛ	39
	ФОРТРАН	159
	ЯЛС	79
Укажите причины ошибок, которые могут быть в программе	Ошибки программистов	139
	Ошибки операторов	59
	Сбой аппаратуры	119
	Все перечисленные	
Какой язык обеспечивает автоматическую трансляцию программы в машину?	АЛГОЛ	239
	КОБОЛ	259
	ФОРТРАН	200
	ЯЛС	280
Что такое математическое обеспечение ЦЭВМ?	Разработка метода решения задачи	100
	Комплект программ	180
	И то и другое	40

§ 22.18. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРИМЕНЕНИЕ ЦЭВМ

Важнейшая характеристика ЦЭВМ — быстрое действие, которое измеряется количеством операций, выполняемых процессором в течение одной секунды. Наибольшее значение этой характеристики для универсальной ЦЭВМ — около полумиллиарда операций в секунду, а при объединении нескольких ЦЭВМ в единый комплекс — миллиарды операций в секунду. Это позволяет решать задачи, которые раньше были практически неразрешимы из-за громоздкости вычислений, а также сопрягать ЦЭВМ с системами автоматического управления, работающими в реальном масштабе времени. Быстродействие типовых ЦЭВМ значительно ниже и составляет от десятков тысяч операций в секунду до миллиона.

Важной характеристикой ЦЭВМ является также емкость оперативной памяти. Обычно память разбивается на ячейки по восемь двоичных разрядов. Эти ячейки нумеруются по порядку. Номер ячейки служит ее адресом, емкость составляет 1 байт и позволяет записать один символ (букву, цифру, знак).

Важную роль в оценке возможностей машины играет разрядность ее процессора. Чем больше разрядов отводится на запись двоичных чисел, с которыми работает машина, тем выше точность вычислений при заданном быстродействии.

В настоящее время в СССР применяются ЦЭВМ различных марок. Наряду с машинами Единой системы (ЕС), построенной по агрегатному принципу (блоки машин собирают из набора стандартных секций), используются внесистемные универсальные машины «Минск», «Урал», БЭСМ, а также специализированные на решение задач определенного класса мини-ЭВМ и микроЭВМ. Размеры микроЭВМ не превышают нескольких десятков сантиметров.

Цифровые электронные вычислительные машины используют в системах автоматизации управления и планирования, материально-технического снабжения, в энергетике и на транспорте, в здравоохранении и образовании, в городском хозяйстве, в библиотечном деле. С помощью ЦЭВМ предсказывают погоду, производят сложные инженерно-технические расчеты,

проектируют новые механизмы и машины, в том числе и ЦЭВМ.

Одна из важнейших тенденций в развитии вычислительной техники — создание больших информационных систем с сетью вычислительных центров, банков данных и автоматизированных систем управления.

Технические данные некоторых машин (серии ЕС и мини-ЭВМ) приведены в табл. 22.1 и 22.2.

Таблица 22.1

Характеристика ЦЭВМ	Модель ЭВМ серии ЕС						
	1020	1022	1030	1033	1040	1050	1060
Среднее быстродействие, тыс. опер/с	20	80	60	200	380	500	1000
Разрядность процессора, двоичных разр.	8	8	32	32	64	64	64
Емкость ОЗУ, к байт	256	512	512	512	1024	1024	8192
Занимаемая площадь, м ²	100	110	150	120	200	250	300

Таблица 22.2

Характеристика ЦЭВМ	Модель мини-ЭВМ			
	М-400	М-6000	СМ-2	СМ-4
Среднее быстродействие, тыс. опер/с	128	67	154	213
Разрядность, двоичных разр.	16	16	16	16
Емкость ОЗУ, к байт	256	128	256	248
Занимаемая площадь, м ²	40	40	40	40

Карточка № 22.18 (330)
Технические характеристики и применение ЦЭВМ

Укажите максимальное быстродействие машин серии ЕС	1 млн. опер/с	160
	2 млрд. опер/с	80
	100 000 опер/с	140
Что наиболее характерно для машин серии ЕС?	Идентичность характеристик	60

Продолжение

Какой режим работы ЦЭВМ требует максимальной скорости вычислений?	Агрегатный принцип устройства	120
	Высокое быстродействие и большой объем памяти	220
	В реальном масштабе времени	240
	При решении сложных задач	260
Укажите характерное отличие микроЭВМ от мини-ЭВМ	В обоих названных случаях	281
	Малое быстродействие	285
	Малая разрядность	283
	Малая емкость оперативной памяти	284
Что наиболее важно для ЦЭВМ, управляющих технологическими процессами?	Малые габариты	282
	Большой объем памяти	286
	Большое быстродействие	287
	Малые габариты	288

§ 22.19. МИКРОПРОЦЕССОРЫ

Использование новых принципов и совершенствование технологии интегральных микросхем (см. гл. 21) позволили довести степень интеграции до такого уровня, при котором в объеме одного кристалла с линейным размером в несколько миллиметров оказалось возможным разместить сотни тысяч активных и пассивных элементов электроники.

При этом количество стало переходить в качество: появилась возможность органичного объединения арифметического устройства, логических элементов и триггеров оперативной памяти с устройством управления и сокращения до минимума длины линий (доли микрометра) и времени (доли микросекунды) передачи внутренних сигналов управления.

Так возник микропроцессор, решающий разнообразные математические и логические задачи с точно-

стью и скоростью соизмеримой, а иногда и не уступающей тем, которые достигнуты в современных больших электронных вычислительных машинах. Такие кристаллы с помощью устройств ввода — вывода информации включаются в системы автоматического управления, практически неограниченно расширяя их возможности, вплоть до наделяния элементами интеллекта.

Области применения микропроцессоров расширяются. Соответственно умножаются и требования, предъявляемые к ним. Естественно, что одна даже многофункциональная схема не в состоянии удовлетворить всем потребностям практики с учетом технологических и экономических ограничений. Установлено, например, что двукратное увеличение разрядности двоичных чисел, с которыми оперирует микропроцессор, приводит к увеличению его стоимости примерно в десять раз.

Микропроцессоры отличаются друг от друга сложностью, возможностями и стоимостью. Микропроцессор, предназначенный для решения одной задачи в конкретной системе автоматического управления, проще универсального микропроцессора, рассчитанного на применение в различных САУ или в микроЭВМ.

Важнейшие характеристики микропроцессора — разрядность и быстродействие. Разрядность определяет точность обработки информации и, следовательно, точность работы САУ, а быстродействие — возможность работы устройства в реальном масштабе времени, что существенно для многих, в том числе и управляющих технологическими процессами, систем.

Серийно выпускаются микропроцессоры с разрядностью 4, 8, 16, 32. В некоторых микропроцессорах предусмотрена возможность удвоения количества разрядов. Быстродействие составляет от 200 тыс. до 2 млн. опер/с.

Широко применяются два типа микропроцессоров: с аппаратным и микропрограммным устройством управления.

Микропроцессор с аппаратным управлением рассчитан на решение жестко фиксированной задачи или группы однотипных задач. Вычислительный процесс и логика его работы определены характером внутренних соединений элементов схемы и не могут быть изменены в процессе эксплуатации. Принципиальная

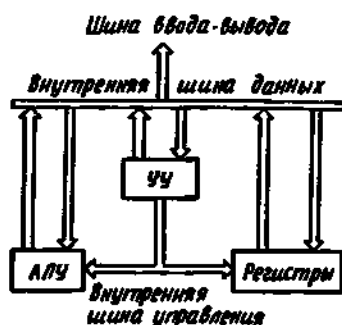


Рис. 22.23. Принципиальная схема микропроцессора с аппаратным управлением

схему на рис. 22.23 оно не включено) осуществляет разделение процессов ввода и вывода во времени. Входные данные (например, сигнал от предшествующего звена САУ) поступают в устройство управления (УУ), которое вырабатывает фиксированную последовательность команд, выполняемых арифметическо-логическим устройством АЛУ и регистрами. Полученные в результате работы микропроцессора данные (выходной сигнал) через шину ввода — вывода передаются в последующее звено системы автоматического управления.

Группа регистров содержит регистры общего назначения и специальные регистры. Регистры общего назначения (обычно их 16) служат оперативной памятью микропроцессора. От их количества зависят его разрядность и быстродействие. Специальные регистры используются для счетчика команд, выработки признака результата и некоторых других функций.

Микропроцессоры с аппаратным управлением выполняются в одном кристалле.

Микропроцессоры с микропрограммным управлением имеют универсальное назначение. Они могут решать различные математические и логические задачи в зависимости от сменных программ, вводимых в память микропроцессора. Может меняться и длина их разрядной сетки.

Микропроцессоры с микропрограммным управлением обычно изготавливаются на основе нескольких

схему взаимодействия основных блоков микропроцессора, имеющего аппаратное управление, приведена на рис. 22.23. Схемные блоки связаны многопроводными шинами, формируемыми в процессе изготовления кристалла БИС. Для уменьшения количества внешних соединений кристалла одни и те же линии используются как для ввода, так и для вывода данных. Специальное устройство (в

кристаллов БИС, в том числе блока центральных процессорных элементов ЦПЭ, блока микропрограммного управления БМУ и памяти для микропрограмм (рис. 22.24). Блок ЦПЭ состоит из нескольких кристаллов БИС, каждый из которых аналогичен микропроцессору с аппаратным управлением.

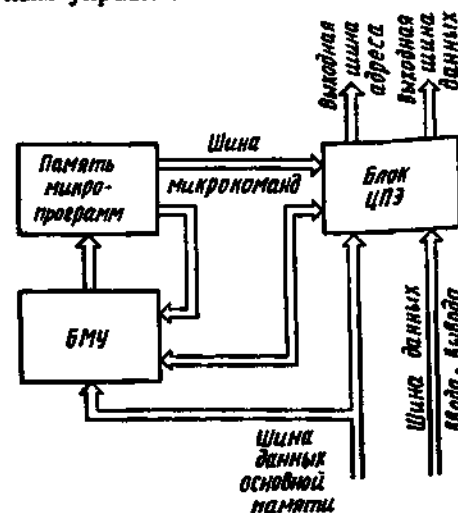


Рис. 22.24. Схема микропроцессора с микропрограммным принципом управления

Карточка № 22.19 (192)
Микропроцессоры

Какие элементы схемы ЦЭВМ объединены в кристалле микропроцессора?	Логические элементы	294
	Триггеры	299
	АУ и УУ	290
	Все перечисленные	302
Как изменяются: а) точность работы; б) стоимость с увеличением разрядности микропроцессора?	Увеличиваются	296
	а) Увеличивается; б) уменьшается	304
	а) Уменьшается; б) увеличивается	306
	Уменьшаются	293

Укажите быстродействие, характерное для микропроцессоров	50 000 опер/с	301
	500 000 опер/с	305
	5 000 000 опер/с	295
	50 000 000 опер/с	291
Какие микропроцессоры имеют multifunctional назначение?	Микропроцессоры с аппаратным принципом управления	298
	Микропроцессоры с микропрограммным принципом управления	300
	Это зависит от разрядности	303
	Это зависит от быстродействия	297
Какая схема характерна для универсальных микропроцессоров?	Однокристалльная	292
	Многокристалльная	289

§ 22.20. МИКРОКАЛЬКУЛЯТОРЫ

Важнейшая область применения микропроцессоров — цифровые электронные вычислительные машины. Микропроцессор является основным блоком современных ЦЭВМ. Так как разработка БИС и СБИС (сверхбольших интегральных схем) позволила уменьшить размеры процессора в десятки тысяч раз, возникла возможность уменьшить и размеры самих вычислительных машин.

Появились настольные и карманные вычислительные машины, основу которых составляют микропроцессоры. Такие машины получили название микроЭВМ. Конечно, устройства ввода, вывода, питания и внешней памяти машин нельзя довести до микроскопических размеров, но потребление энергии, габариты и масса микросистемных вычислительных машин оказываются на несколько порядков уменьшенными по сравнению, например, с машинами серии ЕС. При этом вычислительные возможности микроЭВМ не столь существенно уступают возможностям больших машин.

В качестве одной из разновидностей микроЭВМ можно назвать микрокалькулятор. Различают программируемые и непрограммируемые микрокалькуляторы. Схема функциональных блоков и шин программируемого представлена на рис. 22.25.

Основой микрокалькулятора служит микропроцессор (МП). В виде отдельных блоков в корпусе размещены оперативные запоминающие устройства (ОЗУ), постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), дисплей и клавишный пульт. Взаимодействие блоков по командам с клавишного пульта или по записанной в ОЗУ программе осуществляется устройством управления.

С микропроцессором непосредственно взаимодействуют регистры стека (магазина), в которые записываются два двоичных числа, команда и результат арифметической операции. Числа и команды в стеке перемещаются снизу вверх или сверху вниз. Очередное число, которое может быть сформировано вручную на клавишном пульте или получено из ОЗУ программ, поступает на крайний регистр стека, сдвигая остальные числа в соседние регистры. При этом число из последнего регистра вытесняется.

В ПЗУ хранятся программы операций, указанные

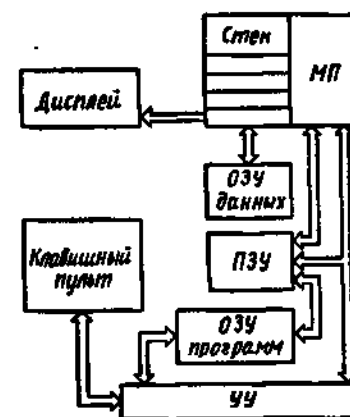


Рис. 22.25. Функциональные блоки и шины микрокалькулятора

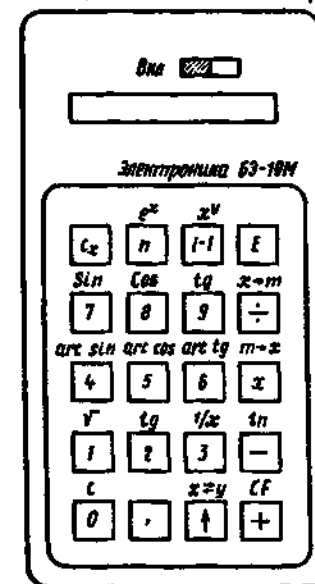


Рис. 22.26. Внешний вид микрокалькулятора

занных на клавишном пульте (рис. 22.26). Дисплей позволяет визуально контролировать правильность набранных чисел и считывать результат.

ОЗУ данных и ОЗУ программ иногда объединяются в одном блоке. У непрограммируемых микрокалькуляторов запоминающего устройства программы нет.

Непрограммируемый микрокалькулятор «Электроника БЗ-19М», изображенный на рис. 22.26, имеет три регистра в стеке и оперирует числами в показательной форме. Весит он 400 г, может питаться как от сети переменного тока 220 В, так и от химических элементов.

Некоторые данные отечественных программируемых микрокалькуляторов приведены в табл. 22.3.

Таблица 22.3

Параметры	Типы микрокалькуляторов		
	«Электроника Б-34»	«Электроника МК-64»	«Электроника МК-56»
Разрядность мантиссы	8	8	8
Разрядность порядка	2	2	2
Максимальное число шагов программы	98	98	98
Максимальное время выполнения одной арифметической операции, с	0,5	0,5	0,5
Масса, кг	0,39	0,25	1,3
Питание	Универсальное	Универсальное	Сеть
Оформление	Переносное	Переносное	Настольное

Новая модель микрокалькулятора «Электроника МК-61» имеет большое число регистров, обширный набор микропрограмм для вычисления различных функций и разъемы для подключения внешних устройств (носителей программ, отображения информации и т. д.).

Микрокалькуляторы предназначены для производства вычислений (инженерных расчетов). Более широкие возможности имеют микроЭВМ.

Карточка № 22.20 (175)
Микрокалькуляторы

Что ограничивает уменьшение размеров и массы микроЭВМ?	МП	326
	ОЗУ	331
	ПЗУ	339

Продолжение

	Устройства ввода — вывода	333
Где хранятся программы извлечения корня из числа, нахождения логарифма и др.?	В МП	337
	В стеке	342
	В ОЗУ	329
	В ПЗУ	338
Какой блок отсутствует у непрограммируемых микрокалькуляторов?	ОЗУ данных	332
	ОЗУ программ	328
	ПЗУ	334
	МП	341
Сколько десятичных разрядов используется для записи чисел в программируемых микрокалькуляторах?	2	336
	8	340
	Не более 8	330
	Не более 10	341
Есть ли ограничения сложности программ, используемых в программируемых микрокалькуляторах?	Есть	335
	Нет	327

§ 22.21. МИКРОЭВМ

МикроЭВМ — это универсальное средство обработки информации, используемое во всех областях народного хозяйства: в промышленном и сельскохозяйственном производстве, на транспорте, в связи, медицине, образовании, быту. Широко применяются они при организации научных, в том числе космических, исследований.

К микроЭВМ подключаются различные устройства, расширяющие ее применение. К таким устройствам относятся накопители на магнитных лентах и ферромагнитных дисках, дисплеи с многоцветными экранами, графопостроители, принтеры, сменные блоки программ. Если микроЭВМ включается в качестве звена системы автоматического управления, то на входе устанавливается аналого-цифровой, а на выходе — цифро-аналоговый преобразователь (АЦП и ЦАП).

Для унификации процессов обмена информацией с внешними устройствами и пользователем в состав микроЭВМ вводятся дополнительные блоки, шины и устанавливаются стандартные правила обмена данными. Эти буферные устройства и правила их работы называют интерфейсом. Обычно интерфейсные схемы формируются в отдельном кристалле БИС.

Типовая схема БИС интерфейса включает формирователь сигналов управления, дешифраторы и регистры, соединенные внутренними шинами с шинами внешних устройств и общей шиной микроЭВМ.

Для микроЭВМ характерны большое быстродействие, большая емкость оперативной и долговременной памяти, языки программирования высокого уровня. В качестве базовых микропроцессорных систем этих ЭВМ используются комплекты БИС серии К (К581, К586 и т. д.).

Основные данные некоторых микроЭВМ приведены в табл. 22.4.

Таблица 22.4

Параметры микроЭВМ	МикроЭВМ		
	«Электроника НЦ-80-01»	«Электроника 05-21»	«Электроника 60»
Быстродействие, тыс. опер/с	550	200	250
Разрядность, бит	32	16	16
Емкость оперативной памяти, кбайт	32	64	64
Принцип управления	Микропрограммное	Микропрограммное	Микропрограммное
Потребляемая мощность, Вт	10	20	25
Масса, кг	0,3	1,2	20

Карточка № 22.21 (72)
МикроЭВМ

Какие свойства делают микроЭВМ особенно перспективной для космических исследований?	Большая разрядность	322
	Большое быстродействие	313
	Небольшая масса и малое потребление энергии	308
	Все перечисленные	316

Продолжение

Как называется устройство, преобразующее непрерывный сигнал в последовательность двоичных чисел?	БИС	321
	ЦАП	325
	АЦП	318
	МП	310
Что позволяет стандартизировать процесс обмена информацией между МП и пользователем микроЭВМ?	ОЗУ	314
	ПЗУ	324
	Интерфейс	320
	Принцип аппаратного управления МП	309
Укажите быстродействие микроЭВМ типа «Электроника 60»	550 000 опер/с	317
	200 000 опер/с	319
	250 000 опер/с	311
Какая из перечисленных микроЭВМ оперирует 32-разрядными двоичными числами?	«Электроника НЦ-80-01»	307
	«Электроника С5-21»	315
	«Электроника 60»	323
	Все перечисленные	312

§ 22.22. РОБОТОТЕХНИКА

Внешний вид промышленного робота представлен на рис. 22.27. Устройство состоит из манипулятора 2 со схватом 1, пульта ручного управления 3, блока программного управления 4, энергетического блока и исполнительных приводов, смонтированных в корпусе 5 на неподвижном основании или шасси.

Основными конструктивными элементами робота являются: а) датчики, предназначенные для измерения и контроля пространственного положения, скоростей и других параметров движения манипулятора и схвата; б) запоминающие устройства, предназначенные для записи и хранения программы движений манипулятора, в качестве носителей информации в которых используют перфоленты, магнитные барабаны и магнитные

ленты; в) программирующие устройства, формирующие программу в процессе обучения робота; г) двигатели с электрическими, гидравлическими или пневматическими системами передачи механических сил и моментов к многозвенному манипулятору и схвату; д) исполнительные устройства с большим числом степеней свободы

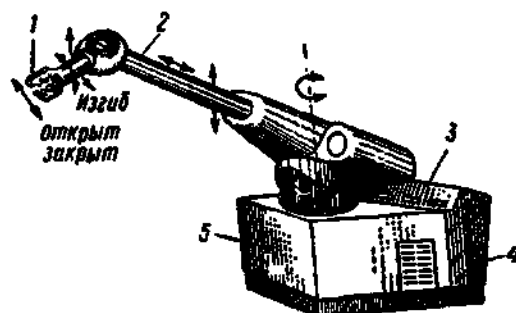


Рис. 22.27. Внешний вид промышленного манипулятора:
1 — схват; 2 — манипулятор; 3 — пульт управления; 4 — блок управления; 5 — корпус

(многозвенные манипуляторы, схваты, колесные или шагающие шасси).

В табл. 22.5 приведены некоторые технические характеристики отечественных роботов.

Таблица 22.5

Технические характеристики	Модель робота		
	УМ-1	«Универсал-50М»	ПР-10И
Количество степеней свободы	6	5	4
Точность позиционирования, мм	± 2	± 3	$\pm 0,1$
Грузоподъемность, кг	40	50	10
Потребляемая мощность, кВт	7	8,5	0,5

Карточка № 22.22 (257)
Робототехника

Укажите отличительные особенности автоматических манипуляторов	Способность заменить отдельного рабочего на малоквалифицированных и монотонных работах	349
	Способность к обучению и универсальность	344
	Все перечисленные	351
Где надо применять роботов?	В атомной промышленности	346
	В металлургии и машиностроении	354
	В тяжелых и вредных для человека условиях	348
В каких конструктивных элементах робота широко применяют электронные устройства?	В датчиках	352
	В запоминающих устройствах	356
	В программирующих устройствах	345
	Во всех перечисленных	355
Какие устройства обеспечивают роботу свободу перемещения обрабатываемой детали в пространстве?	Многозвенный манипулятор	359
	Схват	350
	Шасси	358
	Все перечисленные	360
С какой точностью промышленный робот ПР-10И способен установить деталь в требуемое положение?	± 2 мм	347
	± 3 мм	357
	$\pm 0,1$ мм	343
	$\pm 0,01$ мм	353

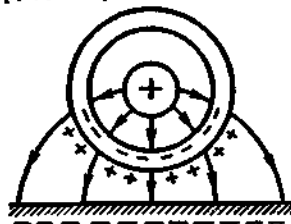
КОНСУЛЬТАЦИИ

Консультации к главе I

1. Правильно, так как в данном случае расстояние между заряженными телами значительно больше их диаметров. 2. Правильно. 3. Неверно. См. консультацию № 33. 4. Правильно, так как электрическое поле неоднородно. 5. Правильно. Емкость не зависит от напряжения: $C = \epsilon_0 \epsilon S/d$. Заряд увеличится, так как $Q = CU$. 6. Неверно, так как соотношение между емкостями конденсаторов неизвестно. 7. Неверно. Прочтите консультацию № 70. 8. Вы ошибаетесь. Вспомните общую формулу для емкости конденсатора. 9. Неправильно. Емкость плоского конденсатора не зависит от напряжения. Заряд действительно увеличится. 10. Неверно. Сила F_A имела бы такое направление, если поле создавалось уединенным точечным заряженным телом. 11. Правильно, так как направление силы, с которой поле действует на пробный заряд, совпадает с касательной к силовой линии. 12. Неверно. Вы не учли, что поле разделенных зарядов направлено навстречу внешнему полю. Разности потенциалов этих полей равны по значению и противоположны по знаку. 13. Неверно. Так как неизвестно соотношение между емкостями, ответить на вопрос нельзя. 14. Правильно. Заряд $Q = CU$, поэтому для увеличения Q при $U = \text{const}$ емкость конденсатора необходимо увеличить. 15. Неверно. В однородном поле $U_{AB} = \mathcal{E}_{AB} l_{AB}$, а в неоднородном $U_{AB} = \mathcal{E}_{\text{ср}} l_{AB}$, причем $\mathcal{E}_{\text{ср}} < \mathcal{E}_A$. 16. Неверно. Электрическое поле во внешнем по отношению к атому пространстве отсутствует. В области A поле существует, обеспечивая взаимодействие протона с электроном. 17. Правильно. 18. Неправильно. Составьте выражения для U_{AB} в случае однородного и неоднородного полей и проанализируйте их. 19. Неверно. Вспомните формулу для емкости плоского конденсатора. 20. Неверно. 21. Правильно. 22. Правильно, так как произойдет нейтрализация зарядов. 23. Неверно. Сила взаимодействия между заряженными телами обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. 24. Неверно. Работа не зависит от формы и протяженности пути в потенциальном поле. 25. Неверно. Энергия увеличится, так как возрастет общая емкость цепи, но при этом увеличится и заряд $Q = C_{\text{общ}} U$. 26. Правильно. Следует заметить, что электростатическое поле существует только во время разделения зарядов, т. е. при переходном процессе. 27. Неверно, так как $U = \text{const} = \mathcal{E}_A d_A + \mathcal{E}_B d_B$, и, следовательно, если $\mathcal{E}_B$ уменьшается, то $\mathcal{E}_A$ увеличивается. 28. Неверно. Прочтите консультацию № 36. 29. Правильно. Емкость конденсаторов увеличивается и, следовательно, $W_c = CU^2/2$ и $Q = CU$ также увеличатся. 30. Неверно. Наши изобразительные возможности ограничены, и мы показываем поле в плоскости. Фактически поле существует в пространстве. 31. Вы ошибаетесь. Во-первых, уточните физический смысл напряжения, во-вторых, выясните, зависит ли напряжение между данными точками в электрическом потенциальном поле от формы пути. 32. Неверно. Напряженность поля заряда $\mathcal{E}_R$ при увеличении R уменьшается, но не так, как показано на

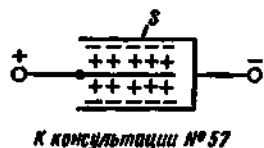
графике. 33. Неверно. Если это произойдет, то исчезнет причина поляризации и орбиты электронов вернутся в исходное состояние. Тогда снова начнется поляризация и электронные орбиты придут в колебательное движение без видимой причины. 34. Неверно. Как бы ни перемещалось пробное заряженное тело, в данном случае между направлением силы и направлением перемещения все время сохраняется угол, равный 90° , и, следовательно, работа не совершается. 35. Правильно. Эта зависимость является гиперболической. 36. Наоборот. Поле есть форма существования материи; следовательно, оно реально. Силовые линии — средство условного изображения. 37. Неверно. Необходимо сравнить не только абсолютные значения, но учитывать и знак потенциала. 38. Это невозможно, так как $U = \text{const} = \mathcal{E}_A d_A + \mathcal{E}_B d_B$. Следовательно, если $\mathcal{E}_A$ увеличивается, то $\mathcal{E}_B$ уменьшается. В данном случае, наоборот, $\mathcal{E}_A$ увеличивается, а $\mathcal{E}_B$ уменьшается. 39. Неверно. Емкость действительно не изменится. Заряд не уменьшается, а, наоборот, увеличивается. Подумайте почему. В случае затруднения прочтите консультацию № 5. 40. Неверно. Пробный заряд из точки B будет перемещаться к отрицательно заряженному телу. 41. Неверно. При параллельном соединении $C_{\text{общ}} = C_1 + C_2$. Если $C_1 \gg C_2$, то $C_{\text{общ}} \approx C_1$. 42. Грубая ошибка. Вы путаете гиперболическую зависимость с параболической. Из формулы для напряженности поля $\mathcal{E}$ уединенного заряда следует, что $\mathcal{E}$ уменьшается с увеличением R . 43. Правильно. 44. Неверно. При увеличении расстояния между пластинами емкость C уменьшается. Тогда, согласно формуле $Q = CU$, заряд Q уменьшается. Это происходит за счет того, что часть свободных электронов отрицательной пластины перетекает на положительную. 45. Неверно. Вспомните, какое поле действует между пластинами (однородное или неоднородное) и как оно определяется. Существует ли поле в металлической пластине? 46. Неверно. Применяя эту формулу, вы допускаете ошибку тем большую, чем больше расстояние l_{AB} , причем полученный результат будет превышать истинное значение. 47. Неверно. Заряд и напряжение между пластинами конденсатора связаны функциональной зависимостью $Q = CU$. Таким образом, для того чтобы увеличился заряд, следует увеличить емкость конденсатора. 48. Вы ошибаетесь. Силовые линии поля, начавшись на положительно заряженном теле, должны закончиться на отрицательно заряженном теле. Поэтому электрическое поле будет существовать и во внешнем пространстве между экраном и, например, землей, как показано на рисунке.

Причем отрицательные заряды на поверхности земли будут наведены этим полем. 49. Неверно. См. консультацию № 34. 50. Правильно. Так как электрическое поле в металлической пластине отсутствует, то пространство, в котором действует поле, уменьшается и становится равным $d - \Delta$. Разность потенциалов между пластинами $\varphi_A - \varphi_B$ не изменилась. Поле в этом случае однородное и, следовательно, $\mathcal{E} = (\varphi_A - \varphi_B)/(d - \Delta)$. До введения металлической пластины $\mathcal{E} = (\varphi_A - \varphi_B)/d$. 51. Правильно. Так как $C_{\text{общ}} = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$, то при $C_2 \ll C_1$, $C_{\text{общ}} \approx C_2$. 52. Неверно. Силовые линии являются средством условного изображения поля, так же как, например, меридианы и параллели географической карты. 53. Правильно. Прочтите консультацию № 70. 54. Правильно, так



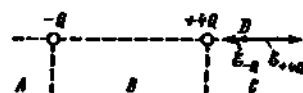
к консультации № 48

как потенциал $\varphi_A > 0$, $\varphi_B < 0$, но $|\varphi_A| = |\varphi_B|$. 55. Ошибаетесь. Вы забыли о том, что электростатическое поле в металле существовать не может. 56. Правильно. 57. Правильно. Площадь, на которой накапливается электричество, как это видно из рисунка, составляет $2S$ (см. рис.).



К консультации № 57

ния перемещения и вектора напряженности поля противоположны, поэтому $\varphi_B < 0$, но $\varphi_A > 0$, откуда $\varphi_A > \varphi_B$. 62. Неверно. Видимо, вы учитываете только увеличение заряда и забываете, что расстояние также увеличилось. 63. Неверно. Заряд конденсатора зависит не только от напряжения. 64. Неверно. Если предположить, что электрическое поле существует, то разделение зарядов будет происходить до тех пор, пока внутреннее поле не уравнивается внешнее. 65. Правильно. См. консультацию № 33. 67. Вы ошибаетесь. Как только исчезнет внешнее поле, свободные электроны притянутся к положительным зарядам атомов металла и поле разделенных зарядов внутри металла не сохранится. 68. Неверно. Ошибка при применении этой формулы тем больше, чем больше расстояние l_{AB} . Полученный результат будет меньше истинного значения. 69. Неверно. Случай б) соответствует взаимодействию точечных заряженных тел, так как расстояние между ними значительно больше их диаметров. 70. Неверно. Рассуждайте последовательно. Запас прочности определяется как $\mathcal{E}_{проб}/\mathcal{E}_p$, а $\mathcal{E}_{проб} = \text{const}$. Следовательно, необходимо выяснить, что происходит с $\mathcal{E}_p$. При пробое одного из конденсаторов все напряжение прикладывается к другому конденсатору. При этом $\mathcal{E}_p$ увеличивается, а запас прочности уменьшается. 71. Неверно. Допустим, что пробное заряженное тело находится в точке D (см. рис.).



К консультации № 71

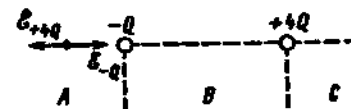
При этом сила, с которой заряд $4Q$ действует на пробное заряженное тело, больше силы, с которой на это же заряженное тело действует заряд $-Q$. И хотя эти силы направлены в разные стороны, уравновеситься они не могут. 72. Правильно. 73. Неверно. Емкость конденсаторов известна. 74. Неверно. Данный конденсатор можно рассматривать как конденсатор, состоящий из двух пластин площадью $2S$ и расстоянием между пластинами d . 75. Неверно. Вы забыли, что напряженность поля — величина векторная. 76. Правильно, так как в первом случае напряженность поля убывает. 77. Правильно, так как под действием силового поля орбитальные электроны покидают орбиты и становятся свободными. 78. Неверно. Проанализируйте внимательно закон Кулона. 79. Правильно. В этом случае экран и землю можно рассматривать как одно общее проводящее тело, а так как электростатическое поле в проводнике существовать не может, между экраном и землей нет разности потенциалов; следовательно, отсутствует и поле (см. рис.).

80. Вы просто не подумали и пытаетесь угадывать. Вспомните формулы для энергии и заряда и проанализируйте, что произойдет с параметрами, входящими в них. 81. Неверно. В твердом диэлектрике в состоянии пробоя существуют только свободные электроны. В жидком и газообразном диэлектриках при пробое подвижностью обладают и ионы, которые образуются в результате расщепления атомов и молекул диэлектрика. 82. Неверно. Прочтите консультацию № 100. 83. Неверно. Вспомните, какие заряженные тела называются точечными. 84. Неверно. Разъяснения даны в консультации № 81. 85. Неверно. Заряд Q увеличился в 2 раза, но и расстояние между заряженными телами возросло в 2 раза. Следовательно, знаменатель в формуле $F = Qq/(4\pi\epsilon_0 R^2)$ увеличился в 4 раза. При этом сила взаимодействия между заряженными телами уменьшилась в 2 раза. 86. Неверно. Вы забыли, что в металле положительно заряженные атомы (ионы) закреплены в узлах кристаллической решетки и могут совершать только колебательное движение. 87. Неверно. Если энергия увеличивается за счет увеличения емкости, то заряд $Q = CU$ тоже увеличивается. 88. Вы ошибаетесь. Вспомните, какие заряженные тела называются точечными. 89. Правильно, так как в этой области электрическое поле обеспечивает взаимодействие протона с электроном. 90. Правильно. Во-первых, направления векторов напряженности поля зарядов $4Q$ и $-Q$ различны; во-вторых, эти векторы уравниваются по модулю, так как хотя заряд $4Q > -Q$, но и соответствующее расстояние также больше (см. рис.).



К консультации № 79

91. Вы ошибаетесь. Чем больше ϵ , тем сильнее степень поляризации диэлектрика и тем слабее результирующее поле. Следовательно, напряженность поля в слое a увеличится, а в слое b уменьшится, причем $U = \mathcal{E}_a d_a + \mathcal{E}_b d_b$. 92. Неверно, хотя орбита электрона вытянута. 93. Правильно. Емкость C уменьшается, и, следовательно, заряд $Q = CU$ также уменьшается. 94. Правильно, так как при увеличении ϵ диэлектрика сила взаимодействия между зарядами согласно закону Кулона уменьшается. 95. Неверно. См. консультацию № 90. 96. Неверно. Прочтите консультацию № 16. 97. Правильно. Орбита электрона смещена и расположена относительно положительно заряженного ядра атома несимметрично, в результате чего образуется диполь (см. рис.).



К консультации № 90

98. Правильно. 99. Неверно. При последовательном соединении $C_{общ} < C_2$. Пренебрегать можно большей емкостью C_1 . 100. Неверно. В данном случае активная площадь, т. е. площадь, на которой накапливается электричество, как это видно из рисунка к консультации № 57, составляет $2S$. 101. Правильно. 102. Правильно.



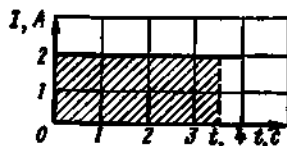
К консультации № 97



103. Это невозможно, так как векторы напряженности полей обоих зарядов направлены в одну сторону (см. рис.).
104. Неверно. См. консультацию № 86.
105. Правильно. Разъяснения даны в консультации № 48.

Консультации к главе 2

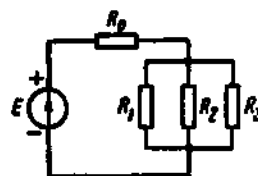
1. Правильно. Эти схемы отражают так называемый принцип наложения, суть которого состоит в следующем. Действие источников считают независимым. Определив токи, вызванные каждым источником, находим их алгебраическую сумму. Данный принцип применим для цепей, в которых все сопротивления $R = \text{const}$. 2. Неверно. Чем больше сопротивления амперметра, тем больше ток в цепи с амперметром отличается от тока в цепи без него. 3. Правильно. Разъяснения см. в консультации № 160. 4. Неверно. Это явление имеет место в проводниках второго рода, но оно не является основным. 5. Неверно. Для определения показаний каждого вольтметра необходимо рассчитывать напряжения на двух разных сопротивлениях, включенных последовательно. 6. Правильно, так как q определяется площадью заштрихованного прямоугольника (см. рис.).



К консультации № 6

7. Правильно, оба источника работают в режиме генератора. 8. Правильно.
9. Неверно. Сопротивление проводника R прямо пропорционально длине l и обратно пропорционально площади поперечного сечения S . Следовательно, если диаметр проводника увеличился в 2 раза, то площадь поперечного сечения S увеличивается в 4 раза (площадь прямо пропорциональна квадрату диаметра проводника). Таким образом, при увеличении длины и диаметра проводника в 2 раза сопротивление уменьшится тоже в 2 раза. 10. Неверно. Третье уравнение составлено для внешнего контура, который не имеет ни одного нового элемента по сравнению с двумя другими контурами, для которых составлены первое и второе уравнения. 11. Неверно. Ток, изображенный на этом графике, изменяется по значению. 12. Неверно. См. консультацию № 97. 13. Подумайте и выберите правильный ответ. 14. Неверно. Электрон, движущийся по орбите, создает ток. 15. Правильно. Сопротивление $R_{\text{дв}}$ уменьшится; следовательно, уменьшится $R_{\text{общ}} = R_1 + R_{\text{дв}}$. При этом увеличатся ток $I = U/R_{\text{общ}}$ и напряжение $U_1 = IR_1$, но уменьшится напряжение $U_{\text{дв}} = U - U_1$. 16. Вы ошибаетесь. Необходимо часы перевести в секунды. 17. Неверно. См. консультацию № 136. 18. Правильно. Поэтому, несмотря на то что число столкновений электрических зарядов растет с увеличением температуры, сопротивление уменьшается. 19. Правильно. С ростом сопротивления R_3 эквивалентное сопротивление $R_{\text{эк}} = R_1 + R_2 + R_3$ увеличивается. В результате уменьшаются ток и падения напряжения $U_1 = IR_1$; $U_2 = IR_2$. 20. Неверно. См. консультацию № 161. 21. Правильно (см. рис.).

22. Неверно. 23. Правильно. 24. Неверно. Ток, проходящий в любом сечении, одинаков и выражается формулой $I = q_0 n v S$, где q_0 — заряд электрона; n — число электронов в единице объема; v — скорость упорядоченного движения электронов; S — площадь поперечного сечения проводника. Следовательно, чем больше S , тем меньше v . 25. Неверно. Предохранитель должен расплавиться раньше, чем загорится провод, а для этого $I_{\text{пред}} < I_{\text{доп}}$. 26. Неверно. Сопротивление медного провода меньше, чем стального.



К консультаций № 21

27. Правильно. 28. Неверно. При установившейся температуре количество теплоты, выделяемое при прохождении тока, равно количеству теплоты, рассеиваемой проводом. При одинаковых значениях p и d провода увеличение длины не приводит к росту температуры; во сколько раз увеличится количество теплоты, выделяемое при прохождении тока, во столько же раз возрастет количество теплоты, рассеиваемое проводом. 29. Неправильно. 30. Неверно. Эта формула соответствует частному случаю, когда заданы напряжение и сопротивление цепи. 31. Наоборот. 32. Вы ошибаетесь. 33. Неверно. Обратите внимание на то, что соотношение сопротивлений не изменилось. 34. Правильно, так как при двух узлах можно составить всего одно узловое уравнение и два контурных. 35. Неверно. Вспомните признаки последовательного соединения сопротивлений. 36. Правильно. Если выбрать обход цепи по часовой стрелке (см. рис. 2.12), то $\varphi_c = \varphi_a - IR$, откуда разность потенциалов $\varphi_a - \varphi_c = U_{ac} = IR$. Взяв противоположное направление обхода цепи, получим $\varphi_b = \varphi_c + IR$ или $\varphi_b - \varphi_c = IR$, т. е. тот же результат, что и в первом случае. 37. Правильно. 38. Неверно. В этом случае сопротивление ветви $R_{\text{в}}$ уменьшится в 2 раза и, следовательно, ток увеличится тоже в 2 раза. Режим работы цепи будет нарушен. 39. Неверно. Эта формула соответствует частному случаю, когда заданы ток и сопротивление цепи. 40. Неверно. При таком сечении провод будет перегружен. 41. Правильно. 42. Неверно. Прочтите консультацию № 1. 43. Правильно. Так как $R=0$, полезная нагрузка отсутствует и, следовательно, вся энергия источника расходуется на его внутреннем сопротивлении, т. е. $U=0$, $E=U_{\text{вн}}$. 44. Правильно, так как это приводит к увеличению числа столкновений электронов с ионами и, следовательно, к уменьшению средней скорости движения электронов при постоянной напряженности электрического поля. Это означает, что уменьшаются ток и плотность тока J , которая, согласно закону Ома, определяется как $J = \gamma \mathcal{E}$. При $\mathcal{E} = \text{const}$ и уменьшении J уменьшается и удельная проводимость γ . 45. Неверно. Эта формула соответствует частному случаю, когда заданы напряжение и ток в цепи. 46. Грубая ошибка. Вы применили неверную формулу

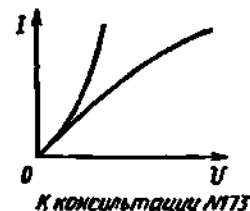
$R_{\text{эк}} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$. При параллельном соединении двух сопротивлений справедлива формула $R_{\text{эк}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$, но ведь это частный случай, так как формула для него получена из общего выражения $1/R_{\text{эк}} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$ и т. д. 47. Правильно. См. консультацию № 24. 48. Правильно, так как движение электрона упорядочено. 49. Правильно. Работа может выражаться той или иной частной формулой в зависимости от данных. 50. Вы ошибаетесь. Основной причиной является громоздкость такого реостата. 51. Правильно.

При коротком замыкании напряжение в середине линии равно нулю. 52. Вы ошибаетесь. Обратите внимание на то, что ЭДС источников действуют согласно. 53. Правильно. 54. Неверно. Первое и третье уравнения ничем не отличаются друг от друга, и фактически при трех неизвестных токах имеются два уравнения. 55. Неверно. Этим признаком характеризуются электролиты, используемые в аккумуляторах и других химических источниках электроэнергии. 56. Ответ неточен. Подумайте, чему равно сопротивление в середине линии при коротком замыкании. 57. Грубая ошибка, так как вы применили неверную формулу $R_{\Sigma} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$. 58. Правильно. 59. Неверно. Этим признаком характеризуется ионизированный разреженный газ, выполняющий функции проводника, например в лампах дневного света. 60. Неверно. Вспомните, как зависит напряжение на зажимах источника от сопротивления нагрузки. 61. Неверно. См. консультацию № 161. 62. Вы ошибаетесь, так как не учитываете того, что сопротивление провода зависит от его диаметра. 63. Неверно. Вас, возможно, вводит в заблуждение то обстоятельство, что при увеличении R_{Σ} уменьшается ток в цепи. Это так, но ведь и сопротивления всех участков также увеличатся. 64. Неверно. Вы не учитываете, что в цепи еще имеется сопротивление R_{Σ} . 65. Правильно. При разделении зарядов между ними создается электрическое поле, которое препятствует дальнейшему разделению. 66. Вы ошибаетесь. Для правильного ответа необходимо, во-первых, выяснить режим работы каждого источника, во-вторых, написать выражение для напряжения на зажимах каждого из них. 67. Неверно. См. консультацию № 9. 68. Вы ошибаетесь. Из формулы $I = q/t$ следует, что $q = It$. Таким образом, площадь прямоугольника, ограниченная графиком тока и осью времени, соответствует количеству электричества, проходящему через проводник за данное время, например I_1 (см. рис. к консультации № 6). 69. Правильно. 70. Неверно. Это возможно в том случае, когда удельные сопротивления меди и стали были бы одинаковы. 71. Вы ошибаетесь. См. консультацию № 160. 72. Правильно. 73. Вы ошибаетесь, так как не учли того, что провода линии обладают сопротивлением. 74. Неверно. Если было так, как вы думаете, то при разомкнутой цепи разделение зарядов продолжалось бы практически до бесконечности. В действительности по мере разделения зарядов возникает электрическое поле, противодействующее разделению. Когда напряженность электрического поля становится равной напряженности стороннего поля, разделение зарядов прекращается. 75. Вы ошибаетесь. См. консультацию № 88. 76. Правильно. В этом случае сопротивление ветви R_{Σ} определяется по формуле $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_4$. При $R_4 \gg R_{\Sigma}$ $1/R_4 \approx 0$. Следовательно, сопротивление R_{Σ} не зависит от сопротивления R_4 . Таким образом, режим работы цепи не меняется. 77. Неверно. 78. Неверно. Прочтите консультацию № 28. 79. Неверно. Напряжение U действует на всей ветви ABC . 80. Правильно. Положительно заряженные ионы закреплены в узлах кристаллической решетки и могут совершать только колебательные движения, а электроны внешних орбит свободны и могут перемещаться под действием сил электрического поля. 81. Правильно. Температурный коэффициент сопротивления меди α достаточно велик ($\alpha = 0,004$), поэтому при нагревании медного проводника на 10°C его сопротивление меняется на 4%. 82. Правильно. Отношение $R_{V1}/R_{V2} = 14/8$. Следовательно, общее напряжение делится в том же отношении. 83. Вы ошибаетесь. Прочтите еще раз данный параграф. 84. Правильно, так как имеет

место падение напряжения в проводах, соединяющих сопротивления R_1 и R_2 . 85. Неверно. Изменение напряженности электрического поля приводит к изменению скорости движения электронов и, следовательно, к изменению тока. При этом сопротивление проводника не меняется. 86. Неверно. 87. Неверно. Прочтите консультацию № 81. 88. Неверно. При увеличении числа ветвей проводимости цепи растет и, следовательно, увеличивается ток I , что вызывает рост напряжения $U_{\Sigma} = IR_{\Sigma}$. При этом $U = E - U_{\Sigma}$ уменьшается. 89. Правильно, так как запас энергии в конденсаторе ограничен. 90. Правильно. Разъяснение дано в консультации № 28. 91. Неверно. Оба источника находятся в одной ветви, и их можно заменить одним источником с ЭДС, равной $E_1 + E_2$. При этом сопротивления $R_1 - R_2$ образуют смешанное соединение. 92. Неверно. График выражает линейную зависимость типа $y = kx$, или в принятых координатах с учетом закона Ома $U = RI$. Следовательно, $R = \text{const}$. 93. Неверно. Если сопротивление R_2 уменьшится, то уменьшится и R_{Σ} этого разветвления. Следовательно, увеличивается ток в цепи и напряжение $U_{\Sigma} = IR_{\Sigma}$. Это приводит к уменьшению напряжения и токов I_1 и I_2 на разветвлении. 94. Неверно. Проанализируйте распределение напряжения в зависимости от сопротивления. 95. Неверно. Этим признаком характеризуются изоляторы. 96. Правильно. Это график соответствует случаю $I = \text{const}$ ($y = \text{const}$). 97. Правильно. Число узловых уравнений должно быть на единицу меньше числа узлов в схеме. Число же контурных уравнений равно четырем, так как неизвестных токов семь по числу ветвей. 98. Вы ошибаетесь. Постоянство сопротивления R_{Σ} не означает независимости потерь энергии от изменения сопротивления нагрузки. 99. Неверно. Прочтите консультацию № 74. 100. Неверно. Ток будет проходить только при разрядке конденсатора. 101. Вы ошибаетесь. Например, увеличение приложенного напряжения приводит к увеличению тока, что вызывает изменение температуры провода, а следовательно, и сопротивления. 102. Правильно. Мощность потерь $P_{\Sigma} = I^2 R_{\Sigma}$. Ток $I = E/(R + R_{\Sigma})$ зависит от сопротивления R . 103. Правильно. 104. Правильно. 105. Правильно. 106. Неверно. См. консультацию № 108. 107. Вы ошибаетесь. Законы Кирхгофа справедливы для любых электрических цепей. 108. Неверно. Следует найти удельное сопротивление материала ρ и по его значению, пользуясь табл. 2.1, определить материал. 109. Вы ошибаетесь. Ток в цепи проходить будет, но не долго, так как запас энергии в конденсаторе ограничен. 110. Вы ошибаетесь. Чем больше R_{Σ} , тем больше потери и меньше КПД. 111. Вы ошибаетесь. Ваш ответ нелогичен. Ухудшение контакта в розетке приводит к увеличению сопротивления всей цепи; следовательно, уменьшению тока. Таким образом, количество теплоты уменьшается. 112. Неверно. Вы забыли, что провода линии обладают сопротивлением. 113. Неверно. При таком соотношении загорится проводка. 114. Правильно. Признаком последовательного соединения является одинаковый ток по всей цепи. В данном случае ток в точке B разветвляется. 115. Правильно. На графике отражена зависимость $U = RI$, где $R = \text{const}$. 116. Правильно. В обоих случаях ток $I = (E_1 - E_2)/(R + R_{\Sigma1} + R_{\Sigma2})$. 117. Грубая ошибка. Если сопротивление вольтметра $R_V = 0$, то и сопротивление $R_{\Sigma} = 0$, а это изменяет режим работы цепи. 118. Неверно. 119. Вы ошибаетесь. Линия состоит из двух проводов, а вы учли только один. 120. Неверно. На левой схеме в цепи источника включена полезная нагрузка сопротивлением R и, следовательно, часть энергии источника рас-

ходуется на этой нагрузке. Для этой схемы справедливо равенство $E = U_m + U$. 121. Правильно. В этом случае предохранитель расплавится раньше, чем успеет загореться проводка. 122. Неверно. Еще раз проработайте материал данного параграфа. 123. Неверно. Напряжение на зажимах источника зависит от сопротивления нагрузки. 124. Неверно. Прочтите консультацию № 170. 125. Неверно. Приведенные графики различны и только один из них соответствует постоянному току. 126. Неправильно. Энергию выгодно передавать под большим напряжением, так как при заданной мощности $P = UI$ чем больше напряжение U , тем меньше ток I . Следовательно, можно взять провод с меньшим S . 127. Правильно. С уменьшением R_2 общее сопротивление схемы уменьшится, а ток увеличится. Следовательно, ΔU_1 увеличится, а $U_1 = U - \Delta U_1$ уменьшится. 128. Неверно. Это утверждение справедливо для проводников, изготовленных из различных металлов. Для проводников, изготовленных из одного металла, расстояние между ионами в узлах решетки не меняется, и, следовательно, при данной температуре удельное сопротивление $\rho = \text{const}$. 129. Правильно. КПД $\eta = P_{\text{пол}} / P_{\text{пол}} = (EI - PR_{\text{вт}}) / (EI)$. 130. Неверно. Ошибка заключается в том, что вы не выразили время в секундах и не учли, что количество теплоты задано в килоджоулях. 131. Неверно. Сопротивление R_1 включено параллельно ветви, образованной последовательным соединением сопротивлений R_2 и R_3 . 132. Грубая ошибка. 133. Грубая ошибка. Ток в цепи без амперметра $I = U / (R_1 + R_2)$, с амперметром $I' = U / (R_1 + R_2 + R_A)$. Так как $R_A > (R_1 + R_2)$, то $I' < I$ и режим работы цепи нарушен. 134. Вы ошибаетесь. Вспомните формулу для площади поперечного сечения провода S . 135. Неверно. Для ответа на вопрос следует рассматривать всю цепь, а не один участок. 136. Правильно, так как проводимость проводника G пропорциональна площади его поперечного сечения S . 137. Неверно. Ток в цепи с амперметром уменьшится в 2 раза, и, следовательно, режим работы изменится. 138. Правильно. Площадь поперечного сечения провода обратно пропорциональна квадрату напряжения. Следовательно, имеет место экономия материала провода. 139. Правильно. ЭДС количественно отражает работу сторонних сил и поэтому является энергетической характеристикой. 140. Правильно. 141. Правильно. Напряжение на зажимах источника E_1 , $U_1 = E_1 + IR_{\text{вт}}$, а на зажимах источника E_2 , $U_2 = E_2 - IR_{\text{вт}}$. 142. Вы ошибаетесь. Вы не обратили внимание на то, что ток уменьшается. 143. Неправильно. Выясните, в каком режиме работает каждый источник. 144. Правильно. По закону Ома, приложенное напряжение должно соответствовать напряжению участка, через который проходит ток. 145. Правильно. 146. Неправильно. Число электронов в единице объема у металлов практически не изменяется. Это свойство присуще, например, электролитам. 147. Правильно, так как удельное сопротивление материала $\rho = RS/l = 4,2 \cdot 1/10 = 0,42 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, что соответствует марганцу. 148. Правильно, так как $\Delta U = I \cdot 2R = 20 \cdot 0,05 \text{ В}$. 149. Неверно. Прочтите консультацию № 24. 150. Правильно. 151. Правильно. 152. Уравнение составлено правильно. Только приходящие токи взяты со знаком минус, а уходящие — со знаком плюс. 153. Правильно. 154. Правильно. 155. Неверно. Прочтите консультацию № 2. 156. Правильно. 157. Неверно. Вы не учитываете, что источник обладает внутренним сопротивлением. 158. Неправильно. Определите силу тока для обеих схем и убедитесь, что схемы эквивалентны. 159. Правильно. Удельное сопротивление меди относительно мало, поэтому реостаты

делают из материалов с большим удельным сопротивлением (фехраль, нихром). 160. Неверно. Воспользуемся законом Ома для всей цепи и для ее участка. Увеличение тока произошло за счет уменьшения R , так как $I = E / (R + R_{\text{вт}})$. Следовательно, внутреннее падение напряжения $U_{\text{вт}} = IR_{\text{вт}}$ увеличилось, а напряжение на зажимах цепи $U = E - IR_{\text{вт}}$ уменьшилось. 161. Правильно. На сопротивлении R_1 напряжение $U_{R1} = 0$; следовательно, все напряжение прикладывается к R_2 и R_3 . 162. Неверно. Это уравнение соответствует первому закону Кирхгофа. 163. Неверно. Ток в цепи будет проходить, но не долго. 164. Вы ошибаетесь. Прочтите консультацию № 36. 165. Правильно. 166. Правильно, так как между узлом A и сопротивлением R_2 включено еще сопротивление R_1 . 167. Неверно. См. консультацию № 108. 168. Неверно. Для того чтобы дать правильный ответ, необходимо вспомнить общую формулу для КПД $\eta = P_{\text{пол}} / P_{\text{пол}} = P_{\text{пол}} / P_{\text{пол}}$ и выразить мощности $P_{\text{пол}}$ и $P_{\text{пол}}$ через данные задачи. 169. Правильно. Законы Кирхгофа справедливы для любых электрических цепей. 170. Правильно. Закон Ома для всей цепи можно представить в виде $E = IR + IR_{\text{вт}}$. Полученное уравнение является математическим выражением второго закона Кирхгофа. 171. Неправильно. См. консультацию № 127. 172. Это вовсе не обязательно. 173. Можно, например, если вы сложите представленные на рисунке вольт-амперные характеристики, получить характеристику, близкую к линейной (см. рис.)



174. Правильно. 175. Правильно. Только выражение для второго закона Кирхгофа примет вид $\sum E = \sum U$. 176. Неверно. 177. Правильно. 178. Правильно. 179. Правильно. 180. Это вовсе не обязательно. 181. Неверно. 182. Неверно. 183. Правильно, так как линейные цепи могут рассматриваться как частный случай нелинейных. 184. Неверно. Выражение $P = I^2 R$ получено из $P = UI$ путем подстановки в него $U = IR$, найденного на основании закона Ома, который справедлив только для линейных цепей. 185. Неверно. Обратите внимание на направление E_2 . 186. Неверно. 187. Правильно. 188. Для внешних ветвей контурные токи являются реальными токами ветвей. 189. Правильно. 190. Правильно. 191. Неверно. Вы забыли, что формулы $P = I^2 R$ и $P = U^2 / R$ получены из выражения $P = UI$ на основании закона Ома, а он неприменим к нелинейным цепям. 192. Смотрите консультацию № 188. 193. Вы ошибаетесь. Применимы. Первый закон Кирхгофа отражает принцип непрерывности электрического тока, распространяемый на все электрические цепи без исключения. Второй закон Кирхгофа отражает закон сохранения энергии, также справедливый для всех электрических цепей. 194. Неверно. 195. Неверно. В этом выражении U_2 всегда берется с минусом. 196. Неправильно. Но если температурный коэффициент сопротивления мал, то применение закона Ома позволяет получить неплохую точность. 197. Правильно. 198. Неверно. Разве нельзя линейные цепи рассматривать как частный случай нелинейных? 199. Вы ошибаетесь. Выражение $P = U^2 / R$ получено из соотношения $P = UI$ путем подстановки в него $I = U / R$, найденного на основании закона Ома, который справедлив только для линейных цепей. 200. Неверно. Нельзя ответить на этот вопрос, не зная температурного коэффициента сопротивления. 201. Неверно.

1. Правильно. Это свойство является определяющим для получения сильного магнитного поля при относительно малых токах. 2. Неверно. Сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости и не может изменить ее значение. 3. Неправильно. Примените формулу для определения силы Лоренца. 4. Правильно, так как для латуни $\mu_r = \text{const}$. 5. Неверно. При $G > F$ проводник длиной l разгонится, ток I , а следовательно, и сила F увеличатся. 6. Правильно, так как составляющая вектора $\mathbf{H}$ на отрезке AB равна нулю. 7. Правильно, так как полный ток для обоих контуров одинаков. 8. Неправильно. Как бы ни был направлен вектор скорости в начальный момент времени, его можно разложить на две составляющие: одну — параллельную полю, другую — перпендикулярную ему. 9. Правильно. 10. Неверно. Цепь неразветвленная, и, следовательно, потоки не могут быть различными. 11. Неверно. Это свойство необходимо учитывать, но оно не является определяющим. 12. Неправильно. Вдумайтесь в определение полного тока. 13. Неправильно. Когда рамка находится в таком положении, на нее действует пара сил. 14. Неверно. Скорость определите из выражения $E = Bv$, откуда $v = E/(B\sin\theta)$, но $E = I(R + R_{\text{вн}})$. Силу тока I находят из формулы $F = IB\sin\theta$; $I = F/(B\sin\theta)$. При установившейся скорости груза $F = G = \text{const}$, так как масса груза не меняется. Следовательно, $I = \text{const}$ и с увеличением R растет E . Это может произойти только за счет увеличения скорости груза. 15. Вы ошиблись, так как не выкинули в условии задачи. 16. Неверно. 17. Правильно, так как полный ток для обоих контуров один и тот же. 18. Это не обязательно. ЭДС в контуре индуцируется в том случае, когда площадь, ограниченная контуром, меняется. 19. Неверно. Потери на перемагничивание практически всегда имеют место. 20. Неверно. Когда рамка повернется под действием пары сил на угол 90° , момент этой пары сил окажется равным нулю и рамка остановится, заняв вертикальное положение. 21. Неправильно. Это свойство существует, но не является определяющим с точки зрения применения. 22. Правильно. Пояснения даны в консультации № 46. 23. Правильно. Так как сила F_0 перпендикулярна скорости v_0 , происходит только изменение направления v_0 , а ее значение остается неизменным. Следовательно, сила $F_0 = q_0 B v_0$ не меняется. Но эта сила является центростремительной и определяется выражением $F_0 = m_0 v_0^2 / R$, где m_0 — масса электрона; R — радиус кривизны траектории движения электрона. Поскольку F_0 и v_0 не меняются, не меняется и R . Таким образом, траекторией движения электрона является окружность. 24. Неверно. Это соотношение соответствует установившейся постоянной скорости проводника длиной l . 25. Это невозможно. Выясните, что произойдет с магнитным сопротивлением левого стержня. 26. Правильно, так как в магнитном поле находится не весь проводник. 27. Неверно. Сила трогания F должна превышать противодействующую силу G . 28. Неверно. В проводниках, соединяющих вольтметр с проводником длиной l , возникает такая же ЭДС, как и в самом проводнике, но направленная навстречу этой ЭДС. 29. Неверно. Оба проводника с током электрически нейтральны. 30. Вы ошибаетесь. Необходимо выбрать одно и то же направление обхода, определяя и полный ток, и НС. 31. Неверно. Токи проходят в разные стороны; следовательно, их потоки взаимно ослабляются. 32. Неправильно. Вы забыли, что энергия, затрачиваемая на перемагничивание, пропорциональна площади,

ограниченной петлей гистерезиса. 33. Правильно. Соотношение $G < F$ невозможно, так как сила F имеет электромагнитную природу и возникает при движении проводника длиной l под действием силы G . 34. Неверно. 35. Неверно. Необходимо иметь в виду, что у латуни $\mu_r = \text{const} \approx 1$. 36. Неверно. Если движение зарядов упорядоченное, то возникает и магнитное поле. 37. Неправильно. В формуле присутствует ЭДС, а это означает, что двигатель уже запущен. 38. Неправильно. При $H = H_c$ выбранное утверждение ошибочно. 39. Правильно, так как полный ток для обоих случаев одинаков. 40. Правильно. 41. Неправильно. Примените закон полного тока и найдите правильный ответ. 42. Правильно. 43. Утверждение справедливо, если площадь, ограниченная контуром, не меняется. 44. Неправильно. Вы забыли, что направление тока противоположно направлению движения электронов. 45. Грубая ошибка. 46. Неверно. Если витки катушки ω_2 намотать на витки катушки ω_1 , то указанное соотношение будет выполняться. 47. Неверно, так как проводник с током электрически нейтрален. 48. Правильно. 49. Неверно. Для правильного ответа следует выяснить, чему равна ЭДС, когда ток достиг установившегося значения. 50. Неверно. Вспомните определение индуктивности. 51. Неправильно. 52. Правильно. 53. Правильно, так как скорости изменения токов в обоих случаях одинаковы. 54. Неверно. При таком расположении потоковосцепление взаимной индукции близко к нулю. 55. Правильно. 56. Правильно, так как электронный пучок обладает отрицательным зарядом. 57. Потоки Φ действительно одинаковы, но так как сечения стержней различны, различны и значения индукций, а следовательно, и напряженностей. 58. Неверно. Это уравнение отражает только реакцию нагрузки. 59. Неправильно, так как $F_0 = 0$. 60. Неверно. Магнитный поток растет; следовательно, индуцированный ток должен создавать свой магнитный поток, направленный навстречу внешнему. 61. Неправильно. Это соотношение справедливо. Оно составлено на основании первого закона Кирхгофа для магнитной цепи. 62. Грубая ошибка. Такое соотношение невозможно в принципе, так как $\Phi_{1,2}$ является частью $\Phi_{1,1}$. 63. Правильно. 64. Неверно. Для этого контура $F = 0$. 65. Неверно. В этом случае схема будет работать в генераторном режиме. 66. Неправильно. Сила F_0 является силой, искривляющей траекторию. 67. Неверно. Прочтите консультацию № 10. 68. Неправильно. См. консультацию № 89. 69. Правильно. 70. Неверно. Заряд протона равен заряду электрона по абсолютной величине. 71. Неправильно. Кобальт относится к ферромагнитным материалам. 72. Неверно. Не хватает уравнения, отражающего расход энергии на нагрузку. 73. Правильно, так как магнитное сопротивление левого стержня больше магнитного сопротивления правого стержня. 74. Неправильно. Поле существует только внутри катушки. В этом можно убедиться, применив закон полного тока для контуров, у которых $r < R_1$ или $r > R_2$. 75. Правильно. Когда напряженность магнитного поля катушки $H = H_c$, магнитные поля катушки и сердечника одинаковы, но направлены навстречу друг другу. Таким образом, индукция результирующего поля равна нулю. 76. Неправильно. Выясните, влияет ли скорость движения рамки на скорость изменения магнитного потока, когда магнитное поле однородно. 77. Грубая ошибка. 78. Неверно. Результирующая индукция равна нулю. Следовательно, при $H \neq 0$ магнитное поле сердечника отсутствовать не может. Рассматриваемые поля уравновешивают друг друга. 79. Неверно. Вы заблуждаетесь, считая,

что ЭДС должна быть всегда направлена вдоль бруска. 80. Правильно. 81. Правильно. 82. Неверно. Для правильного ответа необходимо сравнить скорости изменения токов i_1 и i_2 . 83. Неверно. Проводники с током электрически нейтральны. 84. Правильно. 85. Правильно. Разъяснения даны в консультации № 145. 86. Правильно, так как $\Phi \propto B \cdot S_n$, где S_n — площадь поперечного сечения каркаса, которая меняется при изменении диаметра каркаса. 87. Неверно. 88. Неточный ответ. Магнитный поток убывает быстрее, чем нарастает. 89. Неверно. При отсутствии тока в цепи $F=0$ и на проводник длиной l действует неуравновешенная сила G ; следовательно, равномерное движение груза невозможно. 90. Неверно. 91. Неверно. Электроны движутся не в электрическом, а в магнитном поле. 92. Правильно. При пуске $E=0$, так как $v=0$. 93. Неверно. Проводник с током электрически нейтрален. 94. Неверно. Равноускоренное движение характеризует систему неуравновешенных сил. 95. Правильно, так как магнитное сопротивление всей цепи увеличится. 96. Правильно. 97. Правильно. 98. Неверно. Подумайте, меняется ли в данных случаях магнитный поток, пронизывающий контур. 99. Правильно, так как $\Phi_L < \Phi_0$. 100. Вы ошибаетесь. Напряженность магнитного поля H для средней линии не зависит от диаметра каркаса. 101. Неверно. Учтите знак заряда протона. 102. Правильно. 103. Неверно. После насыщения индукция B растет за счет увеличения тока катушки. 104. Правильно. 105. Неверно. Это единица потокоцепления, но не в СИ. 106. Вы ошибаетесь. Из того, что индуктивность $L = \Phi_L / I$, не следует, что она зависит от I и Φ_L . Для катушки без ферромагнитного сердечника $L = \text{const}$. 107. Правильно. 108. Неверно. См. консультацию № 251. 109. Неверно. Так как не согласуется с положением, что ЭДС равна нулю при установившемся значении тока. 110. Неверно. Прочтите консультацию № 91. 111. Правильно. 112. Неверно. Ведь только часть магнитного поля тока i_1 сцеплена с витками второй катушки. 113. Неверно. Воспользуйтесь формулой для определения индуктивности катушки L . 114. Неверно. В том и другом случае поле вызвано токами в кольцевом контуре. 115. Неверно. Применили правило правой руки. 116. Правильно, так как длина контура, проходящего через точку A , меньше, чем длина контура, проходящего через точку B . 117. Неверно. См. консультацию № 106. 118. Неверно. Магнитное сопротивление левого стержня увеличится и, следовательно, Ψ уменьшится. 119. Неверно. Вы решили, что если перепад тока в первом случае больше, то ЭДС больше. Необходимо учитывать время, в течение которого меняется ток. 120. Неверно. Прочтите консультацию № 54. 121. Правильно, так как при изменении направления обхода контура меняется знак как у токов, так и у НС. 122. Это положение справедливо, хотя и неполно. 123. Неверно. ЭДС индуцироваться будет, так как сила Лоренца, действующая на орбитальные электроны, вызовет смещение электронных орбит атомов диэлектрика. 124. Неверно. Выясните, что происходит с потокоцеплением катушки Φ_L . 125. Неверно. Вы не учитываете, что проводник с током электрически нейтрален. 126. Правильно. 127. Правильно. 128. Правильно. 129. Неверно. 130. Правильно. В первый момент ток равен нулю и напряжение источника полностью уравновешивается ЭДС. По мере роста тока ЭДС уменьшается. 131. Неверно. Если возникает ток, то скорость v все время растет и, следовательно, увеличивается против-ЭДС E . Наступит момент, когда $E > U$,

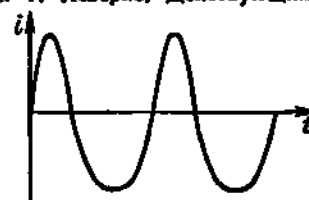
что невозможно. 132. Неверно. Магнитный поток Φ , так же как и электрический ток, является скалярной величиной. 133. Правильно. 134. Неверно. Возможно, ваш выбор основан на том, что $H_1 > H_2$, но ведь $r_1 < r_2$. 135. Неверно. Исходите из того, что индуктивность L определяется как отношение потокоцепления Φ к создающему его току I . 136. Неверно. См. консультацию № 204. 137. Неверно, так как скорость не меняется. 138. Правильно. 139. Неверно. Индуктивность $L = \Phi_L / I$, а в данном случае между индуктивностью L и током I зависимость линейная. 140. Правильно. 141. Это невозможно. Чтобы движение стало равномерным, груз сначала должен набрать необходимую скорость под действием силы F . 142. Правильно. 143. Правильно, так как $F_0 = 0$. 144. Правильно, так как в данном случае $I = 5D$. 145. Не может. После насыщения при уменьшении тока от I до $I_{\text{нас}}$ магнитная индукция B изменится линейно. 146. Неверно. Индуцированный ток должен создавать магнитное поле, препятствующее удалению магнита. Определив таким образом направление индуцированного поля по правилу буравчика, найдите направление тока в катушке. 147. Неверно. Для всех точек $\cos \beta_1 = 0$, и ошибка даже в случае, когда $\beta_2 \rightarrow 0$, составит 100%. 148. Правильно. 149. Неверно. Вспомните, чему равна производная от синусоидальной функции. 150. Вы ошибаетесь. В данном случае следует применить закон полного тока. 151. Правильно. 152. Неверно. При введении сердечника потокоцепление увеличивается и, следовательно, индуцированные ЭДС и ток создают поток, направленный встречно основному потоку, что приводит к уменьшению суммарного тока в катушке. 153. Правильно. 154. Неверно. Внимательней прочтите определение магнитного потока. 155. Правильно. 156. Неверно. Не только магнитное, но и электрическое поле. 157. Это невозможно, так как в катушке будет наводиться ЭДС индукции. 158. Неверно. Вихревые токи — результат явления взаимной индукции. Следовательно, их изменение вызывает ответную ЭДС в катушке. 159. Неверно. Вы забыли, что у латуни $\mu = \text{const}$ и, следовательно, зависимость между B и H линейная. 160. Вы ошибаетесь. После насыщения магнитное поле растет только в результате изменения тока в катушке. 161. Правильно. В этот момент магнитный поток, пронизывающий рамку $\Phi = 0$. 162. Неверно. Следует исходить не из длины контура, а из значения полного тока. 163. Неверно, так как ток зависит от сопротивления сердечника. 164. Вы ошибаетесь. В данном случае $I = 5D$, т. е. катушка длинная. 165. Неверно. Вспомните, в каком направлении действуют силы на стороны рамок. 166. Наоборот. 167. Это утверждение справедливо. 168. Правильно. 169. Правильно. 170. Неверно. Чем больше ΔI , тем больше ошибка при определении магнитного напряжения на этом участке, так как поле неоднородно. 171. Неверно. Вы забыли правила дифференцирования. 172. Неверно. См. консультацию № 100. 173. Неверно. Прочтите консультацию № 181. 174. Правильно, так как индуктивность L пропорциональна ω^2 . 175. Неверно. Это уравнение отражает только режим холостого хода. 176. Правильно. 177. Правильно. 178. Правильно, так как относительная длина проводника уменьшается. 179. Неверно. Вы не учли знак минус в выражении для ЭДС: $\epsilon = -d\Phi/dt$. 180. Правильно. Сначала сила $F > G$ и груз движется ускоренно, но по мере увеличения скорости ток I уменьшается, так как увеличивается против-ЭДС E . Наступает момент, когда $F = G$ и движение становится равномерным. 181. Неверно. В этом случае возникает

поперечная ЭДС. 182. Неверно. Разве ЭДС равна магнитному потоку? 183. Неверно. В этом случае возникает поперечная ЭДС. 184. Вы ошибаетесь. Значение установившейся скорости может быть получено из формулы $U = E + IR_m$, где $E = Bv$. Тогда $Bv = U - IR_m$, откуда $v = (U - IR_m)/(B\ell)$. Сила сопротивления груза при установившейся скорости $G = F$, а $F = BIl$. Следовательно, чем больше $G = F$, тем больше ток I и меньше скорость v . 185. Правильно. 186. Неверно. Это утверждение справедливо, когда поле однородно, а контур образован ломаными прямыми. 187. Правильно, так как F увеличивается, что вызывает возрастание тока и, следовательно, уменьшение противо-ЭДС $E = Bv$. 188. Неправильно, так как поле внутри трубы отсутствует. 189. Правильно. Напряжение $U = E$ задано, а $E = Bv$. Следовательно, $v = U/(B\ell)$. 190. Неправильно, так как косинусы соответствующих углов малы. 191. Неправильно. Никель относится к ферромагнитным материалам. 192. Вы ошибаетесь, так как, видимо, считаете, что напряжение зависит от длины участка. 193. Правильно. 194. Правильно, так как поле вне катушки отсутствует. 195. Правильно, так как магнитное состояние сердечника после насыщения не изменяется. 196. Неправильно. Кривая I соответствует физике явления перемангничивания. 197. Правильно. 198. Правильно, так как токи I_1 и I_2 имеют один знак, а ток I_3 — другой. 199. Неправильно. Магнитное сопротивление левого стержня больше магнитного сопротивления правого стержня и поэтому $\Phi_2 > \Phi_1$. 200. Правильно. 201. Неправильно, так как направление, в котором проводник с током пронизывает поверхность, не влияет на полный ток. 202. Неверно. Воспользуйтесь следующей формулой для энергии магнитного поля катушки $W_L = \Phi_L I / 2$, где $L I = \Phi_L$. 203. Неверно. При данном направлении токов подвижная рамка не может поворачиваться против часовой стрелки. 204. Наоборот. В сердечнике индуцируется ток, который создает магнитный поток, направленный против индуцирующего его увеличивающего магнитного потока катушки. 205. Правильно, так как $W_L = L I^2 / 2$, но $L I = \Phi_L$, а потоко-сцепление в катушке со стальным сердечником больше потоко-сцепления в катушке без сердечника. 206. Неправильно, так как относительная длина проводника в этом случае увеличивается. 207. Неверно, читайте консультацию № 158, 208. Правильно, так как в данном случае площадь, ограниченная петлей гистерезиса, равна нулю. 209. Неправильно. См. консультацию № 161. 210. Неверно. 211. Неверно. Проанализируйте формулу для энергии магнитного поля W_L катушки, учтя при этом, что индуктивность зависит от типа сердечника. 212. Неверно. В магнитном поле находится не весь проводник. 213. Правильно, так как в обоих случаях $d\Phi/dt = 0$. 214. Вы ошибаетесь. Необходимо определить площадь, ограниченную петлей гистерезиса. В данном случае эта площадь равна нулю, поэтому энергия не затрачивается. 215. Правильно, так как $\cos 30^\circ > \cos 45^\circ$. 216. Неверно. Скорость v можно определить, если известна ЭДС. 217. Неправильно, так как подвижная рамка стремится совместиться с неподвижной. 218. Правильно. Индукция B при уменьшении напряженности поля H не может увеличиваться. 219. Неправильно. 220. Правильно. 221. Правильно. 222. Неправильно. Это зависит от взаимного расположения проводника и поля. 223. Неверно. Двухзначная зависимость между $B(H)$ имеет место в пределах петли гистерезиса. 224. Это невозможно, так как рамка стремится занять вертикальное положение, при котором момент пары сил равен нулю. 225. Неправильно.

См. консультацию № 188. 226. Правильно, так как ток в кольце не проходит. 227. Правильно. 228. Неверно. Эта формула характеризует работу генератора. 229. Неправильно. 230. Неверно. См. консультацию № 116. 231. Неверно. Поле вне катушки отсутствует. В этом можно убедиться, применив закон полного тока. 232. Неверно. Ведь ЭДС взаимной индукции зависит от M , которая, в свою очередь, зависит от магнитных свойств среды. 233. Правильно. 234. Неправильно. 235. Неправильно. В случае Б действует как электромагнитная, так и электрическая сила. 236. Вы ошибаетесь. Это утверждение справедливо, хотя неполно. 237. Правильно, так как в пределах очень малого отрезка Δl поле можно считать однородным. 238. Правильно. 239. Неверно. Равнозамедленное движение характеризует систему неуравновешенных сил. 240. Вы ошибаетесь. Хотя ЭДС индукции индуцируется в кольце, ток в нем не проходит и, следовательно, противодействующий магнитный поток не возникает. 241. Неверно. Вы должны, пользуясь графиком зависимости Φ_L от I , определить отношение Φ_L/I для нескольких значений тока, а затем построить график $L = \Phi_L/I$ в зависимости от тока I . 242. Неверно. Это уравнение характеризует работу двигателя под нагрузкой. 243. Правильно, так как полный ток для любого контура с $r < R$ равен нулю. 244. Вы ошибаетесь. Проведите через точку A окружность и примените закон полного тока для обоих случаев. 245. Правильно, так как магнитный поток является скалярной характеристикой магнитного поля. 246. Правильно. 247. Неправильно. Ошибкой считается разность между приближенным и точным значениями H , а для точки B она будет больше. 248. Неправильно. Необходимо рассчитать напряжение для обоих участков и сравнить результаты. 249. Неправильно. Для этого контура HC равна нулю. 250. Неверно. Читайте консультацию № 147. 251. Правильно.

Консультации к главе 4

1. Неверно. При $I = 0$ зависимость $i_0 = I_m \sin \pi/4$ соответствует графику. Дальнейший ход графика тока не соответствует зависимости $i = I_m \sin(\omega t + \pi/4)$. 2. Неверно. При $\omega_1 \neq \omega_2$ угол между вращающимися векторами непрерывно изменяется и, следовательно, также меняется длина суммарного вектора. Отсюда ясна бессмысленность определения суммарного вектора в какой-то один момент времени. 3. Неверно. Чтобы вращающийся вектор стал изображением синусоидальной величины, его угловая скорость должна быть равна частоте вращения. 4. Правильно. Начальная фаза отсчитывается от положительного направления оси Ox . 5. Правильно. 6. Неверно. Подумайте, от чего зависит потеря, возникающая при перемагничивании стали. 7. Неверно. Действующим значением мы располагаем, так как длина вектора на диаграмме равна действующему значению. 8. Неверно. Представьте себе, что, например, половину круга вектор ускоряет свое движение, а затем замедляет его. Тогда временная развертка вектора примет вид, показанный на рисунке.



К консультации № 8

9. Неверно. С увеличением μ , возрастает ЭДС самоиндукции в проводнике, а следовательно, коэффициент ζ . 10. Правильно, так как максимум i_2 левее максимума i_1 , причем $\varphi = 3\pi/4 < \pi$. 11. Правильно. Объяснение дано в консультации № 41. 12. Неверно. 13. Правильно. Длина вектора U на обеих диаграммах одинакова, поэтому сдвиги фаз между векторами сохраняются. Изменяются только начальные фазы векторов, а это несущественно. 14. Неверно. Мы находим сумму векторов для каждого мгновения t , следовательно, учитываем изменение длины суммарного вектора. 15. Неверно. При выборе ответа следует думать, а не угадывать. 16. Неверно. Эта формула справедлива, если катушка имеет один виток. 17. Неверно. Вспомните соотношение между электрическим и пространственным углами. 18. Грубая ошибка. 19. Правильно. 20. Неверно. При вращательном движении заряды движутся все время в одну сторону. 21. Неверно. 22. Правильно, так как $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$, а I_m и φ определяют из векторной диаграммы. 23. Неверно. Вы не учли, что в генераторе две пары полюсов, а не одна. 24. Вы ошибаетесь. Для определения Δt сдвиг фаз $\varphi = 45^\circ$ необходимо выразить в радианах. 25. Неверно. Эта формула справедлива только для постоянного тока, когда скорость движения зарядов не изменяется. 26. Правильно. 27. Неверно. При этом возникают большие потери на перемагничивание якоря. 28. Вы ошибаетесь. Сдвиги фаз между векторами U , U_1 и U_2 на обеих диаграммах одинаковы. Различны только начальные фазы векторов, а это несущественно. 29. Неверно. Оба тока оказывают одинаковое тепловое действие. 30. Правильно. 31. Неправильно. Это соотношение справедливо только для синусоидального тока. 32. Грубая ошибка. 33. Неверно. В формуле отсутствует знак минус, отражающий принцип Ленца. 34. Правильно. 35. Неверно. Удельное сопротивление ρ определяется структурой материала проводника и остается неизменным. 36. Неправильно. Эта формула может быть использована для приближенного определения переменного тока. Точная формула $i = dq/dt$. 37. Правильно. 38. Неверно. С областью B сцеплены магнитные потоки всех трех областей, с областью B — магнитные потоки областей B и A ; с областью A сцеплен только ее магнитный поток. 39. Неверно, оба тока оказывают одинаковое тепловое воздействие. 40. Правильно. 41. Вы ошибаетесь. ЭДС индукции $\mathcal{E} = -d\Phi/dt$, но $\Phi_1 = \Phi_{1m} \sin \omega t$, $\Phi_2 = \Phi_{2m} \sin \omega t$. Следовательно, $\mathcal{E}_1 = -\Phi_{1m}\omega \cos \omega t$; $\mathcal{E}_2 = -\Phi_{2m}\omega \cos \omega t$. Так как $\Phi_{1m} > \Phi_{2m}$, то $|\mathcal{E}_{1m}| > |\mathcal{E}_{2m}|$. 42. Неверно. Прочтите консультацию № 38. 43. Неверно. Если воспользоваться формулой $i = I_m \sin(\omega t + 3\pi/4)$, то при $t = 0$ $i > 0$. Это противоречит временной диаграмме. 44. Неверно. Синусоидальная развертка возможна только при $I_m = \text{const}$. 45. Правильно. Объяснение дано в консультации № 2. 46. Неверно. Чем больше d , тем больше различие плотностей тока между слоями разного сечения и тем сильнее проявляется поверхностный эффект. 47. Вы ошибаетесь. В этом случае вертикальная проекция вектора меняется не по синусоидальному закону. 48. Правильно. Скорость движения зарядов при переменном токе непрерывно меняется. 49. Неверно. При $t = 0$ зависимость $i_0 = I_m \sin(-3\pi/4)$ соответствует графику. Но дальнейший ход графика тока не соответствует зависимости $i = I_m \sin(\omega t - 3\pi/4)$. 50. Неверно. Вспомните правило сложения двух векторов. 51. Неверно. Этот вид движения характерен для постоянного тока. 52. Вы ошибаетесь. Стальной якорь обеспечивает малое магнитное сопротивление магнитной цепи генератора, что очень важно для получения требуемых тех-

нико-экономических показателей. 53. Правильно. 54. Неверно. Если векторы расположены параллельно, то результирующий вектор должен быть направлен в сторону большего вектора. 55. Неверно. Угол $2\pi r$ соответствует r периодам переменного тока. 56. Правильно. 57. Неправильно. Не путайте частоту вращения вектора с частотой вращения витка в магнитном поле. В данном случае частота вращения вектора равна частоте вращения ω . 58. Правильно. 59. Неверно. Если воспользоваться выражением $i = I_m \sin(\omega t + 130^\circ)$, то при $t = 0$ $i > 0$. Это противоречит графику. 60. Правильно. 61. Правильно, так как якорь все время перемагничивается. 62. Неверно. На любой векторной диаграмме показана начальная фаза — угол, образованный направлением вектора и положительным направлением оси Ox . 63. Вы перепутали, так как $\alpha_m = r\alpha_r$. 64. Правильно. 65. Правильно. 66. Правильно. 67. Правильно. 68. Правильно: $T = 1/f$; $\omega = 2\pi/T$. 69. Правильно. 70. Правильно. 71. Вы ошибаетесь. Вспомните признак опережения по фазе. 72. Правильно. 73. Неверно, так как $\cos(\omega t + 40^\circ) = \sin[(\omega t + 40^\circ) + 90^\circ]$ и, следовательно, $i = I_m \sin(\omega t + 130^\circ)$. 74. Правильно. 75. Правильно. 76. Неверно, так как начальная фаза $\varphi = 130^\circ$. 77. Правильно. 78. Неверно. Вспомните признак опережения по фазе. 79. Неверно. Вы не учли, что частота тока определяет число изменений тока не в 1 мин, а в 1 с. 80. Неверно. 81. Неверно. Читайте консультацию № 41.

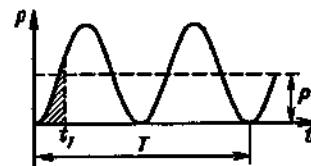
Консультации к главе 5

1. Неправильно. Вы проявляете непоследовательность: если амперметр регистрирует действующее значение тока, то и вольтметр также регистрирует действующее значение напряжения. 2. Правильно. 3. Неверно. При постоянной частоте и заданной индуктивности $X_L = 2\pi fL = \text{const}$ и от напряжения не зависит. 4. Правильно. 5. Неверно. Вспомните структуру диэлектрика. 6. Правильно. Когда синусоидальный ток проходит через нуль, скорость его изменения максимальна. 7. Неправильно. Ваш выбор был бы верен, если бы ток изменялся по закону $i = I_m \sin \omega t$. 8. Неверно. Для правильного ответа следует воспользоваться формулой для $tg \varphi$ цепи. 9. Правильно. 10. Неверно. Постоянный ток не может проходить через конденсатор конечной емкости независимо от ее значения. 11. Неверно. Показание амперметра, наоборот, увеличится, так как разорвется цепь емкостного тока, компенсирующего ток индуктивной ветви. Показание ваттметра не изменится, поскольку конденсатор практически не потребует активной энергии. 12. Правильно. 13. Вы ошиблись. Реактивное сопротивление цепи для обеих схем одинаково. 14. Вы ошибаетесь. При уменьшении R_n снижаются потери в контуре n , следовательно, уменьшается ток источника, что приводит к увеличению Z_k . 15. Неверно. Вы забыли о том, что амперметры и вольтметры при переменном токе регистрируют действующие значения тока и напряжения. 16. Неверно. Напряжение в данном случае должно иметь начальную фазу, равную нулю, а ЭДС самоиндукции — начальную фазу, равную $-\pi$. 17. Правильно. Емкость конденсатора увеличится, а емкостное сопротивление уменьшится. 18. Неверно. Вспомните, как определяется эквивалентная емкость при последовательном и параллельном соединениях конденсаторов. 19. Правильно. Сопротивление конденсатора при постоянном токе бесконечно велико, и, следовательно, все напряжение источника прикладывается к конденсатору. 20. Вы ошибаетесь. Уменьшится, но не в 4 раза. 21. Неверно. При этом соотно-

шении формулой $W=Pt$ воспользоваться можно, причем ошибка в определении W будет небольшой, не превышающей значения Pt . 22. Неверно. Введение ферромагнитного сердечника вызовет увеличение X_L и, следовательно, увеличится полное сопротивление $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$, а ток $I = U/Z$ уменьшится. Тогда напряжение $U = IR$ уменьшится, а напряжение $U_L = IX_L$ увеличится. 23. Неверно. Последовательное включение конденсатора в линию приводит к резонансу и росту тока в цепи, что, в свою очередь, влечет за собой увеличение потерь в линии. 24. Вы ошибаетесь. Во-первых, реальный вольтметр ($R_V \neq \infty$) влияет на режим работы цепи, во-вторых, максимум напряжения на катушке и конденсаторе не соответствует режиму резонанса. 25. Неверно. См. консультацию № 77. 26. Правильно. Если $X_L < X_C$, $U_L < U_C$ и сопротивление цепи носит активно-емкостный характер, т. е. вектор напряжения U отстает от вектора тока I на некоторый угол. 27. Правильно, так как включение такого вольтметра не влияет на сопротивление того участка, к которому он подключен. 28. Вы ошибаетесь. Катушку можно рассматривать как последовательное соединение индуктивности L_k и активного сопротивления R_k . При резонансе напряжения на реактивных элементах цепи равны, поэтому напряжение $U_k > U_C$. 29. Неверно. Это известная формула для определения $\cos \varphi$. 30. Неверно. Если вы учли активное сопротивление R_1 в индивидуальной ветви, то почему не учитываете наличие R_2 емкостной ветви? 31. Неверно. Было установлено, что при $R_k = 0$ $Z_k = Z_0^2/R_k = \infty$. 32. Неверно. Начальная фаза напряжения $\pi/4$. 33. Неверно. Для правильного ответа следует воспользоваться формулой для $\lg \varphi$ цепи. 34. Неверно. Уменьшение частоты f приводит к увеличению X_C , а следовательно, к росту U_C и уменьшению U_R . 35. Неверно. При уменьшении числа ламп сопротивление участка с лампами увеличивается. 36. Правильно. Полное напряжение на катушке является суммой напряжений на индуктивности и активном сопротивлении. 37. Правильно. Разъяснения см. в консультации № 130. 38. Неверно. При $R_V \neq \infty$ происходит изменение сопротивления того участка, к которому подключен вольтметр. Следовательно, изменится и ток в контуре. 39. Неверно. Вы определили потери, обусловленные всем током приемника. 40. Неверно. Вспомните формулу для собственной частоты колебания контура. 41. Правильно. Зная ток I и напряжение U , вы найдете $X_L = U/I$. Определив частоту f из формулы $X_L = 2\pi fL$, рассчитайте индуктивность. 42. Правильно. При постоянном токе ЭДС самоиндукции в катушке не индуцируется. 43. Правильно. 44. Неверно. См. консультацию № 11. 45. Неверно. Вы не учитываете, что частота источника равна нулю. Как это повлияет на напряжение U_L ? 46. Правильно. 47. Неверно. Прочтите консультацию № 88. 48. Неверно. Во-первых, соотношение между L и C строго определенное, если в цепи имеет место резонанс, т. е. $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$; во-вторых, если $R_k = 0$, то $Z_k = \infty$ и, следовательно, ток источника отсутствует. 49. Вы ошибаетесь. Это выражение справедливо, так как оно составлено для мгновенных значений. 50. Неверно. ЭДС индукции пропорциональна не току, а скорости его изменения. При максимуме тока скорость его изменения равна нулю. 51. Неверно. При нулевой частоте источника $X_L = 0$ и $U_L = I X_L = 0$. Следовательно, все напряжение источника прикладывается к резистору R и $U_R = 141$ В. 52. Грубая ошибка. Сопротивление вольтметра должно быть как можно больше, чтобы его влияние на режим работы цепи было минимальным. Идеальный

случай, когда $R_V = \infty$. 54. Правильно. При $I < I$ необходимо прибегнуть к интегрированию. В частности, расход энергии за время t_1

$W_1 = \int_0^{t_1} p dt$ пропорционален площади, заштрихованной на графике (см. рис.).



К консультации № 54

55. Вы ошибаетесь. Такое включение конденсаторов приведет к резонансу напряжений, ток в цепи возрастет и потери в линии увеличатся. 56. Правильно. Это выражение для $\sin \varphi$. 57. Неверно. В реальных условиях устройство, которое выполняет функции активного сопротивления (резистор), обладает небольшими индуктивностью и емкостью. 58. Неверно. Ваттметр регистрирует активную мощность, которая максимальна при максимальном токе. Выясните, при каком соотношении между X_L и X_C это происходит. 59. Вы ошибаетесь. Емкостное сопротивление X_C определяет связь между действующими или максимальными значениями тока и напряжения. 60. Вы ошибаетесь. Выясните, что произойдет с емкостью конденсатора при увеличении относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика. 61. Правильно. 62. Вы ошибаетесь. Взгляните на треугольник проводимостей. 63. Правильно. 64. Правильно, так как емкостный ток компенсирует ток индуктивной ветви, причем конденсатор не потребляет активной энергии. 65. Неверно. Рассуждаете формально: во-первых, $X_k = X_C$; во-вторых, токи одинаковы. Сделайте отсюда правильный вывод. 66. Неверно. Так как

$I_1 = U_1/\sqrt{R^2 + X_{L1}^2}$, $I_2 = \sqrt{(U_1/R)^2 + (U_1/X_{L1})^2}$, очевидно, что $I_2 \neq I_1$. 67. Неверно. Эта формула не дает возможности по формальным признакам отличить RC -цепь от RL -цепи. 68. Правильно. Ваттметр регистрирует активную мощность приемника. 69. Вы ошибаетесь. Если $R_k = 0$, то $Z_k = \infty$ и, следовательно, ток источника отсутствует. 70. Правильно. При выключении одной из ламп сопротивление участка с лампами увеличивается. Следовательно, напряжение на этом участке также увеличится. Напряжение на X_L при этом уменьшится. 71. Неверно. Прочтите консультацию № 58. 72. Правильно. Увеличение частоты f приводит к уменьшению X_C и, следовательно, снижению U_C и увеличению U_R . 73. Неверно. В этом случае энергия будет определена точно. 74. Правильно. Амперметр регистрирует максимум тока, соответствующий режиму резонанса. 75. Правильно. При $X_L = X_C$ ток максимален и, следовательно, мощность $P = I^2 R$ достигает максимума. 76. Правильно. 77. Вы ошибаетесь. При $R_k = 0$ полное сопротивление контура $Z_k = \infty$. 78. Правильно. 79. Вы ошибаетесь. Во-первых, вспомните, чему равно сопротивление конденсатора при постоянном токе; во-вторых, уточните, как распределяется напряжение на участках последовательного соединения. 80. Неверно. Введение ферромагнитного сердечника в катушку вызовет увеличение индуктивности L , что, в свою очередь, приведет к росту индуктивного сопротивления X_L . Продолжите рассуждения и найдите правильный ответ. 81. Вы ошибаетесь. Например, при равенстве активных сопротивлений и при $X_L = X_C$ результаты вычисления не отличаются друг от друга, т. е. нет формальных призна-

ков, отличающих эти цепи. 82. Неверно. Из показаний амперметра и вольтметра вы найдете $X_L = U/I$. Показание ваттметра равно нулю. Вам необходимо определить еще частоту источника переменного тока. 83. Вы ошибаетесь. Выключение одной лампы приводит к увеличению сопротивления этого участка. 84. Неверно. Для правильного ответа необходимо найти ток для обоих случаев и воспользоваться соответствующими формулами для P и Q . 85. Неверно. Вспомните структуру диэлектрика, а также явление поляризации. 86. Неверно. Вы допускаете двойную ошибку: во-первых, производите арифметическое сложение напряжений на разных по характеру сопротивлениях, во-вторых, не учитываете, что частота источника равна нулю. 87. Правильно. 88. Неверно. Активное сопротивление характеризуется тем, что вся энергия источника тока преобразуется в теплоту. 89. Неверно. При таком включении ваттметр регистрирует активную мощность приемника. 90. Правильно. 91. Правильно. 92. Правильно. 93. Неверно. Вы рассчитывали емкость конденсатора при резонансе напряжений, что приводит не к уменьшению тока в линии, а к его увеличению. 94. Правильно. Если $X_L \gg R$, то резонансные частоты параллельного и последовательного контуров практически совпадают. 95. Правильно. При таком включении конденсатора будет скомпенсирована реактивная составляющая тока и ток в линии уменьшится. 96. Неверно. В два раза уменьшится $\lg \phi$. Значение ϕ необходимо определить по таблице тригонометрических функций. 97. Вы ошибаетесь. В приведенной цепи нет активного сопротивления. 98. Правильно: $X_L = 2\pi fL$, где $f = 1/T$. 99. Неверно. 100. Неверно. Реактивное сопротивление для обеих схем одинаково. 101. Вы ошибаетесь. Учтите, что емкостное сопротивление при росте частоты не увеличивается, а уменьшается. 102. Вы ошибаетесь. Разве сопротивление ветви носит чисто реактивный характер? Откуда же в таком случае берется активная составляющая тока? 103. Правильно, так как $\lg \phi = 2X_L/(2R) = X_L/R = \text{const}$ и $\phi = \text{const}$. 104. Неверно. Сопротивление параллельного разветвления не может определяться по формуле $\sqrt{R_1^2 + X_{L2}^2}$. 105. Правильно. 106. Неверно. Примените формулу для собственной частоты колебаний контура. 107. Правильно. 108. Вы ошибаетесь. Примените соответствующую формулу и проанализируйте ее. 109. Неверно. Уменьшение R приводит к уменьшению U_R и увеличению U_C . 110. Вы ошибаетесь. Вспомните, как определяется эквивалентная емкость при последовательном и параллельном соединениях конденсаторов. 111. Правильно. Суммарный ток обязательно должен совпадать по фазе с напряжением, так как имеет место резонанс токов. 112. Вы ошибаетесь. В цепи с R и L вектор напряжения U опережает вектор тока I на некоторый угол. 113. Правильно. Реактивный ток приемника $I_p = I \sin \phi = 100 \cdot 0,5 = 50$ А, а потери мощности в линии $P_n = I_p^2 R_n = 2500 \cdot 0,1 = 250$ Вт. 114. Вы ошибаетесь. Уменьшение C приводит к увеличению X_C и, следовательно, к увеличению U_C и уменьшению U_R . 115. Неверно. Вспомните общее выражение для тока $i = I_m \sin(\omega t + \phi)$ и найдите значение I_m . 116. Вы ошибаетесь. Произведите расчет для обоих случаев. 117. Неверно. Рассуждайте формально: во-первых, $X_C = 1/(\omega C)$; во-вторых, токи при этом одинаковы. Сделайте отсюда правильный вывод. 118. Вы ошибаетесь. Выясните, что произойдет с емкостью конденсатора. 119. Неверно. Для приведенной схемы ток I_2 должен отставать от напряжения U на угол $\pi/2$. 120. Вы ошибаетесь. Достаточно одного амперметра, так как он регистрирует максимум тока. 121. Неверно. Вы нашли потери, обусловленные

активной составляющей тока. 122. Вы ошибаетесь. Вспомните, как определяется сопротивление контура в режиме резонанса. 123. Неверно. При постоянном токе в катушке не индуцируется ЭДС самоиндукции. 124. Неверно. Если резонансная частота последовательного контура не зависит от потерь в контуре (R_k), то резонансная частота параллельного контура зависит от R_k . При $X_{Lk} \gg R_k$ резонансные частоты параллельного и последовательного контуров практически совпадают. 125. Неверно. Показания амперметра и вольтметра дают возможность определить $X_L = U/I$, а вам необходимо найти L . 126. Неправильно. Напряжения U_R и U_L сдвинуты друг относительно друга по фазе на угол $\pi/2$ и, следовательно, подчиняются правилам векторного сложения. 127. Правильно. 128. Неверно. См. консультацию № 14. 129. Правильно. В этом случае возникает резонанс токов и ток в линии уменьшается. 130. Неверно. Чем больше емкость, тем меньше сопротивления участка, а при последовательном соединении напряжение на участках прямо пропорционально сопротивлению этих участков. 131. Правильно, так как $Z_k = Z_0^2/R_k$. 132. Правильно. Напряжения U_R и U_L — напряжения на различных по характеру сопротивлениях, поэтому они должны суммироваться по правилам векторного сложения. 133. Неверно. Если $X_L > X_C$, то $U_L > U_C$ и сопротивление цепи носит активно-индуктивный характер. 134. Неверно. При параллельном соединении ветвей напряжение на них одинаково. 135. Неверно. Прочтите консультацию № 88. 136. Вы ошибаетесь. Такое соотношение имело бы место при $C_1 = C_2$. 137. Неверно. Проанализируйте формулу для X_L . 138. Правильно, так как в режиме резонанса $Z = R$, а полное реактивное сопротивление цепи $X = 0$. 139. Неверно. Произведите расчет для обоих случаев. 140. Правильно. Знак $\sin \phi$ зависит от того, как выбрана цепь. 141. Неверно. Совсем не влияет. Вспомните, как определяется сопротивление контура в режиме резонанса. 142. Вы ошибаетесь. См. консультацию № 79. 143. Правильно. В этом случае полное сопротивление контура $Z_k = \infty$ и, следовательно, ток источника отсутствует. 144. Вы ошибаетесь. Для правильного ответа необходимо определить ток для обоих случаев и воспользоваться соответствующими формулами для P и Q . 145. Неверно. Ток в цепи с C максимален, когда конденсатор не заряжен, т. е. напряжение на нем равно нулю. 146. Правильно. 147. Вы ошибаетесь. Определите $\lg \phi$, а затем, пользуясь таблицами тригонометрических функций, найдите сдвиг фаз ϕ . 148. Правильно.

149. Правильно. Это следует из формулы $g = \frac{R}{R^2 + (1/2 \pi f C)^2}$. 150.

Правильно. При нулевой частоте источника $X_L = 0$, а следовательно, и $U_L = 0$. 151. Грубая ошибка. Если конденсатор подключен к источнику постоянного тока, то установившееся значение тока будет равно нулю, а сопротивление конденсатора бесконечно велико. 152. Неверно. Примените соответствующую формулу и проанализируйте ее. 153. Неверно. См. консультацию № 28. 154. Правильно. В данной схеме эквивалентная емкость максимальна, а сопротивление минимально.

Консультации к главе 6

1. Правильно. 2. Правильно. 3. Обмотки двигателя следует соединить звездой. 4. Правильно, при неизменных сопротивлениях токи могут измениться только при изменении напряжений. 5. Вы под-

считали активную мощность одной фазы. 6. Неверно. См. консультацию № 64. 7. Правильно, коэффициент мощности равен отношению активной мощности к полной мощности трехфазной цепи. 8. Правильно. 9. Фазное напряжение меньше линейного в 1,732 раза. 10. Правильно. 11. Правильно. 12. Правильно. 13. Воспользуйтесь формулой для мощности симметричной трехфазной цепи. 14. Учтите, что к нулевой точке может быть присоединен провод. 15. Вы нашли фазное, а не линейное напряжение. 16. Лампы окажутся под напряжением 220 В и выйдут из строя. 17. Начальная фаза определяется положением рамки в начальный момент времени. 18. При симметричной нагрузке ток в нулевом проводе равен нулю. 19. В этом случае фазные напряжения равны линейным. 20. Неправильно. См. консультацию № 93. 21. Воспользуйтесь формулой для реактивной мощности симметричной трехфазной цепи. 22. Полярная и топографическая диаграммы получаются одна из другой. 23. Вы ошиблись в выборе знаков. 24. Лампы будут гореть вполнакала. 25. Вы ошибаетесь. См. консультацию № 95. 26. Разность потенциалов равна напряжению на сопротивлении нулевого провода. 27. Воспользуйтесь выражением мощности через фазные токи и напряжения. 28. Шесть проводов требуется в несвязанной трехфазной цепи. 29. Правильно. 30. Лампы следует соединить по схеме звезды с нулевым проводом. 31. Начальные фазы ЭДС не зависят от частоты вращения рамок. 32. Правильно. 33. Напишите векторные уравнения для этой электрической цепи и найдите правильный ответ. 34. В симметричной системе ток в нулевом проводе равен нулю. 35. Воспользуйтесь выражением мощности через линейные токи и напряжения. 36. Одна диаграмма может быть получена из другой путем переноса векторов. 37. Вспомните правило знаков при записи уравнений Кирхгофа. 38. Двигатель будет перегреваться. 39. При отсутствии тока в нулевом проводе разность потенциалов равна нулю. 40. Правильно. Мощность выражается через фазные напряжения и токи. 41. При симметричной нагрузке ток в нулевом проводе отсутствует. 42. Воспользуйтесь формулой $\cos \varphi = P/S$. 43. Правильно. 44. Фазное напряжение меньше линейного в 1,732 раза. 45. Правильно. 46. Правильно. Лампы находятся под линейным напряжением 220 В. 47. Обратите внимание на то, что токи не совпадают по фазе. 48. Правильно, чтобы точки совместились, сопротивление нулевого провода должно быть бесконечно малым. 49. Правильно. 50. С началом второй соединяют конец первой обмотки. 51. Правильно. 52. Правильно, обмотки трехфазного двигателя симметричны. 53. Правильно, в рассуждениях учитываем симметрию или несимметрию нагрузки. 54. Фазный ток в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного. 55. Правильно, векторная сумма этих векторов равна нулю. 56. Правильно. 57. Линейные токи изменяются за счет изменения фазных напряжений. 58. Вы нашли полную мощность одной фазы. 59. Меняется порядок следования фаз. 60. Сумма линейных токов равна току в нулевом проводе. 61. Правильно. 62. Обратите внимание на знаки векторов. 63. Двигатель будет перегреваться. 64. Вникните в определения фазных и линейных токов. 65. Воспользуйтесь формулой, выражающей коэффициент мощности через активную и полную мощности. 66. Правильно. 67. Вы определили активную мощность. 68. Правильно. 69. Падение напряжения в нулевом проводе по закону Ома равно произведению нулевого тока на сопротивление нулевого провода. 70. Вспомните выражение для реактивной мощности. 71. Обрыв нулевого провода приводит к перераспределению токов. 72. В этом случае фазные напряжения равны

линейным. 73. Учтите знаки индуцированных ЭДС и угловой частоты вращения. 74. При соединении звездой фазное напряжение не равно линейному. 75. При соединении звездой концы обмоток объединяют в одну точку. 76. Лампы будут гореть вполнакала. 77. При симметричной нагрузке нет необходимости в нулевом проводе. 78. Это не фазное, а линейное напряжение. 79. Выберите соединение звездой с нулевым проводом. 80. Синусоидальные величины складываются векторно. 81. Выразите мощность через линейные токи и напряжения. 82. Изменение линейных токов происходит по другой причине. 83. При соединении нагрузки звездой фазный ток равен линейному. 84. Знаки начальных фаз изменились на противоположные. 85. Правильно. 86. Неверно. 87. Двигатель будет развивать неполную мощность. 88. С концом второй соединяют начало третьей обмотки. 89. Обратите внимание на направления (знаки) векторов. 90. Обмотки двигателя окажутся под напряжением, на которое не рассчитаны. 91. В общем случае ток в нулевом проводе не равен нулю. 92. Коэффициент мощности $\cos \varphi = P/S$. 93. Правильно, при отсутствии тока в нулевом проводе сумма фазных токов равна нулю. 94. Правильно. 95. Фаза — и аргумент синуса, и часть электрической цепи. 96. Правильно, разность потенциалов равна падению напряжения. 97. Вы нашли реактивную мощность одной фазы. 98. Правильно. 99. При симметричной нагрузке и при обрыве нулевого провода $I_0 = 0$. 100. Правильно, в треугольнике фазные и линейные напряжения равны. 101. Полярная и топографическая диаграммы взаимосоизменяемы, так как векторы допускают параллельный перенос. 102. Правильно. 103. Правильно. 104. Правильно. 105. Вы перепутали фазный и линейный токи. 106. Правильно.

Консультации к главе 7

1. Допустимая плотность тока определяется условиями охлаждения. 2. Магнитопровод должен иметь три стержня. 3. Линейные напряжения зависят от способа соединения обмоток. 4. Правильно. 5. Правильно. 6. Правильно, ток короткого замыкания должен быть небольшим. 7. Для трех ЭДС необходимы три различных магнитных потока. 8. Вы забыли постоянную интегрирования. 9. Правильно, магнитопровод бронзового трансформатора защищает обмотку от механических повреждений. 10. И в том и в другом случае электроэнергия легко преобразуется. 11. Вы перепутали режимы работы. 12. Реле можно подключить к трансформатору тока. 13. Максимальный магнитный поток получается при $\cos \alpha = 1$. 14. Правильно. Постоянная A определяется из физических условий. 15. Правильно, это принципиальная особенность автотрансформатора. 16. Это уравнение определяет ЭДС как функцию времени. 17. Учтите, что это понижающий трансформатор. 18. Правильно. 19. К питающей сети подсоединяют клеммы высшего напряжения трансформатора. 20. Правильно, потому что лучше отвод теплоты, выделяющейся в обмотках. 21. Напряжение может меняться от 60—70 В до 0. 22. Неправильно учтен знак интеграла. 23. Выразите коэффициент трансформации через напряжения или токи. 24. Правильно. 25. Трансформаторы применяют и в других областях техники. 26. Укажите принципиальную причину. 27. Правильно. 28. Так изменяется индуктивное сопротивление рассеяния в ТС-500. 29. Правильно. 30. Укажите и другие области применения трансформаторов. 31. Воспользуйтесь формулой $I_1 = P/U_1$; $k \approx I_1/I_2$. 32. Всегда $U_2 \leq E_2$; $U_2 \approx kE_1$.

33. Правильно, трансформатор напряжения не может работать при коротком замыкании. 34. Магнитная проводимость порошкового сердечника меньше, чем сплошного. 35. Правильно, значение Φ_m равно коэффициенту при $\cos \omega t$. 36. Учтите, что $k \neq 1$. 37. Правильно, необходимо знать, как соединены обмотки. 38. Уточните, чему равно S при таком соединении обмоток. 39. Учтите, что потери в линии пропорциональны квадрату тока. 40. Если сделать скользящий контакт, то коэффициент трансформации можно менять и у трансформатора. 41. Режимы работы этих трансформаторов определяются при расчете. 42. Правильно, повышенное напряжение особенно опасно при работе с металлическими конструкциями. 43. Это клеммы низшего напряжения трансформатора. 44. Амперметр можно подключить к трансформатору тока. 45. Тип трансформатора определяется соотношением напряжений, а не токов. 46. Вы ошиблись в вычислениях. 47. К специальным относятся, например, сварочные трансформаторы. 48. Это два различных по типу трансформатора: стержневой и броневой. 49. Посмотрите выражение для коэффициентов трансформации. 50. Правильно, в мелких зернах не могут возникать большие вихревые токи. 51. Коэффициент трансформации определяется заданными и требуемыми токами и напряжениями. 52. Правильно. 53. Правильно, этот трансформатор рассчитан на прибор с малым входным сопротивлением. 54. Объем масла в баке меняется с изменением температуры. 55. Правильно. 56. При сверхдальних передачах цепи постоянного тока выгоднее. 57. Так изменяется индуктивное сопротивление в трансформаторе СТЗ. 58. Воспользуйтесь формулой для трансформаторной ЭДС из § 7.3. 59. Правильно. 60. Правильно. 61. Вы ошиблись в вычислениях. 62. Правильно. 63. Правильно, силовые трансформаторы рассчитываются на большую мощность. 64. Учтите ток намагничивания. 65. Магнитный поток и ЭДС связаны дифференциальной зависимостью. 66. Помните, что $U_2 \leq E_2$; $U_2 \approx kU_1$. 67. Неполный ответ. 68. Правильно. 69. Это точные равенства. 70. Правильно. 71. Эти отношения равны только приближенно. 72. Именно на эти приборы рассчитан трансформатор напряжения. 73. Правильно. 74. Закон Ампера определяет механическую силу. 75. Неверно. 76. Токовая обмотка ваттметра подключается к трансформатору тока. 77. Правильно. 78. Эти трансформаторы рассчитаны на питание маломощных потребителей. 79. Выбор напряжения зависит от других причин. 80. Учтите, что коэффициент трансформации не равен единице. 81. Правильно. 82. Это только одна из областей применения трансформаторов. 83. Правильно. 84. Неполный ответ. 85. Правильно, это нужно для снижения потерь в линии электропередачи. 86. Конструктивно проще увеличить активное сопротивление обмоток. 87. Вы перепутали типы трансформаторов. 88. Правильно. 89. Правильно. 90. Правильно. 91. Правильно. Масло расширяется при нагревании. 92. Обмотку с худшими условиями охлаждения располагают снаружи. 93. Правильно, наличие магнитного шунта изменяет потоки рассеяния. 94. Правильно, тепловые потери возникают в активном сопротивлении. 95. Проанализируйте связи между напряжениями и ЭДС. 96. Правильно.

Консультации к главе 8

1. Правильно, оптимальное скольжение при этих условиях равно 10%. 2. Вы ошиблись в вычислениях. 3. При заданной магнитной индукции потери зависят от массы магнитопровода. 4. Правильно. 5. Пусковой момент в среднем равен нулю. 6. Правильно,

магнитные силовые линии выходят из северного полюса. 7. Достаточно изменить схему питания катушек. 8. Чем больше нагрузка на валу двигателя, тем меньше частота вращения ротора. 9. Четырехполюсное магнитное поле повернется на 180° за полный период. 10. Правильно. 11. Активное и индуктивное сопротивления обмотки должны быть равны. 12. Проанализируйте формулу для тока в роторе. 13. Статоры двигателей устроены одинаково. 14. Правильно, для решения задачи подставляем заданные величины в формулу для I_2 . 15. Правильно. 16. Правильно, скользящие контакты менее надежны, чем неподвижные. 17. Правильно: $r = 60f/n_1$. 18. Правильно: $I_2 = r(n_1 - n_2)/60$. 19. Правильно. 20. Ток в обмотке ротора увеличится. 21. Правильно. 22. Учтите, что одна катушка трехфазной обмотки — пусковая. 23. Без обмотки статора нет вращающегося магнитного поля. 24. Уточните, чему равен опрокидывающий момент. 25. Правильно. 26. Правильно, для решения задачи подставляем заданные величины в формулу для n_2 . 27. Правильно. 28. Правильно. 29. Правильно, при изменении скольжения меняется не только ток в обмотке ротора, но и сдвиг фаз между токами и напряжением. 30. Правильно. 31. Воспользуйтесь формулой $I_2 = sf_1$. 32. Правильно. 33. Правильно, частота вращения ротора уменьшится, скольжение увеличится. 34. Правильно. 35. Частоты вращения различаются в 2 раза. 36. Помните связь угловой частоты вращения магнитного поля с частотой тока. 37. Правильно. 38. При скольжении 0,5 сумма равна 25, при скольжении 0,75 сумма меньше 25. 39. Правильно, если ротор — постоянный магнит, то кольца и щетки не нужны. 40. Воспользуйтесь формулой $f = n_1/60$. 41. Правильно, максимальный момент равен опрокидывающему. 42. Пусковому моменту соответствует скольжение, равное единице. 43. Частота вращения ротора $n_2 = n_1 = 60f/p$. 44. Правильно. 45. Эта частота вращения равна нулю при $n_2 = n_1$. 46. Правильно, изменение r осуществляется переключением секций обмотки. 47. Правильно, $M_{\max}$ не зависит от активного сопротивления обмотки. 48. Рассмотрите магнитное поле двух катушек в двухфазной системе. 49. Чем меньше нагрузка двигателя, тем больше частота вращения ротора. 50. Правильно, сопротивление обмотки ротора влияет на скольжение. 51. Скольжение необходимо уменьшить в 10 раз. 52. Правильно, при отсутствии скольжения ЭДС в обмотке ротора не индуцируется. 53. По мере раскручивания ротора n_2 уменьшается. 54. Угловая частота вращения результирующего магнитного поля равна угловой частоте тока. 55. Правильно. 56. Вращающий момент двигателя равен нулю при нулевом скольжении. 57. Правильно, при неподвижном роторе двигатель может работать как трансформатор. 58. Правильно. 59. Определите частоту вращения магнитного поля. 60. В режиме холостого хода сокращается трение, поэтому частота вращения ротора не равна частоте вращения магнитного поля. 61. Угловая частота вращения магнитного поля равна угловой частоте двухфазного тока. 62. Правильно, однако это сложно, так как нет экономичных устройств для изменения частоты тока. 63. Учтите, что частота вращения ротора изменится. 64. Примите во внимание, что характеристика α снята при емкостной нагрузке генератора. 65. Линейная скорость пересечения стержней силовыми линиями магнитного поля в этом случае максимальна. 66. Правильно, нет необходимости индуцировать ток в роторе. 67. Воспользуйтесь формулой для оптимального скольжения. 68. Правильно. 69. Угловая скорость результирующего магнитного поля равна угловой скорости

тока. 70. Правильно. Момент $M_{\text{вр}}$ максимален. При этом начальный участок кривой зависимости вращающего момента от скольжения соответствует устойчивым режимам работы двигателя. 71. Вы ошиблись в вычислениях. 72. Правильно, образуется четырехполюсное магнитное поле ($p=2$). 73. В трехфазной системе токи сдвинуты по фазе на 120° . 74. Обмотки мощных двигателей обычно делают из меди. 75. При синхронной частоте вращения в обмотке ротора не индуцируется ток и нет вращающего момента. 76. Правильно. 77. Частота тока в обмотках ротора и статора различна. 78. Правильно. 79. Правильно. 80. Правильно. Вращающие моменты равны и направлены в противоположные стороны. 81. Правильно: $I_2 = sI_1$. 82. Правильно. 83. Зазоры для охлаждающего воздуха необходимы независимо от конструкции ротора. 84. В двухфазной системе сдвиг фаз между токами равен 90° . 85. Вы перепутали способы снятия характеристик. 86. Частота вращения равна 60 об/мин, а не 60 об/с. 87. Правильно, можно поменять местами два любых провода из трех. 88. Пришлось бы большой ток пропускать через скользящие контакты. 89. Правильно, $\omega_1 = 60f/p$. 90. В неподвижном роторе индуцируется максимальная ЭДС. 91. Проанализируйте формулу $I_{\text{гф}} = x_2/R_2 = s x_{2\text{н}}/R_2$. 92. Обмотку ротора делают из меди или алюминия. 93. Правильно. Чтобы уменьшить пусковые токи, обмотки соединяют звездой. 94. Правильно, это асинхронный пуск синхронного двигателя. 95. Правильно. 96. Правильно, в однофазной сети двигатель дает $2/3$ своей расчетной мощности. 97. Этот двигатель устойчив и при нагрузке, превышающей 1 Н·м. 98. Изменяя активное сопротивление ротора, можно менять частоту вращения двигателя. 99. Трехфазная система позволяет получить вращающееся магнитное поле. 100. Этот способ применяют при короткозамкнутой обмотке ротора. 101. Фазный ротор предусматривает плавное регулирование частоты вращения двигателя. 102. Три катушки дают двухполюсное вращающееся магнитное поле. 103. Неправильно определено скольжение относительно прямого тока. 104. Потери в стали практически не зависят от нагрузки. 105. Двигатель не запустится и перегреется. 106. Этот двигатель можно нагрузить значительно больше. 107. Правильно. 108. Вы ошиблись в вычислениях. 109. Учтите, что ток нагрузки протекал бы через скользящий контакт. 110. Правильно, если магнитопровод сделать сплошным, возникнут большие вихревые токи. 111. Двигатель можно использовать как трансформатор. 112. Правильно. 113. Характеристики сняты различными способами. 114. Правильно. 115. Вспомните определение двухфазной и трехфазной систем. 116. Число катушек статора определяет число пар полюсов. 117. При скольжении, равном единице, вращающий момент равен пусковому. 118. Правильно. 119. В этом случае ротор остановится. 120. Асинхронный двигатель включают в сеть с помощью неподвижных зажимов. 121. Правильно. 122. Вы ошиблись в вычислениях. 123. Правильно. 124. Правильно, частота вращения равна частоте вращения магнитного поля. 125. Правильно, ротор вращается с частотой вращения магнитного поля. 126. При увеличении активного сопротивления ротора скольжение увеличивается. 127. Эта частота вращения соответствует четырем полюсам. 128. Двухполюсное поле вращается быстрее четырехполюсного. 129. Ток в обмотке максимален, когда ротор неподвижен. 130. Правильно, по мере раскручивания ротора ток в его обмотке уменьшается. 131. Скольжение равно нулю при полном отсутствии тормозных моментов. 132. Правильно. 133. Правильно, индукция в зазоре

распределяется по синусоидальному закону. 134. ЭДС пропорциональна частоте вращения магнитного поля. 135. Правильно. 136. Вы перепутали схемы соединения обмоток. 137. Правильно. 138. Следует поменять местами две фазы. 139. Вы ошиблись в вычислениях. 140. Это способ ступенчатого изменения скорости. 141. Вспомните, как направлены магнитные силовые линии магнита. 142. При увеличении нагрузки частота вращения ротора уменьшится, а скольжение увеличится. 143. На эти углы поле повернется за половину периода. 144. Вы перепутали характер потерь в меди и стали. 145. Правильно, при увеличении сопротивления цепи ротора пропорционально увеличивается оптимальное скольжение. 146. Шесть катушек позволяют получить четырехполюсное поле. 147. Правильно. 148. При пуске двигателя обмотку статора следует соединить звездой. 149. Активное сопротивление обмотки ротора не зависит от скольжения. 150. Оптимальное скольжение пропорционально R_2 . 151. Учтите, что от частоты тока зависит частота вращения магнитного поля. 152. Правильно: $1,95/0,05 = 39$. 153. Правильно. 154. Правильно. 155. График этой зависимости имеет максимум, а не минимум. 156. Учтите, что ротор вращается строго с частотой вращения магнитного поля. 157. Ток в обмотке ротора зависит от скольжения, которое уменьшается. 158. Правильно, при увеличении нагрузки ЭДС и ток ротора увеличиваются. 159. С такой частотой ротор вращался бы при $p=1$. 160. Правильно. 161. При равенстве скоростей вращающий момент исчезнет. 162. При номинальной нагрузке скольжение меньше оптимального. 163. Контактные кольца используют для питания обмотки ротора. 164. Питание электромагнита производят через скользящий контакт. 165. С такой частотой ротор вращался бы при $p=2$. 166. Учтите, что магнитная индукция уменьшается при увеличении зазора. 167. Правильно. 168. Правильно. 169. Вы определили частоту вращения магнитного поля. 170. Изменение направления вращения магнитного поля и ротора легкоосуществимо. 171. Пусковой момент двигателя соответствует скольжению, равному единице. 172. Правильно. 173. Учтите индуктивное сопротивление обмотки ротора. 174. Этот способ применим только в двигателях с фазным ротором. 175. Правильно, нагрузка почти не влияет на реактивную составляющую тока. 176. Вы ошиблись в вычислениях. 177. Правильно, используют материалы с высокой электропроводностью. 178. Таким образом можно осуществить только ступенчатое регулирование. 179. Ошибка в вычислениях. 180. При уменьшении нагрузки активная составляющая тока уменьшается, а реактивная составляющая практически не зависит от нагрузки. 181. Чем выше напряжение сети, тем меньше пусковая емкость. 182. Коэффициент мощности двигателя зависит от нагрузки. 183. Меняя частоту f , можно плавно регулировать частоту вращения двигателя. 184. Магнитное поле не может иметь нечетное число полюсов. 185. Выразите скольжение через частоты вращения ротора и поля. 186. Отношение индуктивных сопротивлений равно отношению частот. 187. Индуктивное сопротивление рассеяния пропорционально скольжению. 188. Двигатель не разовьет номинального вращающего момента. 189. В формуле для расчета КПД пренебрегите добавочными потерями. 190. По правилу правой руки определяют направление ЭДС. 191. Проанализируйте график зависимости вращающего момента двигателя от скольжения. 192. Правильно, добавочные потери малы и их можно не учитывать. 193. ЭДС зависит от скольжения. 194. Найдите значение

рассматриваемой суммы при скольжении, равном 1,5. 195. Каждая фаза обмотки рассчитана на напряжение 127 В. 196. При таком значении времени ток в фазе В положителен. 197. Отметьте на графике заданные значения времени и найдите ток. 198. КПД асинхронного двигателя высок (90—95%). 199. Обратите внимание на то, что кривая $M(s)$ имеет максимум. 200. Вы ошиблись. 201. Правильно. 202. Магнитная индукция должна распределяться в зазоре по синусоидальному закону. 203. Вращающий момент зависит от напряжения питания. 204. В пределах устойчивых режимов работы асинхронный двигатель имеет жесткую механическую характеристику. 205. Это делается для увеличения пускового момента. 206. Одного этого условия недостаточно. 207. Вы забыли о законе сохранения энергии. 208. Вращающий момент не зависит от активного сопротивления обмотки. 209. Вращающий момент пропорционален квадрату напряжения, подведенного к асинхронному двигателю. 210. Проанализируйте график токов. 211. Можно ограничиться меньшей расчетной мощностью. 212. Это необходимое, но не достаточное условие. 213. Вы ошиблись в вычислениях. 214. Ошибка в вычислениях. 215. По правилу левой руки определяют направление механической силы. 216. Вы ошиблись. 217. Индуктивное сопротивление обмотки ротора пропорционально частоте тока. 218. Образуется вращающееся магнитное поле с числом пар полюсов $p=2$. 219. Скольжение ротора относительно прямого и обратного полей неодинаково. 220. Правильно. 221. Необходимо выполнение трех условий. 222. Можно получить поле с любым числом пар полюсов. 223. Правильно. 224. Правильно, чем больше частота вращения ротора, тем меньше линейная скорость пересечения стержней силовыми линиями магнитного поля. 225. Правильно. 226. Сначала найдите частоту вращения поля, затем скольжение. 227. Вспомните, что при холостом ходе $R_2=0$.

Консультации к главе 9

1. Учтите, что при увеличении R ток возбуждения увеличивается. 2. Переведите ширину щетки в метры. 3. Правильно: $c_E = pN/(60\alpha)$. 4. Правильно. 5. Вы перепутали направления смещения нейтралей у генератора и двигателя. 6. Якорь в виде целой детали был бы прочнее и проще в изготовлении. 7. Число параллельных ветвей равно числу полюсов машины. 8. Число секций равно числу пазов, число пластин — числу секций. 9. Вы перепутали рабочую и механическую характеристики. 10. Правильно: $F = B_{cr} I_1 = 2 \cdot 10 \cdot 0,05 = 1 \text{ Н}$. 11. Правильно, полагая $I_1 = 0$, находим $E_0 = 3 \text{ В}$. 12. Переведите диаметр якоря в метры. 13. Выбор такого расчетного напряжения приведет к увеличению размера катушек. 14. Вспомните, чему равна производная синусоидальной функции. 15. Правильно, ток короткого замыкания меньше критического тока. 16. Изобразите на рисунке магнитные полюсы и якоря. 17. Найдите значение ЭДС E при $I_1 = 0$. 18. Учтите, что добавляются вентиляционные потери. 19. Неправильно определен шаг по коллектору. 20. Разделите общее число проводников на число параллельных ветвей. 21. Правильно, обмотки нужно включить встречно. 22. Подумайте, как изменяются механические силы при увеличении тока. 23. Правильно, двигатели серии П рассчитывают на 220 или 110 В. 24. Решение: $E_1 = B_{cr} l v = 0,1 \cdot 1 \cdot 10 = 1 \text{ В}$. 25. Правильно, якорь может быть как

ротором, так и статором. 26. Правильно, вращающий момент пропорционален квадрату тока. 27. Это следствие реакции якоря, а не ее определение. 28. Вы указали следствие реакции якоря. 29. Вспомните закон электромагнитной индукции. 30. Вспомните условия возникновения ЭДС в проводнике. 31. При увеличении нагрузки напряжение генератора уменьшается. 32. В машинах малой мощности дополнительные полюсы не устанавливаются. 33. Время коммутации зависит от ширины щетки и линейной скорости коллектора. 34. Правильно, частота вращения двигателя обратно пропорциональна магнитному потоку возбуждения. 35. Правильно, магнитный поток добавочных полюсов пропорционален нагрузке. 36. Неполный ответ. 37. Правильно: $E = c_E \Phi =$

$= \frac{115}{15} \cdot 1500 \cdot 0,01 = 115 \text{ В}$. 38. Переведите активную длину проводника в метры. 39. Подумайте, как зависит ЭДС от частоты вращения машины. 40. Принудительное охлаждение уменьшает размеры машины. 41. Учтите, что площадь сечения магнитопровода уменьшается. 42. Правильно. 43. Ширина секции равна числу пазов, приходящемуся на полюс, а шаг по коллектору — единице. 44. Правильно, секция 3 переходит из одной параллельной ветви в другую. 45. Правильно, расчеты проводим при $b = -1/4$. 46. Переведите активную длину проводника в метры. 47. Правильно. 48. Правильно. 49. Вы не учли падения напряжения на сопротивлении якоря. 50. Вы перепутали ограничивающие факторы. 51. Наоборот, условия пуска будут более легкими. 52. Это следствие реакции якоря при насыщенной магнитной системе. 53. Правильно, пусковой момент двигателя пропорционален квадрату тока. 54. Правильно. С увеличением нагрузки напряжение уменьшается. 55. Правильно. Требования к сопротивлению щетки противоречивы. 56. Секция 2 не переходит из одной параллельной ветви в другую. 57. Проанализируйте формулу для частоты вращения двигателя. 58. Обратите внимание на расчетные напряжения машины серии П. 59. Учтите, что через R_1 и R протекают различные токи. 60. Для получения такой ЭДС необходимо, чтобы $I_2 = 0$. 61. Вспомните, как зависит результирующий магнитный поток от нагрузки. 62. Воспользуйтесь формулой для коэффициента c_m . 63. Учтите, что при отключенной нагрузке ток якоря невелик. 64. В двухслойной обмотке число секций равно числу пазов якоря. 65. Вспомните закон Ампера. 66. Ток в секции 4 сохраняет свое прежнее значение. 67. Произведите расчет в СИ. 68. Можно использовать медные кольца и щетки. 69. Магнитный поток возбуждения пропорционален току якоря. 70. При переключении секций пускового реостата меняется ток возбуждения. 71. В простой петлевой обмотке шаг по коллектору равен единице. 72. Частота вращения двигателя зависит от магнитного потока возбуждения. 73. Нагрузка двигателя может быть меньше номинальной. 74. Вращающий момент пропорционален квадрату тока якоря. 75. Физическая нейтраль смещается в сторону якоря генератора. 76. Воспользуйтесь формулами для y_1 и y_2 . 77. Обмотка последовательного возбуждения компенсирует реакцию якоря. 78. Частота вращения пропорциональна напряжению на обмотке якоря. 79. Обратите внимание на величину r . 80. Разделите ширину щетки на линейную скорость коллектора, выраженную в м/с. 81. Правильно, частота вращения обратно пропорциональна току возбуждения. 82. Правильно. 83. Правильно, при номинальной нагрузке КПД близок к макси-

муму. 84. Правильно. 85. Ротор может быть как якорем, так и индуктором. 86. Ток якоря в десятки раз превышает ток возбуждения. 87. Правильно, расчет проводим при $b=0$. 88. Учтите, что $c_M \neq c_E$. 89. Правильно. 90. Магнитное поле двигателя ослабляется под сбегающим краем полюса. 91. Число параллельных ветвей равно четырем. 92. Правильно. Такие генераторы используются в качестве сварочных. 93. При независимом возбуждении магнитный поток не зависит от нагрузки. 94. Правильно, ширину щетки делим на линейную скорость коллектора. 95. Правильно. 96. Вы ошиблись в вычислениях. 97. В этом случае реакция якоря только искажает картину поля. 98. Указанная кривая может изображать и другую зависимость. 99. Уясните влияние реакции якоря на результирующий магнитный поток. 100. Правильно. Двигатель идет «вразнос». 101. Правильно. 102. Потребляется ток на покрытие потерь холостого хода. 103. Проанализируйте формулу для вращающего момента шунтового двигателя. 104. Правильно. Рабочую точку выбирают на перегибе характеристики холостого хода. 105. Правильно. 106. Этот способ применим только при постоянной нагрузке. 107. Вы забыли щетки, без которых работа машины невозможна. 108. Восстановите картину магнитных полей полюсов и якоря. 109. Воспользуйтесь формулой для c_E . 110. В этом случае ЭДС генератора будет падать при увеличении нагрузки. 111. Правильно, магнитное поле практически не меняется. 112. Вы ошиблись в вычислениях. 113. Правильно, в генераторе поле ослабляется под набегающим краем. 114. Правильно. $U = E - IR_a = 240 - 100 \cdot 0,1 = 230$ В. 115. Воспользуйтесь формулой, связывающей ЭДС и напряжение генератора. 116. Ошибка в вычислениях. 117. В формулу следует подставить радиус якоря. 118. Правильно. 119. Уясните картину магнитных потоков у генератора. 120. Вы перепутали характеристики двигателя. 121. Проанализируйте формулу для вращающего момента двигателя. 122. В вилке индуцируется синусоидальная ЭДС. 123. В режиме холостого хода вращающий момент не равен нулю. 124. Рассчитывать машину таким образом нецелесообразно. 125. Тип обмотки определяется расчетными токами и напряжениями. 126. Положение физической нейтральной зависит от нагрузки. 127. Правильно, через R_1 протекает небольшой ток возбуждения. 128. Учтите, что производная постоянной равна нулю. 129. Правильно. Реакция якоря уменьшит результирующий поток. 130. Проанализируйте формулу для частоты вращения двигателя. 131. Правильно. 132. Вспомните определения характеристик двигателя постоянного тока. 133. Тип обмотки зависит от расчетных токов и напряжений машины. 134. Правильно. 135. Обратите внимание на то, что машина — с независимым возбуждением. 136. Вспомните, зачем нужно встречное включение обмоток. 137. Оба потока зависят от нагрузки. 138. Вспомните вид характеристик генератора с независимым возбуждением. 139. При изменении полярности полюсов меняется направление тока в обмотке якоря. 140. Изменяя полярность машины, надо изменить и направление тока. 141. Примените закон Ампера. 142. Правильно. 143. Сопротивление щетки не следует делать слишком малым. 144. Правильно. 145. Правильно, эти зависимости имеют одинаковый характер. 146. Достаточно знать число пазов и число слесей обмотки. 147. Ответ неполный. 148. Правильно. 149. Правильно, при уменьшении нагрузки частота вращения двигателя возрастает. 150. Вы перепутали области применения обмоток. 151. При таком выборе увеличатся размеры и

масса магнитной системы. 152. Правильно: $E_0 = c_E \Phi_0$. 153. Правильно, у этого двигателя вращающий момент пропорционален току якоря. 154. Правильно. 155. Правильно, ток возбуждения не зависит от сопротивления пускового реостата. 156. Основное назначение коллектора не в этом. 157. Ответ неполный. 158. Генераторы серии П имеют расчетное напряжение 115 или 230 В. 159. Правильно, смещение нейтральной различно у генераторов и двигателей. 160. Физическая нейтраль в этом случае поворачивается навстречу вращению якоря. 161. Частота вращения двигателя будет быстро увеличиваться. 162. Правильно. 163. При переключении ступеней пускового реостата не должно возникать искрение. 164. Правильно, частота вращения ротора пропорциональна приложенному напряжению. 165. Правильно. Положение физической нейтральной зависит от нагрузки. 166. Зависимость какой-либо величины от P_2 — рабочая характеристика. 167. Правильно, серийная обмотка поддерживает напряжение. 168. Правильно. 169. Число пластин коллектора равно числу пазов якоря. 170. Зависимость частоты вращения от момента — механическая характеристика. 171. Примените закон Ампера. 172. Правильно. 173. Вы перепутали характеристики. 174. Правильно. В тонких листах выше сопротивление вихревым токам. 175. Правильно. 176. Кривая 1 — внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением. 177. Коммутируется та секция, которая замкнута накоротко. 178. Обратитесь к формуле для частоты вращения двигателя.

Консультации к главе 10

1. Правильно, высокочастотные гармоники искажают форму напряжения.
2. С помощью выпрямительной схемы двигатель постоянного тока может быть включен в выходную цепь магнитного усилителя.
3. В схеме с обратной связью коэффициент усиления дифференциального магнитного усилителя примерно равен коэффициенту усиления каждого из составляющих усилителей.
4. Амплитуда тока в нагрузке не зависит от полярности тока управления.
5. Правильно.
6. Правильно, ток в нагрузке не зависит от полярности тока управления, рабочая характеристика симметрична относительно оси ординат.
7. Правильно, рабочая характеристика симметрична относительно оси ординат.
8. Правильно.
9. Учтите, что время нарастания напряжения на конденсаторе до заданного значения тем больше, чем больше постоянная времени.
10. Пьезоэлектрический датчик генерирует напряжение при деформации кристалла.
11. Измерительное устройство — принадлежность регулятора.
12. Правильно, без научного подхода создание сложных автоматов невозможно.
13. Правильно, напряжение и ток нити накала не связаны линейной зависимостью.
14. Без обмоток смещения магнитные состояния магнитопроводов всех плеч моста изменялись бы одинаково при изменении тока управления.
15. Правильно. Это одно из преимуществ дифференциальных схем.
16. Посмотрите рис. 10.25.
17. Вспомните, как определяется коэффициент усиления.
18. Учтите, что подвижность доменов ограничивается при увеличении постоянного магнитного потока управления.
19. В этом случае энергия из рабочей обмотки будет почти полностью передаваться в цепь управления (так же, как в трансформаторе энергия из одной обмотки передается в другую).
20. Найдите более строгий ответ.
21. Правильно, сигнал на выходе увеличивается скачком.
22. Правильно. Зависимость выходного сигнала от

питающего напряжения — один из недостатков потенциометрического датчика. 23. В замкнутой системе измеряется сигнал рассогласования. 24. Автоматические устройства были знакомы многим древним цивилизациям. 25. Математика играет существенную роль в теории автоматического регулирования, однако причина возникновения самой теории другая. 26. Усилитель-преобразователь относится к регулятору. 27. Термоэлектрический датчик генерирует напряжение при поддержании разности температур его спаев. 28. Сопротивление влияет на скорость нарастания тока в обмотке. 29. Неполный ответ. 30. Рабочий ток не зависит от полярности тока управления. 31. Вспомните недостатки простых (недифференциальных) магнитных усилителей. 32. Вспомните, как влияет обратная связь на коэффициент усиления. 33. Изменится фаза, но не амплитуда. 34. Вы ошиблись в вычислениях. 35. Вы правы, но для этого нужно нагрузку включить через выпрямитель. 36. Вы не учли гармоник более высокого порядка. 37. Учтите, что сопротивление нити зависит от температуры, которая, в свою очередь, зависит от тока. 38. Правильно. 39. В дифференциальной схеме ток холостого хода равен нулю. 40. Правильно, начальное подмагничивание магнитопровода приводит к увеличению тока при токе управления равном нулю. 41. Следует найти отношение изменения напряжения на выходе к изменению напряжения на входе. 42. Правильно, переменный магнитный поток уменьшается, так как ограничивается подвижностью доменов. 43. Правильно, при встречном направлении магнитных потоков энергия из рабочей обмотки не будет поступать в обмотку управления. 44. Если сигнал имеет достаточную мощность, то можно. 45. Такой случай вполне обычен. 46. Для такого вывода нет никаких оснований. 47. Правильно, это основной недостаток разомкнутой системы. 48. Первые автоматы появились значительно раньше. 49. Укажите другую причину. 50. Исполнительное устройство входит в состав регулятора. 51. В индукционном датчике при изменении магнитного потока генерируется ЭДС. 52. Правильно, увеличивается постоянная времени, а следовательно, и время срабатывания. 53. Ответ неполный. 54. Дроссельный магнитный усилитель не реагирует на полярность тока управления. 55. Степень насыщения магнитопровода зависит от тока, но не от его полярности. 56. Вспомните, зачем нужна положительная обратная связь в магнитных усилителях. 57. Полярность тока управления влияет только на фазу рабочего тока. 58. Коэффициенты усиления перемножаются при каскадном, т. е. последовательном, соединении усилителей. 59. Ошибка в вычислениях. 60. Правильно. Катушка с ненасыщенным магнитопроводом — линейный элемент, а для стабилизации нужна нелинейность. 61. Индуктивность и индуктивное сопротивление катушки с немагнитным магнитопроводом не зависят от тока. 62. Правильно. Магнитные состояния магнитопроводов одинаковы, поэтому схема находится в уравновешенном состоянии. 63. Рабочая характеристика дифференциального магнитного усилителя проходит через начало координат. 64. Учтите, что магнитопровод перейдет в более насыщенное состояние. 65. Правильно, коэффициент усиления равен отношению изменений сигналов на входе и выходе усилителя. 66. Учтите, что магнитный поток катушки управления изменяет магнитное состояние магнитопровода. 67. Направление магнитных потоков играет существенную роль. 68. Правильно, в абсолютном большинстве автоматов этот сигнал предварительно усиливается. 69. Такой случай возможен, когда по-

стоянная времени обмотки реле невелика (ее можно уменьшить искусственно). 70. Напряжение на выходе потенциометрического датчика зависит от питающего напряжения. 71. По этой линии движется сигнал прямой связи. 72. Некоторые автоматы были известны уже в древности. 73. Выделите основной стимул. 74. Правильно, в этом случае сигнал на выходе сумматора лавинообразно нарастает. 75. Правильно, индуктивный датчик относится к параметрическим. 76. Так называется реле, у которого регулируется время срабатывания. 77. Найдите более полный ответ. 78. Индуктивность рабочей обмотки зависит от степени насыщения магнитопровода, а следовательно, от тока управления. 79. Изменится магнитное состояние магнитопровода, а следовательно, и индуцируемая ЭДС. 80. Положительная обратная связь увеличивает ток холостого хода. 81. От полярности тока управления зависит фаза (а не амплитуда) рабочего тока. 82. Правильно, коэффициент усиления рассматриваемой схемы примерно равен коэффициенту усиления одного усилителя. 83. Правильно, коэффициент усиления мостовой схемы равен учетверенному коэффициенту усиления одного магнитного усилителя. 84. Катушка с ненасыщенным магнитопроводом является линейным элементом. 85. Правильно, индуктивное сопротивление такой катушки — величина постоянная. 86. Рассмотрите рабочую характеристику мостового магнитного усилителя. 87. В рабочей обмотке протекают токи двух усилителей. 88. При любой полярности тока смещения нулевой ток увеличится. 89. Проверьте свои вычисления. 90. Есть принципиальные соображения. 91. Магнитный поток обмотки управления определяется током управления. 92. Это не единственное достоинство. 93. Это только часть времени срабатывания. 94. Правильно, именно при этом условии сжатие цилиндра приведет к существенному изменению сопротивления датчика. 95. Правильно. 96. Д. Уатт изобрел центробежный регулятор скорости. 97. Правильно, другие перечисленные стимулы имеют второстепенное значение для капиталистического производства. 98. Вычитание названных сигналов — основное условие устойчивости. 99. Правильно, в двухтактной схеме напряжение на выходе зависит только от размера воздушного зазора. 100. Электронным называется реле, соединенное с электронным усилителем. 101. Однотактный усилитель не реагирует на полярность сигнала управления, это один из его недостатков. 102. Правильно. При этом индуктивное сопротивление обмотки тоже уменьшится. 103. Правильно, перематывание магнитопровода будет затруднено и рассматриваемая ЭДС уменьшится. 104. Правильно, обратная связь увеличивает нулевой ток, если она положительна. 105. При отсутствии тока в обмотке управления рабочий ток этого усилителя равен нулю. 106. Правильно, эти токи всегда направлены встречно. 107. Учтите, что изменяются сопротивления всех четырех плеч мостовой схемы. 108. Правильно, так как возрастут тепловые потери. 109. Найдите более полный ответ. 110. Назначение этого сопротивления — другое. 111. Латинское слово «дифференциальный» — значит «разностный». 112. При изменении тока в обмотке смещения изменится и нулевой ток усилителя. 113. Правильно, нужно разделить число витков обмотки управления на число витков рабочей обмотки. 114. Правильно. 115. Обмотка управления может перегореть. 116. Укажите более полный ответ. 117. Правильно. Отметим, что время нарастания тока в обмотке реле можно регулировать изменяя постоянную времени цепи. 118. В этом случае сжатие или растяжение цилиндра

мало скажется на сопротивлении тензотрического датчика. 119. В стабилизирующей системе сигнал управления не меняется с течением времени. 120. Правильно. Сделал он это на Урале в 1765 г. 121. Есть более существенный стимул. 122. Отрицательная обратная связь повышает устойчивость. 123. Ответ ошибочный. 124. Правильно. 125. Правильно. Это одна из причин, по которым собирают двухтактные схемы. 126. Индуктивность уменьшится. 127. Неверно. 128. Обратная связь существенно влияет на ток холостого хода. 129. В дифференциальном магнитном усилителе кривая зависимости рабочего тока от тока управления проходит через начало координат. 130. Совпадающие по фазе токи арифметически складываются, а нужно, чтобы вычитались. 131. Коэффициент усиления мостовой схемы больше, чем у отдельного усилителя. 132. Найдите более точный ответ. 133. Правильно, это сопротивление позволяет сбалансировать схему. 134. Правильно. Именно это позволяет устранить нулевой ток и обеспечить зависимость фазы рабочего тока от полярности тока управления. 135. Учтите, что при увеличении регулирующего сопротивления ток смещения увеличивается. 136. Отношение витков равно коэффициенту усиления по току. 137. Сплошной магнитопровод изготовить проще. 138. Правильно, усилитель будет работать как трансформатор. 139. Ответ неполный. 140. Следует еще учесть время нарастания тока в обмотке реле до тока срабатывания. 141. Вспомните, как зависит индуктивность катушки от магнитной проницаемости магнитопровода. 142. В следящей системе входной сигнал изменяется произвольным образом. 143. Это неполный ответ. 144. Это не главный стимул капиталистического производства. 145. Правильно. 146. Учтите, что токи в симметричных половинках схемы увеличились одинаково. 147. Можно однозначно сказать, какой из токов больше. 148. Необходима более сложная схема. 149. В самом принципе работы магнитного усилителя заложена необходимость питания его переменным током. 150. Правильно. Переменный магнитный поток в сплошном магнитопроводе создавал бы большие индукционные токи. 151. Правильно. Обратная связь в усилителях как дроссельного, так трансформаторного типа используется для увеличения коэффициента усиления и делается положительной. 152. Правильно, в двухтактных (дифференциальных) схемах ток нагрузки пропорционален току управления. 153. В таком случае ток в нагрузке всегда был бы равен нулю. 154. Ток управления на фазу рабочего тока не влияет. 155. Правильно, при увеличении этого сопротивления возрастают ток смещения и нулевой ток. 156. Этих данных для определения коэффициента усиления по мощности недостаточно. 157. Вспомните об индукционных токах. 158. Уясните принцип действия магнитного усилителя. 159. Правильно. Можно отметить также неограниченный срок службы, малую чувствительность к электрическим перегрузкам, практическое отсутствие эксплуатационных расходов. 160. Правильно. 161. Правильно. Это объясняется тем, что магнитная проницаемость воздуха значительно меньше магнитной проницаемости железа. 162. Правильно, регулирующий орган (например, руль) относится к регулируемому объекту. 163. Ответ неполный. 164. Если бы индуктивное сопротивление катушки не менялось, то датчик не отвечал бы своему назначению. 165. Подумайте, как сказывается на этих токах магнитное запаздывание (гистерезис). 166. Электромагнитное реле не всегда обладает указанным в вопросе свойством. 167. Этим свойством обладает более сложная схема. 168. У дроссельного

магнитного усилителя эти обмотки соединены последовательно. 169. Правильно. Сами названия «дроссельный», «трансформаторный» свидетельствуют о том, что речь идет об устройствах переменного тока. 170. Таким коэффициент усиления был бы при выключенной цепи ОС. 171. В этом случае ток управления не оказывал бы воздействия на рабочий ток. 172. Правильно, для изменения фазы рабочего тока необходимо изменить полярность тока управления. 173. Подумайте, чему был бы равен ток нагрузки в этом случае. 174. Правильно, именно дифференцированная намотка обеспечивает зависимость рабочего тока от тока управления. 175. Воспользуйтесь приведенной в тексте формулой. 176. Вы ошиблись. 177. Указанные обмотки в двухтактном усилителе не всегда электрически разведены. 178. Правильно. 179. Ответ неполный. 180. Правильно. В сложных схемах это свойство позволяет устранить или уменьшить влияние паразитных токов.

Консультации к главе 11

1. Правильно. Внешние условия влияют на точность измерения, но не характеризуют ее. 2. Неверно. В отдельных случаях ориентировка прибора относительно магнитного поля земли может заметным образом сказаться на его показаниях. 3. Неправильно. Алюминиевый каркас рамки, находящийся в магнитном поле постоянного магнита, выполняет функции демфера. 4. Неверно. Вы забыли неподвижную катушку, без которой создание вращающего момента невозможно. 5. Правильно. Преобразование показаний в цифровой код требует введения в конструкцию прибора дополнительных элементов. 6. Вы ошиблись. 7. Правильно. 8. Неверно. При равенстве потенциалов точек, к которым подсоединен гальванометр, это условие может и не выполняться. 9. Неправильно. 10. Правильно, единицу любой физической величины можно выбрать в качестве основной. 11. Неполный ответ. 12. Правильно. Наибольшая приведенная погрешность прибора равна его классу точности, выраженному в процентах, ошибка может иметь как положительный, так и отрицательный знак. 13. Правильно. Магнитные силовые линии замыкаются по экрану и не попадают внутрь прибора. 14. Неверно. Противодвигательный момент пропорционален углу отклонения подвижной системы. 15. Правильно. Быстро меняющаяся величина даже за небольшое время может существенно отклониться от выраженного в числовой форме измеренного значения. 16. Вы ошиблись. 17. При измерении мощности одним ваттметром его включают на фазные ток и напряжение. 18. Больших по сравнению с каким сопротивлением? 19. Приборы непосредственной оценки тоже градуируются в единицах измеряемой величины. 20. Неполный ответ. 21. Неполный ответ. 22. Приведенную погрешность принято выражать в процентах. 23. Зазор необходим. 24. Правильно, прибор электромагнитной системы имеет квадратичную шкалу, так как угол отклонения подвижной системы пропорционален квадрату тока. 25. Если быстро меняющуюся величину измерять через значительные промежутки времени, то ее мгновенное значение может отклониться от фиксированного. 26. Правильно. Неподвижную обмотку ваттметра наматывают из толстого провода и включают последовательно с потребителем, подвижную обмотку наматывают из провода малого сечения и включают параллельно потребителю. 27. Правильно, в схемах с нулевым проводом ваттметры включаются в каждую

фазу, а в схемах без нулевого провода — в линию. 28. Посмотрите консультацию № 128. 29. Количество потребляемой мостом энергии почти не зависит от тока в измерительной диагонали. 30. Неверно. 31. Точность измерений зависит от условий эксперимента, но характеризуется определенной величиной. 32. Правильно. Цифра выражает напряжение в киловольтах, при котором испытана изоляция прибора. 33. Вращающий момент пропорционален току через рамку. 34. Правильно, вращающий момент создается в результате взаимодействия проводников, по которым проходит ток. 35. Цифровой прибор легко сопрягается с ЭВМ. 36. Учтите, что часть напряжения падает на собственном сопротивлении вольтметра. 37. Правильно. Индуктивное сопротивление обмотки напряжения значительно больше ее активного сопротивления, а индуктивное сопротивление токовой обмотки того же порядка, что и ее активное сопротивление. 38. Градуировка прибора не может осуществляться при закороченных зажимах. 39. Правильно. На экране осциллографа можно наблюдать только периодический процесс. Для наблюдения непериодического процесса экран должен обладать послеосвещением. 40. Столько основных единиц необходимо для электротехнических, термодинамических и светотехнических измерений. 41. Сантиметр, грамм, вольт не являются основными единицами. 42. Такой знак может быть нанесен и на шкалу прибора, предназначенного для измерений в цепях постоянного тока. 43. Напряжение и ток связаны однозначной зависимостью. 44. Правильно. Если зазор между поршнем и цилиндром будет отсутствовать, то поршень и связанная с ним стрелка потеряют подвижность. Если зазор сделать большим, то перепад давлений по обеим сторонам поршня будет недостаточным для демпфирования. 45. Правильно. Представление чисел и правила арифметических действий наиболее просты в двоичной системе. 46. Правильно, при параллельном соединении шунта и амперметра через амперметр проходит ток 10 А, через шунт — в 5 раз больший (50 А). Общий максимально допустимый ток составляет 60 А. 47. Линейные напряжения измеряются непосредственно между проводами линии или между зажимами на щитке питания. 48. Правильно. Эту схему целесообразно применять в том случае, когда током вольтметра можно пренебречь по сравнению с током, проходящим через искомое сопротивление. 49. При одном и том же угле поворота зеркала перемещение светового пятна на экране тем больше, чем длиннее световой луч. 50. В СИ для электротехнических измерений используются четыре основные единицы. 51. Вольт не является основной единицей в СИ. 52. Правильно, знак является стилизованным изображением электромагнита. 53. Правильно, магнитоэлектрический прибор можно отградуировать как амперметр, вольтметр и омметр. 54. Если зазор большой, то перепад давлений по обеим сторонам поршня будет отсутствовать. 55. Представление результатов производится в десятичной системе счисления. 56. Посмотрите консультацию № 96. 57. Правильно, только в этом случае суммарная мощность трех фаз будет равна сумме показаний ваттметров. 58. При включении по этой схеме сопротивление амперметра не влияет на результат измерения. 59. Изучите оптическую схему осциллографа. 60. Система единиц величин, в которой выбрана одна основная единица, а все другие — производные, вполне возможна. 61. Качество измерительного прибора косвенным образом влияет на точность измерений, но не является характеристикой точности. 62. Правильно. Разъяснения даны в консультации № 2.

63. Противодействующий момент пропорционален углу закручивания пружины (углу поворота подвижной системы прибора). 64. Это принцип работы прибора магнитоэлектрической системы. 65. Показания цифрового прибора могут быть переданы без искажений на значительные расстояния. 66. Правильно, добавочное сопротивление в 4 раза больше внутреннего сопротивления вольтметра. 67. Тормозной момент пропорционален частоте вращения диска. 68. Правильно, вследствие изменения напряжения батареи сухих элементов стрелка омметра может отклониться от исходного нулевого значения. 69. Ток следует отнести к единице расстояния, на которое отклонился луч. 70. Столько основных единиц принято в СИ. 71. Правильно, электронизмерительные приборы применяются в этих и в еще целом ряде областей современной техники. 72. Так приборы классифицируются по их назначению. 73. Правильно, вращающий момент создается в результате взаимодействия тока в рамке с магнитным полем постоянного магнита. 74. Правильно, независимо от направления тока ферромагнитный сердечник будет втягиваться в катушку электромагнита. 75. При передаче на значительные расстояния показания прибора искажаются вследствие помех в линии. 76. Вы ошибаетесь. См. консультацию № 16. 77. Правильно. При симметричной нагрузке мощность трехфазной цепи равна утроенной мощности одной фазы; при несимметричной нагрузке два ваттметра должны быть включены на линейные токи и напряжения. 78. По отношению к какому сопротивлению малых? 79. Правильно, постоянный магнит можно заменить электромагнитом, но это нецелесообразно. 80. Ответ неполный. 81. Нужно правильно и полно сформулировать ответ. 82. Приведенная погрешность может быть и положительной, и отрицательной. 83. Магнитотвердый материал намагнитится в магнитном поле земли и будет влиять на показания прибора. 84. Вращающий момент пропорционален квадрату тока. 85. При измерении медленно меняющейся величины квант времени может быть выбран достаточно большим. 86. Правильно, независимо от схемы включения ваттметра систематическая погрешность равна 1%. 87. При измерении мощности двумя ваттметрами они должны включаться на линейные токи и напряжения. 88. Правильно. Поделив напряжение, отсчитанное по вольтметру, на ток в цепи, найдем сопротивление между точками, к которым подсоединен вольтметр. Это сопротивление равно 10 Ом, из которых 0,1 Ом приходится на сопротивление амперметра и 9,9 Ом составляет искомое сопротивление. 89. Правильно, все мостовые методы измерений характеризуются высокой точностью. 90. Дайте полный ответ. 91. Грамм, сантиметр — это не основные единицы в СИ. 92. Такой знак может быть нанесен и на шкалу вольтметра. 93. Это принцип действия приборов электродинамической системы. 94. Подумайте, изменится ли направление вращающего момента при изменении направления тока в обмотке электромагнита. 95. Точность отсчета цифрового прибора будет выше, так как отсутствуют искажения при передаче показаний на большие расстояния. 96. Правильно. 97. Ваттметры включают так, чтобы через их обмотки проходили линейные токи. 98. Неверно. 99. Правильно. Отклонение светового луча на экране пропорционально углу поворота зеркала и длине светового луча. 100. Неверно. 101. Неполный ответ. 102. Обратите внимание на то, что в первом случае стрелка находится в начале шкалы. 103. Зазор необходим для нормальной работы прибора при изменении температуры окружающей среды. 104. Правильно, эти детали создают вращающий, демп-

фирующий и противодействующий моменты. 105. Это не принципиально. Помните, например, что счетчик электрической энергии позволяет отсчитывать показания в цифровой форме, но не относится к цифровым приборам. 106. Подвижная обмотка ваттметра включается параллельно потребителю электроэнергии. 107. При наличии нулевого провода необходимо измерять мощность в каждой фазе отдельно. 108. Однофазный счетчик имеет четыре зажима: два — для подключения к сети, два — для подключения нагрузки. 109. Вы ошиблись. Воспользуйтесь формулой, выражающей сопротивление плеча через сопротивления других плеч моста. 110. Неверно. 111. Вы перепутали области применения рассматриваемых методов измерений. 112. Приведенная цифра не имеет отношения к шкале прибора. 113. Правильно. 114. На взаимодействии магнитного поля катушки и ферромагнитного сердечника основана работа прибора электромагнитной системы. 115. Принцип работы цифрового прибора легко позволяет осуществлять многоканальные измерения. 116. Вы ошиблись в вычислениях. 117. Учтите, что соотношения между индуктивным и активным сопротивлениями токовой обмотки и обмотки напряжения различны. 118. Более удобен и привычен отсчет по шкале, у которой нуль расположен слева. 119. Периодический процесс можно наблюдать на экране осциллографа. 120. Правильно. Нет смысла вводить для измерения одной и той же физической величины две (или более) различные единицы. 121. Правильно. 122. Правильно, измерение, при котором стрелка находится в правой половине шкалы, является более точным. 123. Правильно. Зазор между керном и подпятником необходим для компенсации температурных колебаний размеров оси. 124. Вы забыли указать демпфер. 125. Правильно. Именно в этом заключается физическая сущность работы цифрового прибора и его принципиальное отличие от обычных электроизмерительных приборов. 126. Перепутаны способы включения обмоток ваттметра. 127. Изучите схемы включения ваттметров для измерения мощности в трехфазных цепях. 128. Вы нашли сопротивление цепи между точками, к которым подключен вольтметр. 129. Посмотрите консультацию № 109. 130. Правильно. 131. Неполный ответ. 132. Правильно. 133. Прибор станет непригодным для измерений. 134. Вы забыли о необходимости создания демпфирующего момента. 135. Правильно, это одно из достоинств приборов электродинамической системы. 136. Для измерения реактивной мощности прибор должен быть включен по особой схеме. 137. Можно ограничиться одним ваттметром. 138. Учтите, что счетчик имеет две обмотки, причем по одной проходит ток потребителя, а к другой подводится его напряжение. 139. Правильно, одним из достоинств уравновешенного моста является отсутствие влияния напряжения питания на результат измерений. 140. Неверно. 141. Правильно. 142. Правильно. Метод сравнения неудобен в полевых условиях, так как обычно требует сложной процедуры отсчета и дополнительных вычислений. 143. Цифра знака прибора дана в киловольтах. 144. Изменять конструкцию прибора нет необходимости. 145. При отсутствии зазора между цилиндром и поршнем демпфера подвижная система прибора потеряет подвижность. 146. Вы перепутали области применения в цифровом приборе двоячной и десятичной систем счисления. 147. Учтите, что ток проходит не только через шунт, но и через параллельно ему включенный амперметр. 148. Правильно, в том случае, когда невозможно использовать естественную, создают искусственную нулевую точку. 149. Правильно,

шкалу можно сделать и обычной, усложнив механическую передачу движения от рамки к стрелке. 150. Непериодический процесс наблюдать непосредственно на экране нельзя. 151. В СИ выбрано семь основных единиц. 152. Неполный ответ. 153. Обратите внимание на то, что в первом случае стрелка находится в начале, а во втором — в конце шкалы. 154. Правильно. При замене упругих токоподводящих пружинок из фосфористой бронзы мягкой медной фольгой исчезнет противодействующий момент, и при любом токе стрелка будет отклоняться до упора. 155. Вы не предусмотрели создание противодействующего момента. 156. Приборы электродинамической системы пригодны для измерений в цепях переменного тока. 157. Электродинамический ваттметр градуируется в единицах активной мощности. 158. Учтите, что при симметричной нагрузке мощности всех трех фаз одинаковы. 159. Правильно. Счетчик имеет две клеммы для подключения к сети (генераторные клеммы) и две клеммы для подключения нагрузки. 160. Правильно. 161. Неверно. 162. Правильно. 163. Правильно. 164. Это принцип действия прибора электромагнитной системы. 165. Прибор электромагнитной системы можно использовать для измерений как в цепях переменного, так и в цепях постоянного тока. 166. Правильно. Цифровые показания прибора при передаче на большие расстояния сохраняют свое исходное значение даже при действии помех в линии. 167. Проверьте решение. 168. Ваттметры включают на фазные напряжения. 169. Правильно. В этом случае сопротивлением амперметра можно пренебречь по сравнению с измеряемым сопротивлением и считать, что найденное сопротивление равно искомому. 170. Прибор будет работать, но электромагнит менее удобен в эксплуатации, чем постоянный магнит. 171. Правильно. 172. Счетчик используют для измерения электрической энергии, потребляемой из сети. 173. Учтите, что класс точности равен приведенной погрешности прибора. 174. Токоподводящие пружинки не только замыкают электрическую цепь, но и создают противодействующий момент. 175. На взаимодействии проводников, по которым проходит электрический ток, основана работа приборов электродинамической системы. 176. Приборы электродинамической системы можно применять для измерений в цепях постоянного тока. 177. Правильно, угол отклонения стрелки пропорционален активной мощности. 178. Правильно. Ваттметр включается для измерения мощности в одной фазе. Общая мощность трехфазной цепи равна утроенной мощности одной фазы. 179. Мощность, потребляемая нагрузкой из сети, пропорциональна частоте вращения диска. 180. В уравновешенном мосту ток диагонали равен нулю. 181. Чем больше отрицательный потенциал электрода, тем меньше яркость изображения на экране. При значительном отрицательном потенциале изображение исчезает. 182. Неверно. 183. Правильно. 184. Правильно. 185. Правильно. 186. Можно, если прибор подключить через выпрямитель. 187. Поскольку каркас рамки не выполняет роль демпфера, его можно сделать пластмассовым. 188. Амперметр включается в сеть последовательно с потребителем электрической энергии. 189. См. консультацию № 233. 190. Правильно. Частота вращения диска пропорциональна мощности, потребляемой из сети. 191. Эти токи не обязательно равны при равновесии моста. 192. Правильно, период тока равен 0,02 с. Частота тока обратна периоду и в рассматриваемом случае равна 50 Гц. 193. Правильно: $E = U/I$; $[E] = В/м$. 194. Любые измерения, а не только электрические, сводятся к сравнению измеряемой величины с ее значением,

принятым за единицу. 195. Точность измерений зависит от точности отсчета, но характеризуется относительной погрешностью измерения. 196. Если бы на подвижную систему прибора действовал только вращающий момент, то стрелка отклонилась бы до упора при любом значении измеряемой величины. 197. Правильно. В приборе магнитоэлектрической системы алюминиевый каркас рамки, перемещающейся в магнитном поле, выполняет функции демпфера. Если каркас сделать пластмассовым, демпфирующий момент исчезнет и отсчет показаний прибора будет затруднен. 198. Вы забыли демпфер, без которого отсчет показаний прибора практически невозможен. 199. Правильно. 200. Пределы измерений тока расширяются кратно коэффициенту трансформации измерительного трансформатора. 201. Вращающий момент пропорционален мощности потребителя электрической энергии. 202. Правильно. Если равны разности потенциалов точек, то равны и падения напряжения между этими точками. 203. Правильно. В качестве масштаба выбирают ток, который вызывает отклонение луча на единицу длины. 204. Амперметр служит для измерения силы электрического тока. 205. Учтите, что точность измерения и точность прибора характеризуются относительной и приведенной погрешностями, которые принято выражать в процентах. 206. Вы не указали противодействующий момент. 207. Правильно, магнитоэлектрические приборы с выпрямителями используются для измерений в цепях переменного тока. 208. Правильно. В приборах электродинамической системы обычно используется воздушный демпфер, поэтому каркас рамки можно сделать пластмассовым. 209. Внутреннее сопротивление амперметра должно быть по возможности малым. 210. Правильно. 211. Число оборотов диска пропорционально энергии, а частота вращения — мощности. 212. Правильно. 213. Посмотрите консультацию № 192. 214. Это выражение можно использовать, если известны размерности электрического заряда и абсолютной диэлектрической проницаемости. 215. Вольтметр применяют для измерения напряжения. 216. Вы неправильно определили относительную погрешность измерения. 217. Правильно. Когда стрелка прибора неподвижна, демпфирующий момент, пропорциональный скорости поворота подвижной системы, равен нулю. 218. Правильно. Вращающий момент создается за счет притяжения электромагнитом ферромагнитного сердечника. 219. Правильно. В соответствии с принципом действия вольтметры и амперметры электродинамической системы имеют квадратичную шкалу, ваттметры — равномерную. 220. Ваттметры электродинамической системы имеют равномерную шкалу, а вольтметры — квадратичную. 221. Входное сопротивление вольтметра должно быть большим. 222. Электродинамический ваттметр можно использовать для измерений мощности в цепях переменного тока. 223. Энергия, потребляемая нагрузкой из сети, пропорциональна числу оборотов диска счетчика. 224. Ток гальванометра может быть равен нулю и при равенстве этих токов. 225. Правильно. 226. Здесь размерность фарада выражена через основные единицы. 227. Неопределенно. 228. Точность измерения и точность прибора характеризуются относительными величинами и не могут быть выражены в амперах. 229. Вы не указали демпфирующий момент. 230. Переменный ток будет создавать вращающий момент, изменяющийся направление с частотой тока. Вследствие инерционности подвижной системы при любом значении тока стрелка останется неподвижной. 231. Правильно. Вы указали все детали, принципиально необходимые для

работы прибора: подвижная и неподвижная катушки создают вращающий момент, пружина — противодействующий момент, демпфер — успокаивающий момент. 232. Вольтметр включается параллельно потребителю. 233. Правильно. 234. Учтите, что частота вращения диска пропорциональна мощности, потребляемой из сети. 235. Вспомните принцип работы прибора электромагнитной системы. 236. Учтите, что период равен 0,02 с. 237. Вы ошиблись. 238. Правильно, для измерений активной мощности, потребляемой в электрической цепи, служит ваттметр. 239. Приведенная погрешность прибора выражается в процентах. 240. См. консультацию № 217. 241. Это принцип действия прибора магнитоэлектрической системы. 242. Вольтметры и амперметры электродинамической системы имеют квадратичную шкалу. 243. Правильно. При таких условиях измерительные приборы вносят минимальные искажения в режим работы исследуемой схемы. 244. Электродинамический ваттметр можно использовать для измерений в цепях постоянного тока. 245. Правильно. 246. Напряжение питания не входит в условие равновесия моста. 247. При уменьшении отрицательного потенциала управляющего электрода яркость изображения увеличивается. 248. Выразите размерность абсолютной диэлектрической проницаемости через единицы механической силы, электрического заряда и расстояния. 249. Это формула, в которую входят только безразмерные величины, она определяет количество пар простых, сумма которых равна четному числу.

Консультации к главе 12

1. Поскольку площадь поперечного сечения проводов одинакова, то провод АС25 со стальным сердечником прочнее, чем алюминиевый провод А25. 2. Приведенные данные достаточно для решения задачи. 3. Правильно. 4. Правильно, ток вставки $I_n = I_{\text{расч}}/\alpha = 180/1,8 = 100$ А. 5. Правильно, 65 В в сухих помещениях, 12 В в помещениях с повышенной влажностью, в металлических кабинках и т. д. 6. Такое заземление — неоправданная затрата материалов и труда. 7. Чем выше напряжение сети, тем при прочих равных условиях меньше расход металла на провода. 8. Потеря напряжения равна разности действующих значений напряжения в начале и конце линии и при условии задачи составляет 10 В. Для определения падения напряжения данных недостаточно. 9. Учтите, что в этой линии экономия металла равна 71 %. 10. Правильно, для защиты осветительной нагрузки выбирается стандартная вставка, номинальный ток которой равен току нагрузки (или превышает его незначительно). 11. Учтите, что площадь поперечного сечения пропорциональна квадрату диаметра. 12. Вспомните, как распределяются токи при параллельном соединении ветвей. 13. Возможность маневрирования мощностью — одно из достоинств ЕЭС. 14. Вы ошиблись в вычислениях. 15. Вставка не может перегореть мгновенно. 16. Допустимый ток провода определите из условия $I_{\text{доп}} \geq 1,25 I_{\text{ном}}$, где $I_{\text{ном}} = 60$ А. 17. При параллельном соединении сопротивлений ток распределяется обратно пропорционально значениям этих сопротивлений. 18. Правильно. В указанных условиях сопротивление заземлителя не должно превышать 10 Ом. 19. Правильно. Коэффициент использования трубы выбираем исходя из приближенно принятого значения λ . 20. Основная часть электроэнергии, вырабатываемой и потребляемой в народном хозяйстве, передается с помощью сетей трехфазного тока. 21. Ошибка в вычислениях. 22. Правильно. Поскольку

масса линии обратно пропорциональна напряжению в квадрате, она будет при соединении звездой в $(\sqrt{3})^2 = 3$ раза меньше, чем при соединении треугольником. 23. Правильно. $I_{\text{ном}} = I_{\text{л}}/2,5 = 25/2,5 = 10$ А. 24. Непосредственное физиологическое воздействие на организм оказывает ток, который нарушает структуру тканей. 25. Правильно. Сопротивлением изоляции при расчетах можно пренебречь, так как оно существенно превышает и сопротивление заземления и сопротивление тела человека. 26. Правильно. 27. Правильно. Такое напряжение безопасно для человека. 28. При прочих равных условиях площадь поперечного сечения проводов линии обратно пропорциональна допустимой потере напряжения. 29. Неверно. 30. Правильно, чем меньше допустимая потеря напряжения, тем больше расчетная площадь сечения проводов (при других равных условиях). 31. Токи, меньшие $I_{\text{мин}}$, вставку не расплавляют. 32. Минимальный ток находим из условия $I_{\text{мин}} < \frac{1,5}{1,25} I_{\text{сеп}}$. 33. Правильно. Токи распределяются обратно пропорционально сопротивлению изоляции и кожи человека. 34. Воспользуйтесь формулой для расчета сопротивления трубы. 35. Укажите устройство, без которых ЕЭС принципиально невозможна. 36. Проверьте вычисления. 37. Вы ошиблись. 38. При защите от коротких замыканий номинальный ток плавкой вставки не должен превышать утроенного значения допустимого по нагреву тока провода. 39. Проверьте решение. 40. Вспомните условия срабатывания защиты из плавких предохранителей. 41. Поскольку сечения проводов одинаковы, то нужно учесть прочность металла, из которого изготовлены провода. 42. Вы ошиблись. 43. Учтите, что левая часть уравнения теплового равновесия уменьшилась в 4 раза, а правая увеличилась в 2 раза. 44. Нужно ориентироваться на сумму рабочих токов двигателя и световой нагрузки. 45. Алюминиевые провода имеют удельную проводимость примерно в 8 раз большую, чем стальные, но их прочность значительно уступает прочности стальных проводов. 46. Для определения потери напряжения нужно знать сдвиг фаз между током и напряжением нагрузки. 47. Масса двухпроводной линии в 2 раза больше, чем масса одного провода этой линии. 48. Воспользуйтесь неравенством, связывающим номинальный ток вставки и пусковой ток двигателя. 49. Переменный ток невысокой частоты опаснее, чем постоянный ток. 50. Проверьте свое решение. 51. Примерное число труб находят путем деления сопротивления трубы на сопротивление заземлителя. Полученный результат используем для определения η . 52. Найдите более полный ответ. 53. Вы не учли, что потеря напряжения вызывается прямым и обратным проводами линии. 54. Линейные напряжения, а следовательно, и массы линий различны. 55. Воспользуйтесь эмпирической формулой для номинального тока. 56. Правильно. Физиологическое воздействие оказывает ток, зависящий от напряжения и мощности источника, состояния кожи человека, влажности атмосферы и др. 57. Правильно. Токоведущие части соединяются с землей только в аварийном режиме, когда нарушается изоляция. 58. В электроэнергетическую систему электрическая сеть входит как одна из составных частей. 59. Правильно, постоянная вентиляция шахты необходима для жизни работающих в ней людей. 60. Такую массу имеет двухпроводная линия. 61. Правильно, токи, меньшие минимального, не расплавляют вставку, больше расплавляют и тем быстрее, чем больше их значение. 62. При токе 80 А предохранитель не отключит

линию от сети. 63. Это свойство — одно из достоинств ЕЭС. 64. Вы ошиблись в вычислениях, проверьте размерности величины, которые подставляют в формулу. 65. Правильно. Вставка не может быть расплавлена при токе, равном нулю, и не может перегореть за время, равное нулю. 66. Правильно. Допустимый ток провода определяется из условия, что он на четверть больше номинального тока вставки. 67. Согласно формуле для параллельного соединения сопротивлений, через тело человека проходит ток 50 мА. 68. В рассматриваемом случае можно использовать естественные заземлители, так как их сопротивление меньше 10 Ом. 69. Правильно. Высокие и сверхвысокие напряжения усложняют и удорожают эксплуатацию и строительство ЕЭС. 70. Проверьте расчеты. 71. Правильно. Независимо от материала предохранительной вставки ее всегда можно рассчитать таким образом, что она будет перегорать раньше, чем температура защищаемого провода превысит допустимую. 72. Номинальный ток плавкой вставки должен быть меньше утроенного значения допустимого тока. 73. Воспользуйтесь законом Ома. 74. Чем больше мощность сети, тем меньше должно быть сопротивление заземлителя. 75. В этом случае целесообразнее использовать кабельную линию. 76. Проверьте вычисления. 77. Учтите, что изменились обе части уравнения. 78. Правильно. 79. Максимальный ток, который может создаваться рассматриваемым источником электроэнергии, равен 3 мА. 80. Заземление корпуса двигателя, не соединенного с заземленной нейтралью, увеличивает вероятность поражения обслуживающего персонала. 81. Вы ошиблись. 82. Последняя цифра в маркировке однопроводных стальных проводов обозначает диаметр провода в миллиметрах. 83. Правильно. Для определения потери напряжения нужно знать сдвиг фаз между напряжением и током нагрузки. 84. Левая часть уравнения теплового равновесия уменьшилась в 4 раза. 85. Правильно. При расчете получаем 12 А. Выбираем ближайший стандартный предохранитель с номинальным током 15 А. 86. При прочих равных условиях высокочастотные токи менее опасны, чем переменный ток невысокой частоты. 87. Помимо внутренних сетей для передачи электроэнергии используются воздушные и кабельные сети. 88. Примените закон Ома, учитывая, что потеря напряжения возникает в обоих проводах линии электропередачи. 89. При заданных условиях масса двухпроводной линии в 4 раза больше массы трехпроводной линии. 90. Правильно. 91. Для передачи электроэнергии широкое применение находят как сети высокого, так и сети низкого напряжения. 92. Неверно. Вентиляция шахты должна осуществляться непрерывно. 93. При увеличении напряжения масса линии уменьшается, так как уменьшается площадь поперечного сечения проводов. 94. Надежность — важнейшее достоинство ЕЭС. 95. Ошибка в вычислениях. 96. Для того чтобы ампер-секундная характеристика имела общую точку с осью токов, необходимо, чтобы плавкая вставка перегорала мгновенно, а это невозможно. 97. Утроенное значение тока в линии меньше номинального тока плавкой вставки; следовательно, при коротком замыкании провод перегреется раньше, чем сработает предохранитель. 98. Проверьте вычисления. 99. При мощности сети 100 кВт сопротивление заземлителя не должно превышать 4 Ом. 100. Поливинилхлоридные оболочки в последние годы находят самое широкое применение для изоляции проводов и кабелей. 101. Ошибка в вычислениях. 102. Воспользуйтесь уравнением теплового равновесия провода. 103. Нужно выбрать стандартный предохранитель с наименьшим номинальным током, удовлетворяющим условиям задачи. 104. Правильно. 105. При пробое фазы

на корпус двигателя немного возрастут токи утечки, но их совершенно недостаточно для срабатывания защиты из плавких предохранителей. 106. Хлопчатобумажная пряжа, пропитанная специальными составами, широко применяется для изоляции кабелей и проводов. 107. Вы ошиблись. 108. Правильно, левая часть (сопротивление) и правая часть (площадь боковой поверхности) уравнения теплового равновесия увеличиваются одинаково. 109. Следует выбрать предохранитель с номинальным током 80 А. 110. Ток рассматриваемого источника электроэнергии не может превысить 3 мА. 111. В маркировке многопроволочных проводов указывается непосредственно площадь поперечного сечения (мм^2). 112. Вы нашли абсолютное значение падения напряжения в линии. 113. Левая часть уравнения теплового равновесия пропорциональна сопротивлению провода, которое уменьшается, а не увеличивается при росте диаметра провода. 114. Вы ошиблись. Нужен предохранитель с номинальным током 100 А. 115. Наибольшее физиологическое воздействие на человека оказывает переменный ток невысокой частоты, например 50 Гц. 116. При заданной мощности ток в проводах линии тем больше, чем меньше напряжение. 117. Правильно, потеря напряжения равна разности действующих значений напряжения в начале и конце линии; падение напряжения — разности соответствующих векторов. 118. Правильно. 119. Выбранная плавкая вставка перегорит при номинальном режиме работы сети, а это недопустимо. 120. Вы ошиблись, правильное решение 0,076 А. 121. Правильно, сталеалюминиевые и биметаллические провода сочетают механическую прочность с высокой электропроводностью. 122. Для определения потери напряжения приведенных данных недостаточно. 123. Проверьте решение, в нем есть ошибка. 124. Вставка с номинальным током 10 А будет перегорать при пуске двигателя. 125. Правильно, переменный ток невысокой частоты наиболее опасен. 126. Вы ошиблись, ток короткого замыкания распределяется обратно пропорционально сопротивлениям параллельных ветвей. 127. В маркировке однопроволочных проводов указывается диаметр провода (мм), многопроволочных — площадь поперечного сечения (мм^2). 128. Вы ошиблись в вычислениях. 129. Электропроводность провода и площадь его поперечного сечения связаны линейной зависимостью. 130. Ошибка в рассуждениях. 131. При определенных условиях могут быть опасны и напряжения значительно меньше 127 В. Напряжения, меньшие 12 В, практически безопасны. 132. Правильно. 133. Правильно, при расчете полученный результат округляем в большую сторону. 134. Опоры воздушных линий затрудняют работу сельскохозяйственных машин на полях. 135. Правильно. 136. Правильно. Для сохранения равенства левой и правой частей уравнения теплового равновесия провода необходимо разность температур провода и окружающей среды уменьшить в 8 раз. 137. Вы ошиблись. 138. Напряжения, меньшие 12 В, считаются безопасными. 139. Правильно. Такое заземление не ухудшает, но и не улучшает условий безопасности обслуживающего персонала, поэтому устанавливать его нецелесообразно. 140. Проверьте свои рассуждения и расчеты. 141. Вулканизированная резина — один из основных изоляционных материалов. Она применяется как самостоятельно, так и совместно с оболочками из других материалов. 142. Правильно. 143. При увеличении длины провода одновременно увеличивается его сопротивление и площадь поверхности. При этом тепловое равновесие не нарушается и температура провода не изменяется. 144. Вы правильно выбрали плавкую вставку. 145. Вы ошиблись в вычислениях. 146. Такое заземление не только

нецелесообразно, но и недопустимо, так как резко увеличивает вероятность поражения обслуживающего персонала. 147. Вы не учли коэффициента использования трубы. 148. Неверно. 149. При увеличении площади поперечного сечения провода потеря напряжения в линии уменьшается. 150. Ток прямо пропорционален площади поперечного сечения провода, возведенной в степень $3/4$. Следовательно, при увеличении площади ток увеличивается, а не уменьшается. 151. Утроенное значение этого тока меньше номинального тока плавкого предохранителя, установленного в сети, а это недопустимо. 152. Воспользуйтесь законом Ома. 153. Правильно. 154. Правильно, принцип маркировки однопроволочных проводов отличен от принципа маркировки многопроволочного провода. 155. Правильно, приближенное значение ΔU равно 0,5 В. 156. Правильно, левая часть уравнения теплового равновесия уменьшается в 4 раза, правая увеличивается в 2 раза. 157. Вы ошиблись, нужно выбрать предохранитель с номинальным током, превышающим 12 А, но меньшим тока следующей ступени. 158. Правильно, при равных площадях поперечного сечения сталеалюминиевый провод прочнее чисто алюминиевого. 159. Ошибка в вычислениях. 160. Проводимость провода уменьшается при увеличении площади его поперечного сечения. 161. Предохранитель выбран неверно. 162. В сухих помещениях допускается напряжение прикосновения, значительно превышающее 36 В. Напряжение 36 В считается опасным в сырых помещениях с токопроводящими полями. 163. Такое заземление делать нецелесообразно. 164. Результат неверен. 165. Правильно. Кабельная линия могла бы обеспечить питание электрокомбайна, если предусмотреть устройства для ее разматывания и сматывания. 166. Вы ошиблись. 167. Длина провода не входит в уравнение теплового равновесия, поэтому при увеличении длины провода его тепловой режим не изменяется. 168. Предохранитель должен удовлетворять двум условиям. 169. Правильно, внутреннее сопротивление источника велико. 170. Правильно, заземление корпуса двигателя при указанных условиях увеличивает опасность поражения персонала. 171. Воспользуйтесь формулой для определения количества заземлителей. 172. Правильно, сюда в основном применяется для изготовления изоляционных деталей приборов и машин (например, в коллекторе машины постоянного тока). 173. Правильно, потеря напряжения в линии обратно пропорциональна площади поперечного сечения провода. 174. Правильно. 175. Правильно. При защите от коротких замыканий номинальный ток вставки не должен превышать утроенного значения допустимого по нагреву тока провода. 176. Вы ошиблись в вычислениях. 177. В этом случае пробой фазы на корпус двигателя приводит к короткому замыканию и срабатыванию предохранителя. 178. Правильно. 179. Правильно. 180. Вставку из любого материала можно рассчитать на заданный номинальный ток, но желательно, чтобы она плавилась при относительно низкой температуре. 181. Такой провод можно использовать для питания потребителей в рассматриваемой цепи. 182. Вы правильно определяли ток утечки. Обратите внимание на то, что он превышает максимально допустимый ток через тело человека и является смертельно опасным. 183. Правильно. Чем меньше мощность сети, тем больше может быть сопротивление заземления. 184. Электрическая сеть составляет часть электроэнергетической системы. 185. Такое напряжение применяют в помещениях с повышенной опасностью. 186. Учтите, что при уменьшении допустимой потери напряжения в 2 раза площадь поперечного сечения провода в 2 раза увеличивается. 187. В СССР эксплуатируются мощные

линии дальней электропередачи с напряжением 35, 110, 220, 330, 500 кВ и более. 188. Неверно. 189. Такую массу имела бы трехпроводная линия, если бы площадь поперечного сечения каждого ее провода была равна площади поперечного сечения провода двухпроводной линии. 190. По условиям задачи, 10 А — это наименьший из токов, которые расплавляют вставку. 191. Правильно. 192. Низковольтные сети однофазного тока широко применяются для питания электроосветительных приборов как внутри помещений, так и снаружи. 193. Вы ошиблись. 194. Правильно. 195. Нужно выбрать плавкую вставку с номинальным током 10 А. 196. Правильно. Защита от перегрузок требует более строгого согласования номинального тока плавкой вставки с допустимым по нагреву током провода. 197. Неверно. 198. Воспользуйтесь формулой для подсчета сопротивления трубы заземлителя. 199. Кабельные сети применяются для электроснабжения объектов внутри городов. Найдите более полный ответ. 200. Правильно. потеря напряжения создается двумя проводами линии. 201. Вспомните, как зависит масса линии электропередачи в рассматриваемом случае от линейного напряжения. 202. Неверно. 203. Очень высокая напряженность электрического поля встречается в практике эксплуатации электротехнических установок редко. Реальная опасность представляет напряжение, способное создать в теле человека ток 50 мА и более. 204. Изучите схемы заземления, вникните в их работу. 205. Правильно, чем выше напряжение, тем меньше ток и площадь поперечного сечения провода (при заданной мощности). 206. Потеря напряжения определяется в результате арифметического вычитания, для подсчета падения напряжения данных недостаточно. 207. Неверно. 208. Предохранитель должен отключать защищаемый участок сети только при аварийном режиме. 209. Правильно. Для решения задачи достаточно применения закона Ома. 210. Правильно. 211. Проверьте свои рассуждения. 212. Сети постоянного тока широко применяются в народном хозяйстве (сверхдальние линии, транспорт, электропривод, гальванопластика и др.). 213. Правильно. Обычно используют дизель-генератор. 214. Обратите внимание на то, что площадь сечения провода линии обратно пропорциональна квадрату напряжения. 215. Номинальный $I_{ном}$ и десятисекундный I_{10} токи плавкой вставки связаны соотношением $I_{ном} = I_{10}/2,5$. Этим и следует воспользоваться для решения задачи. 216. Защита от перегрузок сложнее. Если потребитель защищен от перегрузок, то он заведомо защищен от коротких замыканий. Обратное утверждение несправедливо. 217. Неверно. 218. Электрической сетью называют часть энергетической системы, включающую линии электропередачи ЛЭП и трансформаторные подстанции ТП. 219. В особо опасных условиях такие напряжения недопустимы. 220. Правильно, применение трехфазного тока позволяет получить 25%-ную экономию цветного металла. 221. Правильно, сети с напряжением до 1000 В применяются для распределения энергии по отдельным потребителям, высоковольтные сети — для передачи электроэнергии на дальние расстояния. 222. Запуск резервного источника требует времени, а питание для аварийной остановки производства должно быть подано немедленно. 223. Обратитесь к формулам для подсчета площади поперечного сечения проводов линии электропередачи. 224. По условию задачи, ток 10 А расплавляет вставку, расплавят ее и токи, большие 10 А. 225. Воспользуйтесь формулой, связывающей минимальный и допустимый токи. 226. Основная часть тока утечки замкнется через заземлитель. 227. Правильно, многофазные системы применяются

редко. 228. Правильно. 229. При соединении потребителей звездой линейное напряжение больше, чем при соединении треугольником, а масса линии обратно пропорциональна квадрату напряжения. 230. Номинальный ток вставки в 2,5 раза меньше ее десятисекундного тока, т. е. тока, при котором она перегорает за 10 с. 231. Непосредственно опасен ток, но причиной его возникновения служит напряжение. 232. Если заземлить токоведущие детали электротехнических установок, то фазы генератора окажутся накоротко замкнутыми через землю. Заземляются изолированные детали для предохранения человека от токов утечки. 233. Правильно. 234. Воспользуйтесь законом Ома, учтите, что потеря напряжения возникает в двух проводах линии. 235. Во втором случае масса линии будет меньше, а не больше, чем в первом. 236. Неверно. 237. Примените закон Ома, величины выразите в единицах СИ. 238. Заземление средней точки генераторов в трехпроводной сети допустимо, так как оно не снижает, а повышает вероятность поражения оператора электрическим током. 239. Стальные провода обладают высокой прочностью, однако их электропроводность значительно уступает электропроводности меди и алюминия. 240. Если не учитывать реактивного сопротивления линии, то приведенных данных достаточно для определения абсолютного значения падения напряжения в линии. 241. Правильно, в четырехпроводной линии достигается экономия в массе, равная 71 %. 242. Осветительная сеть должна быть защищена не только от коротких замыканий, но и от перегрузок. 243. Правильно. Высокие и сверхвысокие напряжения усложняют и удорожают эксплуатацию и строительство ЭЭС. 244. Если при прочих равных условиях изменить допустимую потерю напряжения в проводах линии, то изменится и расчетная площадь сечения проводов. 245. Вы ошиблись. 246. Для экономии цветного металла нужно выбрать провод с наименьшей площадью сечения при условии, что он не будет нагреваться выше установленной (допустимой) температуры. 247. Вы ошиблись. При параллельном соединении сопротивлений ток распределяется обратно пропорционально этим сопротивлениям. 248. Правильно.

Консультации к главе 13

1. Правильно. При данном режиме двигатель работает неправильно. 2. Неверно. В этом случае сработают реле ускорения $1U$ и $2U$ и запуск окажется не ступенчатым. 3. Неверно. Вы не учли наличие редуктора и других элементов. 4. Правильно. 5. Неверно. К обмоткам контакторов Bn и Hs подводится одно и то же линейное напряжение, но в результате блокировки не одновременно (см. рис. 13,8). 6. Неверно. При повторно-кратковременном режиме двигатель не успевает остыть до температуры окружающей среды во время паузы. 7. Неверно. Двигатель при этой мощности работает с некоторой перегрузкой и, следовательно, будет перегреваться. 8. Неверно. При таком соотношении есть опасность, что сразу сработают контакторы ускорения $1U$ и $2U$ и запуск будет не ступенчатым. 9. Не только. Подумайте. 10. Правильно. Если PB сработает раньше и замкнет контакты, то сразу сработает реле ускорения $1U$ и $2U$ и запуск окажется не ступенчатым. 11. Неверно. В этом случае возникает короткое замыкание в линии. 12. Неверно, $I_n > T_n$. 13. Неверно. При введении в цепь обмоток ротора активного сопротивления кривая зависимости $M = f(S)$ смещается вправо. 14. Неполный (частный) ответ. 15. Правильно. 16. Неверно. При такой последовательности операций дви-

гатель совершит выбег по инерции до остановки, а затем станет вращаться в другую сторону. При нажатии сразу на кнопку *Нз* возникает тормозной момент, ускоряющий остановку и реверс двигателя. 17. Не обязательно. Запуск будет одноступенчатым. 18. Неверно. 19. Неполный (частный) ответ. 20. Вы ошибаетесь, прочтите консультацию № 16. 21. Вы ошибаетесь. Происходит короткое замыкание в линии, и ток через обмотки тепловых реле не проходит. 22. Неверно. При таком соотношении двигатель будет перегружен. 23. Неверно. При данном режиме двигатель работает кратковременно. 24. Неверно. При выбранной мощности двигатель будет перегреваться. 25. Неверно. Вы забыли о преобразующем устройстве. 26. Вы ошибаетесь. Необходимо учитывать, что в работе двигателя есть паузы. 27. Правильно. 28. Неверно. Проследите еще раз последовательность срабатывания реле. 29. Грубая ошибка. 30. Вы ошибаетесь. В этом случае кнопки *Вл* и *Нз* нельзя было бы отпускать. 31. Неверно. Еще и редуктор преобразующее устройство. 32. Правильно. 33. Правильно. 34. Неверно. Смотрите текст. 35. Неверно. Прочтите консультацию № 2. 36. Неверно. См. консультацию № 10. 37. Правильно. 38. Правильно. 39. Этого мало. 40. Неверно. Последовательность фаз та же, что и при нажатии кнопки *Вл*. 41. Не обязательно. Может быть и один. Это определяется типом электропривода. 42. Правильно. 43. Правильно. 44. Правильно. 45. Неверно. Двигатель будет остывать до температуры окружающей среды. 46. Неверно. Проследите еще раз последовательность срабатывания реле. 47. Правильно. 48. Вы ошибаетесь. Запуск будет одноступенчатым. 49. Правильно. 50. Неверно. Так будет при нажатии кнопки *Вл*. 51. Правильно. 52. Правильно. 53. Неверно. 54. Частный случай. Функции ПУ шире. 55. Правильно. 56. Неверно. Двигатель будет сильно недогружен. 57. Правильно. 58. Правильно. 59. Правильно. Причем передаточное число ПУ может изменяться в процессе работы электропривода. 60. Правильно. 61. Частный случай. Функция ПУ шире. 62. Грубая ошибка. 63. Но этого недостаточно. 64. Правильно. 65. Не обязательно. Все зависит от типа электропривода. 66. Правильно. 67. Этого мало. 68. Неверно: $T_{\text{ска}} > T_{\text{с}}$. 69. Неверно. Читайте внимательно текст. 70. Правильно. Функции УУ многогранны. 71. Правильно, 72. Это еще не все.

Консультации к главе 14

1. Неверно. Анодный ток может быть большим, а его изменения — малыми. 2. Неверно. Каким бы ни было взаимное расположение анода и сетки, сетка всегда ближе к электронному облаку. 3. Неверно. Тетрод — усовершенствованный триод. 4. Правильно. Изменение анодного напряжения приводит лишь к смещению анодно-сеточной характеристики. 5. Неверно, хотя часть электронов, летящих на анод, и попадает в цепь экранной сетки. 6. Неверно. Конечная скорость определяется только напряжением. 7. Неверно. Анодный ток может уменьшиться, но это несущественно. 8. Неверно, так как влияние поля анода на анодный ток увеличивается. 9. Неверно. При изменении размеров катода изменяется эмиссионная способность катода, а следовательно, и крутизна характеристики. 10. Правильно. 11. Неверно, так как при этом анодный ток уменьшится, а он должен увеличиться. 12. Грубая ошибка. 13. Неточно, так как это характеристика диода с активированным катодом. 14. Правильно. 15. Неверно. Управляющее действие анодного поля зависит от расстояния между анодом и катодом. 16. Неверно. Рост ϕ_a затрудняет выход электронов.

17. Но это приведет к увеличению деуправляющего действия поля анода. 18. Неверно. В пределах допустимых значений обратного напряжения обратное сопротивление близко к бесконечности и от напряжения не зависит. 19. Неверно. 20. Неверно. Днод выполяняет ограниченные функции. 21. Правильно. 22. Неверно. 23. Неверно. Главная причина изменения анодного тока — это изменение количества электронов в потоке. 24. Неверно. Электромагнитная сила, возникающая при движении электронов в магнитном поле, всегда перпендикулярна вектору скорости. Следовательно, изменяется только направление этого вектора, а его величина остается неизменной. 25. Неверно. Днод обладает односторонней проводимостью. 26. Экранирующее действие сетки S_2 совсем исчезнет при устранении емкости. 27. Неверно. Плотность витков сетки влияет на напряжение запырания лампы. Подумайте как. 28. Правильно. 29. Неверно. Вы забыли, что диэлектрики обладают очень малым количеством свободных электронов. 30. Это достоинство, но не главное. 31. Неверно. Ведь электроны испускаются только катодом; следовательно, анодный ток в триоде проходит только при положительном анодном напряжении. 32. Неверно. Ведь анод больше удален от электронного облака. 33. Правильно. Такая сетка обеспечит отталкивающее действие на вторичные электроны анода. 34. Правильно. 35. Неверно. 36. Неверно. В результате действия поля появляется составляющая скорости, направленная против поля, и траектория искривляется. 37. Неверно. Какой бы ни была амплитуда тока, температура катода прямого накала будет пульсировать. 38. Неверно. Разве поле анода не влияет на анодный ток лампы? 39. Неверно. Прочтите внимательно материал. 40. Неверно. Вспомните, какой вид имеет характеристика линейного элемента, и сравните ее с характеристикой диода (см. рис. 14.8, б). 41. Неточно: v_1 гораздо больше v_2 . 42. Неверно. Вспомните определение однородного поля. 43. Неверно. Как раз наоборот: такое изменение обоих факторов приводит к затруднению эмиссии. 44. Неверно. 45. Правильно. 46. Неверно. Это второе следствие. 47. Неверно. Скорость электронов, достигающих анода, практически не меняется, изменяется их количество в потоке. 48. Неверно. Вспомните правило левой руки для определения направления силы Лоренца. 49. Неверно. Линейным называется такой элемент, сопротивление которого не зависит ни от напряжения, ни от тока. 50. Не только. Катоде косвенного накала тем более. 51. Неверно. 52. Неверно, так как вы определяли R в пределах нерабочей части характеристики. 53. Правильно. 54. Неверно. При таком соотношении вторичные электроны могут попадать на экранирующую сетку. 55. Важное, но не определяющее достоинство. 56. Правильно, так как эта характеристика снимается при неизменном анодном напряжении. 57. Неверно. Вспомните строение полупроводников. 58. Прочтите консультацию № 48. 59. Этот способ не рационален, так как при работе усилителя в динамическом режиме анодное напряжение может стать меньше, чем напряжение на экранирующей сетке. 60. Правильно. 61. Неверно. Это парабола, так как случай аналогичен движению камня в поле земного тяготения с горизонтальной начальной скоростью. 62. Неверно. При таком токе температура катода будет пульсировать. 63. Неверно. Наоборот. 64. Неверно. 65. Неверно. Прямое сопротивление близко к нулю, а обратное — к бесконечности. 66. Неверно. Вы забыли, что в электротехнике пользуются условным направлением тока. 67. Неверно, так как это не рабочий участок характеристики. 68. Правильно. 69. Неверно. Так как в отрицательные полупериоды входного напряжения лампа будет запи-

раться и полезный сигнал на выходе будет искаженным. 70. Правильно. 71. Такое соотношение возможно, но оно не оптимально, так как КПД усиления весьма мал. 72. Правильно. Переменная составляющая анодного напряжения находится в противофазе с сеточным. 73. Правильно. 74. Неверно. 75. Правильно. 76. Это зависит от того, существует ускоряющее электрическое поле или нет. 77. Неверно. 78. Правильно. 79. Неверно. При таком смещении выходное напряжение будет искаженным по сравнению с входным. 80. Это неточно, так как главная причина — в пульсации тока эмиссии. 81. Правильно. 82. Неверно. 83. Неверно. Это характеристика линейного элемента. 84. Правильно. При этом достигается максимально возможный КПД, порядка 50 %. 85. Неверно. Конечная скорость электрона определяется только напряжением. 86. Правильно. 87. Неверно. 88. Неверно. Чем плотнее намотка сетки, тем легче запереть лампу. 89. Не только. Так как сила тока не меняется, им можно нагревать катоды прямого накала. 90. Участок для определения S выбран неправильно. 91. Неверно. 92. Правильно. 93. Правильно. 94. Правильно. 95. Неверно. Ведь чем дальше анод от катода, тем слабее его влияние на анодный ток. 96. Правильно. 97. Неверно. Еще раз подумайте, каким должно быть постоянное напряжение на сетке, чтобы входной сигнал не искажался. 98. Правильно. 99. Неверно. 100. Неверно. См. консультацию № 102. 101. Правильно. 102. Неверно. С точки зрения переменной составляющей оба способа эквивалентны. 103. Правильно. 104. Правильно. 105. Неверно. Как раз наоборот. 106. Неверно. Столько выводов у диода с катодом прямого накала. 107. Правильно. 108. Неверно. Уменьшение температуры приводит к затруднению эмиссии. 109. Неверно. 110. Не только. 111. Правильно. Как раз изменение плотности витков сетки сильно влияет на крутизну характеристики. 112. Неверно. 113. Правильно. 114. Правильно. 115. Правильно. 116. Неверно, так как это при определенных обстоятельствах выгодно. 117. Неверно. Пентод — усовершенствованный триод. 118. Правильно. 119. Неверно. 120. Неверно, так как, выбрав этот треугольник, вы нарушили методику определения R . 121. Неверно. При таком соотношении происходит искажение усиливаемого сигнала. 122. Неверно. Ведь катоды прямого накала менее инерционны. 123. Неверно. Лучевой тетрод — усовершенствованный триод. 124. Правильно. 125. Правильно. При этом для возвращения характеристик влево потребуется повышать анодное напряжение, что не выгодно. 126. Правильно. 127. Неверно. 128. Не только. 129. Неверно. Поле неоднородно, так как напряженность поля во всех точках различна. 130. Правильно. 131. Неверно. 132. Правильно. 133. Неверно. Сеточное напряжение влияет на значение анодного тока, а не на его направление. 134. Не только. 135. Неверно. 136. Правильно. 137. Неверно. Изучите материал. 138. Правильно. 139. Правильно. 140. Правильно. 141. Правильно. 142. Не только. 143. Правильно.

Консультации к главе 15

1. Правильно. Несамостоятельный разряд требует источника ионизации. 2. Есть и другая причина. 3. Скорость ионизации и комбинации молекул практически неизменны. 4. Полупроводниковые диоды тоже рассчитаны на большие рабочие токи. 5. Правильно, заряды не будут размножаться за счет ионизации молекул. 6. Правильно, в режиме дугового разряда при перемен-

ной площади катодного пятна. 7. Правильно. При тлеющем разряде ток значительно меньше. 8. В ламповом диоде нет управляющего электрода. 9. Участок ae соответствует слишком малым токам. 10. Правильно, именно при этом условии избыток напряжения падает на R_c . 11. Правильно, чем круче участок ae , тем лучше стабилизация. 12. Вы ошиблись в вычислениях. 13. Отношение приращений напряжения входа и выхода зависит от R_c . 14. Правильно. 15. Правильно. 16. Различную конфигурацию имеют катоды, анод — общий. 17. Цвет зависит только от состава газа. 18. Этими буквами маркируют тиратрон с холодным катодом. 19. Этими буквами маркируют цифровые индикаторы. 20. Частота тока в маркировке не отображается. 21. Это принципиальное отличие. 22. Это только одна из причин. 23. Правильно, причем плотность тока практически не меняется. 24. Существенную роль играет работа выхода электронов из катода. 25. Для оксидного катода опасен нагрев большими токами. 26. Правильно, так как уменьшается отношение внутреннего падения напряжения к выпрямленному напряжению. 27. Наоборот, с холодным катодом — в режиме тлеющего разряда. 28. Правильно, причем анодный ток резко уменьшится. 29. На этом участке разряд неустойчив (участок отрицательного сопротивления). 30. Уясните принцип стабилизации напряжения. 31. Заметьте, что наклон участка ae увеличится. 32. Правильно, расчет произведен по точной формуле. 33. Применяются также для измерения напряжения. 34. Для индикации напряжений или цифр нет необходимости в больших токах. 35. И в тех и в других лампах обычно используют тлеющий разряд. 36. Количество анодов не зависит от количества высвечиваемых цифр. 37. Количество электродов одинаково у того и другого прибора. 38. Правильно, буква Г свидетельствует, что катод нагрет (горячий). 39. Правильно, СН — сигнальная лампа для индикации напряжения. 40. Это не единственное направление совершенствования приборов. 41. Это следствие. Укажите причину различий. 42. Правильно, эмиссия электронов сопровождается размножением заряженных частиц. 43. Плотность тока практически не меняется. 44. Ответ неполный. 45. Газотрон работает в режиме дугового разряда. 46. Чем выше выпрямленное напряжение, тем меньше отношение напряжения, падающего в газотроне, к выпрямленному напряжению. 47. Правильно. 48. Этот участок соответствует тлеющему разряду. 49. Правильно, тиратрон с холодным катодом работает в режиме тлеющего разряда. 50. Правильно, катод не подогревается, поэтому эмиссия электронов неинтенсивна. 51. Учтите, что зависимость тока от напряжения станет более резкой. 52. Проанализируйте формулу. 53. Это только одна область применения газосветных ламп. 54. Правильно. 55. Состав газов у этих ламп может быть одинаковым. 56. Значение напряжения не влияет на цвет. 57. Правильно, точкой обозначается присутствие молекул газа. 58. Этими буквами маркируют гезоразрядный стабилитрон. 59. Отображать мощность нет необходимости. 60. Это важно, но не единственное направление совершенствования. 61. Правильно, поэтому количество заряженных частиц, а следовательно, и ток не увеличиваются. 62. Нет. Кванты света излучаются при рекомбинации молекул. 63. Пробивное напряжение у лампового диода не меньше, чем у газотрона. 64. Правильно. 65. Газотрон работает в режиме дугового разряда. 66. Учтите, что внутреннее падение напряжения практически не меняется. 67. Управляющий электрод не может погасить тиратрон. 68. Нет. Это участок аномального тлеющего

разряда. 69. Изучите принцип работы стабилизирующей схемы. 70. В вашем ответе нет логики. 71. Это приближенное значение, воспользуйтесь точной формулой. 72. Правильно, это отчетливо видно из формулы. 73. Ответ неполный. 74. Газосветные лампы не работают в режиме дугового разряда. 75. Правильно, анод — общий. 76. Правильно. 77. Количество электродов одинаково. 78. Этими буквами маркируют стабилитрон. 79. Ток. Указывать мощность нет необходимости. 80. Укажите еще другие направления. 81. Потому что количество заряженных частиц практически постоянно. 82. Правильно. 83. Правильно. 84. Ток по-прежнему проходить не будет. 85. Газотрон работает в режиме дугового разряда. 86. Тиратроны с накалимым катодом работают в режиме дугового разряда. 87. Только зажигает. Для гашения надо снижать анодное напряжение. 88. Правильно, в режиме дугового разряда. 89. Правильно.

Консультации к главе 16

1. Движение электрона в атоме подчиняется вероятностным законам. 2. Правильно, атомная единица массы умножается на атомное число. 3. Правильно. 4. Электромагнитное поле проявляет и корпускулярные свойства. 5. Правильно, длина волны де Бройля тем меньше, чем больше масса тела. 6. Это условие могло бы быть применено для любой орбиты. 7. Скорость электрона на разрешенной орбите не меняется. 8. Электрический заряд электрона постоянен на всех уровнях. 9. Это радиус первой орбиты. 10. Правильно, электрон взаимодействует с большим количеством атомов. 11. Учтите, что все энергетические подуровни в этом случае заняты. 12. Электрон в зоне проводимости и дырка образуют пару носителей. 13. Узкая запрещенная зона сравнительно легко преодолевается, и такой кристалл не может быть изолятором. 14. Правильно, большое количество электронов преодолевает запрещенную зону. 15. Дефекты облегчают образование пар свободных носителей заряда. 16. Правильно, то и другое влияет на ширину запрещенной зоны. 17. Эта энергетическая зона размещается вблизи валентной. 18. Электроны образуются в примесной зоне. 19. Вспомните, какая примесь донорная, какая — акцепторная. 20. Вы перепутали типы электропроводностей кристаллов. 21. Правильно, чем больше концентрация примеси, тем больше носителей. 22. Правильно, тепловой пробой разрушает кристалл. 23. Основные носители движутся вследствие диффузии. 24. Конструкция плоскостных диодов тоже достаточно проста. 25. Подумайте еще. 26. Правильно. 27. Для выпрямления промышленных токов применяют и другие устройства. 28. Правильно. Но, конечно, не в режиме теплового пробоя. 29. Правильно, эти диоды имеют участок отрицательного сопротивления. 30. Правильно, именно в этом случае ток зависит от инжекции зарядов. 31. Неполный ответ. 32. Этот коэффициент зависит от толщины базы и от концентрации носителей заряда. 33. Учтите, что расположение переходов симметрично. 34. На эмиттере транзистора типа $p-n-p$ должен быть плюс. 35. В схеме с общим эмиттером коэффициент усиления по току больше единицы. 36. Вы ошиблись в вычислениях. 37. Проанализируйте формулу коэффициента усиления по мощности. 38. Правильно, приращение тока коллектора надо разделить на 10 мА. 39. Коэффициент усиления определяют по переходной характеристике. 40. Правильно. 41. Правильно, плюс присоединен к пластине n -типа.

43. Правильно, положительный потенциал притягивает электроны к каналу. 44. Правильно, поскольку затвор отделен от прибора прослойкой диэлектрика. 45. Столько переходов у обычного тиристора. 46. Вспомните, как зависят коэффициенты от тока $p-n$ -перехода. 47. Учтите, что сопротивление тиристора на этом участке невелико. 48. Этой буквой обозначают полевой транзистор. 49. Транзисторы широко используют для усиления сигналов по мощности. 50. Правильно, тиристоры обычно рассчитаны на большие токи. 51. Планетарная модель атомов находит широкое применение. 52. Правильно, кубический корень из 22 примерно равен 5. 53. Правильно, $\lambda = 10^{-10}$ м. 54. Электромагнитное поле проявляет и волновые свойства. 55. Учтите, что длина волны тем больше, чем легче частица. 56. Правильно. Эта особенность микромира не имеет аналогов. 57. Атом может поглотить и несколько квантов энергии. 58. Правильно. Этот номер называют главным квантовым числом. 59. Вы ошиблись в вычислениях. 60. Разница зависит также от материала кристалла. 61. Правильно, электроны в валентной зоне могут переходить с одного подуровня на другой. 62. Учтите, что при переходе электрона образуется дырка. 63. Есть и другие механизмы образования свободных носителей заряда. 64. С увеличением температуры длина свободного пробега уменьшается. 65. Правильно, примесные зоны располагаются вблизи основных зон. 66. Эта зона располагается вблизи зоны проводимости. 67. Примесные зоны никогда не располагаются выше зоны проводимости. 68. Правильно, примесные зоны располагаются вблизи валентных зон. 69. В кристалле германия с примесью индия свободны дырки. 70. Учтите, что диффундируя, электроны «обнажают» положительные ионы. 71. Правильно, $p-n$ -переход включен в прямом направлении. 72. Электрический пробой не разрушает кристалл. 73. Правильно. 74. Правильно. Малая емкость особенно нужна в высокочастотных схемах. 75. Примесь должна быть донорной. 76. Укажите более важную цель. 77. Правильно, плоскостные — при низких частотах, точечные — при высоких. 78. В режиме пробоя работают стабилитроны. 79. Буквой В маркируются варикапы. Буквы Т в маркировке нет. 80. Коллекторный переход включают в обратном направлении. 81. Правильно. 82. С увеличением толщины базы коэффициент усиления уменьшается. 83. Переходы транзистора симметричны, поэтому работоспособность сохранится. 84. В этой схеме коэффициент усиления по току меньше единицы. 85. Правильно. 86. Правильно. 87. Правильно. 88. Проанализируйте определение входной характеристики. 89. Вспомните определение коэффициента усиления по току. 90. Схема с общей базой усиливает напряжение, а катодный повторитель — нет. 91. Собственный шум у биполярных транзисторов выше, чем у полевых. 92. Учтите, что напряжение на затворе влияет на ширину канала. 93. Нет, количество электронов в канале увеличится. 94. При снятии напряжения с основных электродов тиристор закрывается. 95. Правильно, введение четвертого $p-n$ -перехода обеспечивает симметрию. 96. В этой точке меняет знак сопротивление диода. 97. Напряжение на управляющих электродах зависит от напряжения включения. 98. Правильно. Кремниевые транзисторы маркируются также буквой К. 99. Правильно. В этих схемах следует применять диоды или тиристоры. 100. Ответ неполный. 101. Правильно. Наглядность планетарной модели — ее важное достоинство. 102. Это радиус ядра атома водорода. 103. Размеры ядра атома водорода значительно меньше. 104. Правильно, это вид материи, обладающий свойствами волн и корпускул.

105. Вспомните, как зависит длина волны де Бройля от массы тела. 106. Укажите еще ряд областей применения транзисторов и тиристоров. 107. Правильно. 108. Квантовое число не принимает нулевых значений. 109. Правильно, энергия — $3,38 \text{ эВ}$ соответствует $n=2$, поэтому $r=4r_1$. 110. Ответ неполный. 111. Правильно, в этом случае свободных носителей заряда нет. 112. Правильно, кроме электрона проводимости образуется и дырка. 113. Повышение температуры тоже повышает собственную электропроводность. 114. Увеличение ширины запрещенной зоны ведет к уменьшению проводимости. 115. Примесные зоны облегчают образование пар свободных носителей заряда. 116. Правильно, фосфор — донорная примесь. 117. Правильно, сурьма — донорная примесь. 118. Учтите, что электроны валентной зоны переходят в примесную. 119. Вы перепутали типы носителей. 120. Правильно, диффундирующие электроны «обнажают» положительные ионы. 121. Подумайте, в каком направлении включен $p-n$ -переход. 122. Электрический пробой не опасен, если он не сопровождается тепловым. 123. Правильно, разделенные объемные заряды образуют конденсатор. 124. Правильно, этот метод применяется в точечных диодах. 125. Правильно, мышьяк — донорная примесь n -типа. 126. Правильно, повышение температуры лишает диод вентильных свойств. 127. Вы перепутали области применения диодов. 128. Диоды выходят из строя только при тепловом пробое. 129. Правильно. 130. Вы перепутали полярность включения $p-n$ -переходов. 131. Учтите, что увеличится комбинация дырок, эмитированных в базу. 132. Учтите, что с увеличением концентрации примеси ток базы увеличится. 133. Правильно. Это объясняется конструктивными особенностями. 134. В схеме с общей базой коэффициент усиления по току меньше единицы. 135. Ошибка в вычислениях. 136. В схеме с общей базой коэффициент усиления по мощности больше единицы. 137. Учтите определение входной характеристики. 138. Правильно. 139. Вы ошиблись в вычислениях. 140. Схему с общим эмиттером используют для усиления напряжения. 141. Устойчивость к радиации больше у полевых транзисторов. 142. Подумайте, как изменяются размеры обедненного слоя. 143. Есть транзисторы с более высоким входным сопротивлением. 144. Учтите, что при изменении полярности напряжение уменьшается до нуля. 145. Это число областей различного типа электропроводности. Число переходов меньше. 146. Правильно, α_1 и α_2 быстро растут. 147. Правильно, сопротивление самого тиристора незначительно. 148. Германиевые транзисторы маркируются цифрой 1 или буквой Г. 149. Биполярные транзисторы целесообразно использовать в радиосхемах. 150. Есть и другие области применения транзисторов и тиристоров. 151. Выразите массу атома в килограммах. 152. Масса электрона значительно меньше массы ядра атома. 153. Радиус атома водорода значительно больше. 154. Вспомните о волнах де Бройля. 155. Правильно, чем меньше масса, тем больше длина волны частицы. 156. Разрешенная орбита связана с длиной волны де Бройля. 157. Такой атом называют ионом. 158. Вспомните, что энергия уровня атома отрицательна. 159. Если атом — в составе молекулы, уровень расщепляется на большее число подуровней. 160. Ответ неполный. 161. В рассмотренном случае нет свободных носителей зарядов. 162. У проводника зона проводимости соприкасается с валентной зоной или перекрывается с ней. 163. Ответ неполный. 164. Неправильно. 165. Не только от материала, но и от концентрации примеси. 166. Выше зоны проводимости нет примесных энергетических зон. 167. Дырки образуются

в примесной зоне. 168. Правильно. В рассуждениях следует учитывать валентность примеси. 170. Чем выше концентрация примеси, тем интенсивнее диффузия носителей. 171. Нелинейность связана с односторонней проводимостью $p-n$ -перехода. 172. При ударной ионизации образуются неосновные носители зарядов. 173. Диффузия носителей возможна только при плотном соединении. 174. Сплавление — один из основных методов изготовления этих диодов. 175. У германиевого диода уменьшается почти до нуля. 176. Пробивное напряжение определяется свойствами $p-n$ -перехода. 177. Правильно, точечные диоды работают только при малых токах. 178. Диоды с отрицательным сопротивлением используют в генераторах. 179. Этими буквами маркируют варикапы и стабилитроны. 180. Существенны также тип и концентрация примеси. 181. Правильно. 182. Правильно, коллекторный переход включается в обратном направлении. 183. На коллекторе транзистора типа $n-p-n$ должен быть плюс. 184. Правильно, коэффициент усиления по току меньше единицы. 185. Коэффициенты усиления по току для разных схем различны. 186. В этой схеме коэффициент усиления по мощности больше единицы. 187. Повторите определение выходной характеристики. 188. Для переходных характеристик I_c — независимая переменная. 189. Правильно, h -параметры используют в схемах замещения. 190. Правильно, схема с общим коллектором не усиливает напряжения. 191. Прямое включение не позволяет менять размеры канала. 192. Правильно, проводимость канала и, следовательно, ток стока уменьшаются. 193. Есть транзисторы, у которых входное сопротивление больше. 194. Правильно. 195. Правильно, при малых токах эти коэффициенты близки к нулю. 196. Буквой Т обозначают биполярный транзистор. 197. Правильно. 198. Транзисторы широко применяют в высокочастотных схемах. 199. Полевые транзисторы, как правило, рассчитаны на малые токи. 200. Правильно. 201. Вы не учли массу атома водорода. 202. Размеры электрона сравнимы с размерами ядра атома. 203. Следует отметить еще волновые и корпускулярные свойства. 204. Найдите более точный и полный ответ. 205. Учтите, что длина волны зависит от массы. 206. Правильно, квант излучения обязательно равен разности энергий этих орбит. 207. Скорость электрона определяется значением энергии уровня. 208. Правильно. Максимальная энергия уровня равна нулю. 209. В кристалле электрон взаимодействует с еще более значительным количеством других частиц. 210. Правильно. 211. В этих условиях нет свободных носителей заряда. 212. Правильно. У изолятора запрещенная зона значительна. 213. Правильно. Вспомните также роль дефектов кристаллической решетки. 214. Правильно, дефекты образуют подуровни в запрещенной зоне, что облегчает переход электронов в зону проводимости. 215. Найдите более полный ответ. 216. Правильно. 217. Вы ошиблись в рассуждениях. 218. Правильно, при рассуждениях надо учитывать валентность примеси. 219. Правильно. 220. Учтите, что диффузия носителей увеличивается. 221. Правильно, вентильные свойства определяют изгиб характеристики. 222. Правильно. 223. Укажите более важное достоинство. 224. Диффузия применяется при изготовлении плоскостных диодов. 225. У кремниевого диода — несколько увеличивается. 226. Для выпрямления высокочастотных токов применяются точечные диоды. 227. При пробое варикапы теряют свои свойства. 228. Используют только диоды, у которых есть участок отрицательного сопротивления. 229. От типа транзистора зависит полярность, но не направление включения. 230. Ответ неполный. 231. Ток базы уве-

личится. 232. Правильно. 233. На коллекторе транзистора типа $n-p-n$ должен быть плюс. 234. Для различных схем включения коэффициент усиления разный. 235. Ошибка в вычислениях.

Консультации к главе 17

1. Правильно. 2. Не только. Свет имеет двойственную природу. 3. Неверно. Ведь вольтовая зона и зона проводимости у металлов перекрываются. 4. Правильно. 5. Неверно. В схеме с освещенным фотодиодом возникает фото-ЭДС, направленная против E_a . 6. Неверно. В базе существует и электронный ток. 7. Неверно. Можно, так как фототранзистор обладает усилительными свойствами. 8. Неверно. Не путайте полупроводниковый фоторезистор с полупроводниковым диодом. 9. Неверно. Каким бы ни был спектральный состав излучения, энергия фотона не зависит от Φ . 10. Неверно. В ФЭУ происходит усиление тока и, следовательно, $I_a > I_k$. 11. Не только электронами. Дырки также участвуют в образовании тока. 12. Правильно. 13. Неверно. В схеме с неосвещенным фотодиодом источник E_a включен в обратном направлении и поэтому ток I_2 очень мал. 14. Неверно. Читайте консультацию № 28. 15. Неверно. При коротком замыкании R_2 напряжение между диодами D_1 и D_2 станет равным нулю и, следовательно, ток ФЭУ упадет до нуля. 16. Неверно, читайте консультацию № 3. 17. Неверно. Читайте консультацию № 5. 18. Неверно. В схеме (см. рис. 17.13) темновой ток больше за счет положительного напряжения, приложенного к участку эмиттер—база. 19. Неверно. Читайте консультацию № 74. 20. Неверно. Ведь это полное напряжение источника U_a . 21. Это невозможно, так как $U_\phi + U_a = E$, и если U_ϕ увеличивается, то U_a должно уменьшиться. В действительности U_ϕ уменьшается, а U_a растет. 22. Неверно. Полярность освещенного фотодиода обратна выбранной вами. 23. Не только. Свет имеет двойственную природу. 24. Правильно. Разъяснения в консультации № 15. 25. Правильно. 26. Неверно. Вспомните принцип действия транзистора. 27. Неверно, скорость будет уменьшаться. 28. Неверно. Наоборот, электроны базы снижают потенциальный барьер, способствуя увеличению дырочного тока. 29. Правильно. 30. Неверно. Вспомните принцип действия транзистора. 31. Правильно. 32. Неверно. Энергия фотонов зависит от частоты излучения. 33. Неверно. Рассмотрите внимательно энергетическую характеристику фоторезистора (см. рис. 17.7). 34. Правильно. 35. Не только дырками. Электроны также участвуют в образовании тока. 36. Неверно. Читайте консультацию № 15. 37. Неверно. При любой конструкции фототранзистор обладает усилительными свойствами. 38. Неверно. Наоборот, уменьшается. 39. Неверно. Полярность неосвещенного фотодиода обратна выбранной вами. 40. Неверно. Ведь происходит усиление тока фотокатода. 41. Весьма несущественное. Главное различие — функциональное. 42. Неверно. Вспомните зависимость энергии фотона от частоты излучения. 43. Неверно. Резисторы выполняют из проводящих материалов, в которых дырочного тока не существует. 44. Правильно. Так как электрические свойства полупроводников сильно зависят от температуры. 45. Неверно. Читайте консультацию № 52. 46. Неверно. Таково напряжение на фотоэлементе. 47. Неверно. Наоборот, U_a увеличится, а U_ϕ уменьшится, так как сопротивление фоторезистора уменьшается. 48. Правильно. 49. Неверно. Когда $\Phi = 0$, внутреннее сопротивление фотоэлемента очень велико. 50. Правильно. 51. Неверно. Изучите внимательно материал параграфа.

52. Неверно. Это влияние сильнее в ФЭУ, так как чувствительность ФЭУ гораздо выше, чем у фотоэлемента. 53. Неверно. Если U_ϕ уменьшается, то U_a должно увеличиться, так как $U_\phi + U_a = E$. 54. Правильно. 55. Правильно. 56. Неверно. Даже при низких температурах имеет место очень незначительный ток термоэлектронной эмиссии (темновой ток). 57. Правильно. 58. Неверно. Электрическая характеристика нелинейна. 59. Неверно. В основном ток обеспечивается дырками. 60. Правильно. 61. Неверно. Неосвещенный фотодиод функционально ничем не отличается от обычного полупроводникового диода. 62. Неверно. Читайте консультацию № 8. 63. Неверно. В этом случае R_i весьма мало. 64. Правильно. 65. Правильно. 66. Неверно. При больших значениях Φ внутреннее сопротивление фотоэлемента R_i резко уменьшается, так что $R_i < R_a$. 67. Правильно. 68. Правильно. 69. Неверно. Только явлением вторичной эмиссии. 70. Неверно. При $\Phi = 0$ имеет место ток термоэлектронной эмиссии, хотя и очень незначительный. 71. Неверно. Ток диодов обусловлен явлением вторичной эмиссии. 72. Грубая ошибка. 73. Неверно. Читайте консультацию № 43. 74. Неверно. Ведь электрические свойства полупроводников сильно зависят от температуры. 75. Неверно. Ведь неосвещенный фотодиод может выполнять выпрямительные функции. 76. Правильно. 77. Неверно. Читайте консультацию № 18. 78. Грубая ошибка. 79. Неверно. 80. Правильно. 81. Правильно. 82. Правильно. Пояснения в консультации № 5. 83. Правильно. 84. Неверно. Напряжение на R_a не изменится. 85. Правильно. 86. Неверно. Читайте консультацию № 13. 87. Правильно. 88. Правильно. 89. Правильно. Пояснения в консультации № 18. 90. Правильно. 91. Правильно.

Консультации к главе 18

1. Неверно. Работа диода построена на неравенстве прямого и обратного сопротивлений. 2. Неверно. Вспомните свойства последовательной цепи. 3. Правильно. 4. Неверно. Ток в нагрузке достигает нуля при $t_a = T/2$. 5. Неверно. $U_{\text{обр}}$ как раз равно амплитуде линейного напряжения. 6. Правильно. 7. Правильно. 8. Неверно. Обратное сопротивление идеального диода бесконечно велико. 9. Правильно. 10. Неверно. Ведь конденсатор фильтра заряжается чаще. 11. Неверно. Прямое сопротивление идеального диода равно нулю. 12. Правильно. 13. Неверно. Большая часть энергии должна выделяться на нагрузку, а для этого необходимо, чтобы $R_a > R_{\text{пр}}$. 14. Неверно. Проследите цепь тока, соединив точку «а» с точкой «б» в схеме на рис. 18.4. 15. Несущественно. Любой выпрямитель, как нелинейный элемент, искажает выпрямленное напряжение. 16. Неверно. Обратите внимание на графики рис. 18.5. 17. Правильно, так как обратное сопротивление лампового диода значительно выше обратного сопротивления полупроводникового диода. 18. Неверно. Ток такой формы проходит через вторичную обмотку трансформатора. 19. Правильно. 20. Возможно, но тогда, когда напряжение сети обеспечивает требуемое выпрямленное напряжение. 21. Неверно. Необходимо, чтобы $R_a > R_{\text{пр}}$. 22. Неверно. Это характерно для трехфазного выпрямителя. 23. Неверно. Вы не учитываете, что напряжение на нагрузке имеет импульсную форму. 24. Правильно. 25. Грубая ошибка. 26. Неверно. Эти параметры соответствуют реальному диоду. 27. Неверно. Это значение соответствует двухполупериодному выпрямителю. 28. Неверно. В принципе возможно, когда напряжение сети обеспечивает требуемое выпрямленное напряжение.

29. Грубая ошибка. 30. Неверно. Это значение соответствует трехфазному выпрямителю. 31. Неверно. Ведь время разрядки конденсатора C_p уменьшится. 32. Неверно. Подача управляющего импульса в интервале $T/2 < t_y < T$ бессмысленна. 33. Правильно. 34. Правильно. 35. Неверно. Вспомните свойства последовательной цепи. 36. Неверно. Смотрите консультацию № 13. 37. Неверно. Учтите, что через вторичную обмотку проходит переменный ток. 38. Правильно. 39. Неверно. Учтите, что при разрядке (см. рис. 18.10) C_1 и C_2 включены последовательно. 40. Неверно. Обратите внимание на графики рис. 18.5. 41. Неверно. Такое напряжение характерно для трехфазного выпрямителя. 42. Неверно. Каждый диод мостовой схемы открыт только в течение одного полупериода. 43. Неверно. Читайте консультацию № 17. 44. Неудачно. Необходимо, чтобы $R_{11} \gg R_p$. 45. Грубая ошибка. Если $U_{\text{эм}}$ станет отрицательным, транзистор заперется и $U_{\text{эм}}$ окажется равным нулю. 46. Неверно. Изучите еще раз материал параграфа. 47. Неверно. Вспомните назначение элементов фильтра. 48. Неверно. 49. Правильно. 50. Неверно. Это характерно для идеального диода. 51. Неверно. При таком соотношении доля полезного сигнала меньше 50%. 52. Неверно. 53. Неверно. Так как $U_{\text{эф.н}} = \sqrt{3} U_m$, а $U_m = \sqrt{2} U$, значит, $U_{\text{эф.н}} = \sqrt{6} U$. 54. Неверно. При данных условиях выпрямление однополупериодное. 55. Правильно. 56. Правильно. 57. Неточный ответ. Прямое сопротивление должно быть гораздо меньше обратного. 58. Правильно. 59. Неверно. Необходимо учесть, что время разрядки конденсатора уменьшится. 60. Неверно. Ток в нагрузке достигает максимума при $i_a = 0$. 61. Правильно. 62. Неверно. Читайте консультацию № 14. 63. Неверно. Продумайте назначение элементов фильтра. 64. Правильно. 65. Правильно. 66. Неверно. Емкости в этих схемах различны. 67. Неверно. Если управляющий импульс действует не менее 10 мкс, то тиристор не запирается. 68. Правильно. 69. Неверно. Читайте консультацию № 10. 70. Неверно. Стабилизатор обеспечивает стабилизацию напряжения. 71. Правильно. 72. Неточно. См. консультацию № 67. 73. Неверно. Изучите еще раз материал параграфа. 74. Правильно. 75. Правильно. 76. Неверно. Читайте консультацию № 17. 77. Правильно. 78. Правильно. 79. Правильно.

Консультации к главе 19

1. Неверно. Ведь точка пересечения линии CD и выходной характеристики не меняет своего положения. 2. Неверно. Подумайте, как определяют $I_{\text{кз}}$ когда $E_k = 0$. 3. Неверно. Если, например, при повышении температуры коллекторный ток возрастает, то напряжение на коллекторе уменьшится, что приведет к уменьшению напряжения на R_2 и, следовательно, к увеличению потенциала базы и уменьшению тока коллектора. 4. Неверно. Таким будет коэффициент усиления по мощности, а речь идет о коэффициенте усиления по напряжению. 5. Неверно. Это выражение соответствует отрицательной обратной связи. 6. Правильно. Сопротивление резистора от частоты не зависит. 7. Неверно. Амплитуда, наоборот, увеличивается, но форма сигнала искажается. 8. Правильно. 9. В принципе правильно, но трансформатор в этом случае не нужен. 10. Неверно. Для правильного ответа на вопрос необходимо выяснить, как изменится положение линии CD . 11. Неверно. Делитель переменного напряжения составлен резисторами R_1, R_2 . 12. Неверно. При таком соотношении меньшая часть полезного напря-

жения выделяется на входе усилителя. 13. Неверно. Коэффициент усиления увеличится, так как исчезнет отрицательная обратная связь в первом каскаде и стабильность в работе схемы ухудшится. 14. Правильно. 15. Неверно. Сдвиг линии CD происходит при изменении E_k . 16. Неверно. Наиболее равномерное усиление обеспечивает резистивная нагрузка. Однако иногда применяют активно-индуктивную нагрузку для коррекции усиления на высоких частотах. 17. Правильно. 18. Наоборот. Выясните, каково значение β в данном случае. 19. Неверно. Наоборот. 20. Правильно, так как в первом каскаде не будет отрицательной обратной связи. 21. Неверно. Каким бы ни было это соотношение, отрицательная обратная связь действует. Читайте консультацию № 3. 22. Неверно. При таком соотношении входной сигнал будет искажаться. 23. Неверно. 24. Неверно. Вспомните условия резонанса токов. 25. Неверно. Читайте консультацию № 15. 26. Неверно. Так как напряжение на коллекторе последующего каскада выше, чем напряжение на коллекторе предыдущего, и поскольку на резисторах R создается напряжение, компенсирующее постоянную составляющую выходного напряжения предыдущего транзистора, необходимо, чтобы $R_{11} < R_{12} < R_{13}$. 27. Неверно. При таком соотношении сопротивление участка контур-вольметр значительно снизится. 28. Неверно. Необходимо, чтобы $X_C \ll R_{11}$. 29. Правильно. 30. Неверно. Ведь индуктивная нагрузка имеет сопротивление, значение которого сильно зависит от частоты. 31. Неверно. Ведь $R_0 = (E_k - U_{\text{эм}}) / I_{\text{кз}}$. 32. Правильно. 33. Неверно. Вспомните условия резонанса токов. 34. Правильно. Так как точка B выходной характеристики соответствует точке B входной, а в этой части входная характеристика нелинейна. 35. Правильно. 36. Правильно. 37. Правильно. 38. Правильно. 39. Правильно, так как $K_{\text{н}}$ не может принимать отрицательных значений. 40. Неверно. Первый каскад схемы на рис. 19.10 собран на трансформаторе. Усиление такого каскада сильно зависит от частоты. 41. Неверно. Однако стабильность работы ухудшится, так как в первом каскаде не будет отрицательной обратной связи. 42. Неверно. При шунтировании R_2 емкостью сопротивление этого участка переменному току уменьшится; следовательно, и напряжение обратной связи уменьшится. 43. Неверно. Читайте консультацию № 27. 44. С точки зрения выделения постоянной составляющей неверно. 45. Правильно. 46. Неверно. Читайте консультацию № 26. 47. Неверно. Это выражение соответствует отрицательной обратной связи. 48. Неверно. Читайте консультацию № 42. 49. Неверно. Наличие трансформатора в схеме на 19.4 приводит к заметным частотным искажениям. 50. Правильно. Так как в противном случае ток базы будет искажен по сравнению с входным напряжением, а это приведет к искажению входного сигнала. 51. Правильно. 52. Неверно. При частотных искажениях изменяется форма полезного сигнала, так как различные гармоники, составляющие сигнал, усиливаются неравномерно. 53. Правильно. Подробности в консультации № 3. 54. Правильно. 55. Неверно. Читайте консультацию № 40. 56. Неверно. Усилители постоянного тока предназначены для усиления медленно-меняющихся сигналов. 57. Неверно. При таком соотношении КПД станет ниже максимально возможного. 58. Неверно. Читайте консультацию № 93. 59. Неверно. Читайте консультацию № 1. 60. Неверно. Это выражение соответствует положительной обратной связи. 61. Неверно. Небольшая неустойчивость R_k возможна. 62. Неверно. В этом случае трансформатор не нужен. 63. Неверно. Наличие трансформатора приводит к значительным частотным искажениям. 64. Неверно. Делитель по-

стоянного напряжения составлен резисторами R_1, R_2, R_3 . 65. Правильно. Пояснение в консультации № 26. 66. Неверно. Читайте консультацию № 93. 67. Правильно. При этом КПД достигнет 50 %. 68. Правильно. Однако при этом форма усиливаемого сигнала будет искажена. 69. Неверно. Необходимо еще знать ток $I_{\text{до}}$. 70. Неверно. Выясните, в чем главная разница между режимами А и В. 71. Правильно. Так как УПТ предназначены только для усиления медленно меняющихся сигналов. 72. Неверно. Читайте консультацию № 81. 73. Неверно. Это соотношение невыполнимо. 74. Правильно. 75. Грубая ошибка. 76. Неверно. Уменьшение $I_{\text{кв}}$ желательно. 77. Неверно. Ведь необходимо определить коэффициент усиления в децибелах. 78. В принципе верно, но лучше, чтобы $X_C \ll R_{\text{ан}}$. 79. Правильно. 80. Неверно. Искажается только форма сигнала. 81. Неверно. Включение резистора приведет к созданию отрицательной обратной связи. 82. Правильно. 83. Неверно. Читайте консультацию № 10. 84. Неверно. В этом случае трансформатор не нужен. 85. Неверно. Частота не изменяется, искажается форма полезного сигнала. 86. Правильно. 87. Правильно. 88. Правильно. Пояснение в консультации № 52. 89. Неверно. Читайте консультацию № 10. 90. Правильно, так как возникает отрицательная обратная связь. 91. Неверно. 92. Неверно. Небольшие изменения $E_{\text{н}}$ несущественны. 93. Неверно. $I_{\text{до}}$ должно быть близким к нулю, а для этого $U_{\text{д}}$ также должно быть весьма малым, что возможно при $R_1 \gg R_2$. 94. Неверно. Читайте консультацию № 31. 95. Правильно. 96. Правильно.

Консультации к главе 20

1. Неверно. Точность измерения повысится. 2. Правильно. 3. Правильно. Это одновременно обеспечит прежние соотношения между X_C и R цепи RC . 4. Неверно. Это гиперболическая зависимость. 5. Неверно. Длительности перезарядки конденсаторов не равны. 6. Неверно. При таком соотношении старое изображение может мешать новому. 7. Правильно, так как в этом пространстве на них действует электрическое поле. 8. Неверно. Читайте консультацию № 22. 9. Неверно. Нестабильность в работе управляющего устройства не влияет на точность измерений. 10. Неверно. Читайте консультацию № 16. 11. Неверно. Ведь сдвиг по фазе в каждом звене определяется только соотношением X_C/R . 12. Неверно. Рассмотрение векторной диаграммы (см. рис. 20.4) показывает, что напряжение обратной связи не будет в противофазе с коллекторным напряжением ни при каком значении емкости. 13. Неверно. Читайте консультацию № 34. 14. Неверно. При любой конструкции электродов в пространстве между первым анодом и катодом действует электрическое поле и происходит предварительная фокусировка электронов. 15. Неверно. Сопротивление зажженной лампы весьма мало, а погасшей очень велико. 16. Неверно. При увеличении $U_{\text{д}}$ потенциал сетки L_1 уменьшается, а потенциал анода увеличивается. При этом за счет уменьшения анодного тока уменьшается падение напряжения на R_2 и потенциал сетки L_2 увеличивается. Это приводит к уменьшению потенциала анода L_2 . 17. Неверно. Вы забыли, что схема, представленная на рис. 20.9, работает в ждущем режиме. 18. Неверно. Читайте консультацию № 7. 19. Неверно. Читайте консультацию № 73. 20. Правильно. 21. Неверно. В этом случае выходное напряжение будет изменяться по закону зарядки C (см. рис. 20.8)

22. Неверно. Для правильного ответа необходимо рассчитать входное сопротивление во всех положениях переключателя. 23. Правильно. 24. Неверно. Читайте консультацию № 34. 25. Неверно. Эта работа на пределе. Необходимо, чтобы $U_m > U_{\text{ан}}$. 26. Неверно. Читайте консультацию № 12. 27. Влияние $L_{\text{к}}$ весьма мало и практически не учитывается. 28. Неверно. Максимальному пределу соответствует положение 3, когда часть напряжения необходимо погасить на $R_{1\text{д}}$ и $R_{2\text{д}}$. 29. Правильно. Пояснение в консультации № 12. 30. Неверно. Читайте консультацию № 53. 31. Неверно. Ведь неустойчивость частоты будет означать, что одному и тому же значению измеряемой величины соответствует различное количество импульсов, проходящих на счетчик. 32. Правильно. 33. Неверно. Во время перезарядки C_1 заперт транзистор T_2 , и наоборот. Следовательно, $T_2 > T_1$. 34. Правильно, так как постоянная времени перезарядки $\tau_{\text{к}} = R_{\text{к}}C$ должна быть больше постоянной времени зарядки $\tau_{\text{з}} = R_{\text{з}}C$. 35. Неверно. Ведь интервал времени $0 \rightarrow t_1$ меньше, чем интервал $t_1 \rightarrow t_2$, но в момент t_1 луч должен оказаться в середине экрана. В это время напряжение $u_{\text{гг}} > 0$; следовательно, положительный полупериод затягивается. 36. Правильно. 37. Неверно. Соотношение между R_1 и R_2 определяет режим работы каскада и не оказывает существенного влияния на условия самовозбуждения. 38. Неверно. Если $U_{\text{к}} > U_{\text{ан}}$, то при всех значениях $U_{\text{к}}$ показания приборов будут неизменны. 39. Правильно. Убедитесь в этом с помощью расчета. 40. Правильно. 41. Неверно. Читайте консультацию № 35. 42. Грубая ошибка. При таком соотношении все значения $U_{\text{к}} > U_{\text{ан}}$ будут измеряться с ошибкой тем большей, чем больше разность $U_{\text{к}} - U_{\text{ан}}$. 43. Правильно. 44. Неверно. Изучите внимательно материал параграфа. 45. Правильно. 46. Правильно. Поэтому работа такого генератора стабилизирована кварцевой пластиной. 47. Правильно. 48. Неверно. Для того чтобы между $U_{\text{к}}$ и показаниями приборов была функциональная связь, необходимо, чтобы $U_{\text{к}} < U_{\text{ан}}$. 49. Неверно. Читайте консультацию № 11. 50. Неверно. Так было бы, если бы $u_{\text{к}} = U_{\text{ан}} \cos \omega t$. 51. Правильно. 52. Правильно. 53. Неверно. При таком соотношении выходное напряжение будет изменяться по экспоненте. 54. Неверно. Изменение $R_{\text{к}}$ приводит к изменению длительности зарядки C_1 и C_2 , а этот параметр не влияет на длительность импульсов на коллекторах транзисторов. 55. Неверно. Такая стабилизация ничего не дает. 56. Неверно. В схеме на рис. 20.6 это никак не влияет на работу генератора. 57. Неверно. Читайте консультацию № 22. 58. Неверно. Важно, чтобы общий сдвиг фаз между коллекторным и базовым напряжением составил 180° . 59. Правильно. 60. Неверно. Читайте консультацию № 72. 61. Правильно. 62. Неверно. Читайте консультацию № 17. 63. Правильно. 64. Неверно. Какой бы малой ни была частота, каждое звено цепи RC обеспечивает сдвиг по фазе менее 90° . 65. Правильно. Пояснения в консультации № 28. 66. Правильно. 67. Неверно. Читайте консультацию № 104. 68. Неверно. В этой области электроны еще разгоняются. 69. Грубая ошибка. Читайте консультацию № 15. 70. Правильно. 71. Правильно, так как каждое звено обеспечивает сдвиг по фазе менее 90° . 72. Неверно. Конденсатор C_2 блокирует переменную составляющую на R_2 , и тем самым устраивает отрицательную обратную связь по переменному току. 73. Неверно. Ведь C_1 перезаряжается и напряжение на нем приближается к нулю, а C_2 заряжен до напряжения $+E_{\text{н}}$. 74. Неверно. Читайте консультацию № 58. 75. Неверно. В этой области электроны движутся по инерции. 76. Правильно.

Пояснения в консультации № 73. 77. Неверно. В этом положении потенциал управляющего электрода максимальный и, следовательно, яркость максимальна. 78. Неверно. Отклонение E_d в определенных пределах от номинального значения не влияет на условия самовозбуждения. 79. Неверно. Схема не будет работать. 80. Неверно. Так было бы, если период изучаемого сигнала был бы в два раза меньше периода развертывающего напряжения. 81. Правильно. 82. Неверно. Читайте консультацию № 54. 83. Неверно. Электрические силы в этом пространстве не действуют. 84. Правильно. 85. Правильно. 86. Неверно. Максимальная скорость в области второго анода. За ним электроны больше не ускоряются. 87. Неверно. Читайте консультацию № 98. 88. Неверно. Учтите, что общий сдвиг по фазе 180° . 89. Неверно. Среднему положению будет соответствовать средняя яркость. 90. В принципе правильно, но лучше $\tau_2 \gg T_1$. 91. Неверно. Прочтите еще раз материал параграфа. 92. Правильно. Пояснения в консультации № 35. 93. Неверно. 94. Правильно. 95. Неверно. C_1 и C_2 практически не влияют на частоту колебаний автогенератора. 96. Неверно. Длительность импульсов определяется постоянной времени перезарядки $\tau_n = R_0 C$. 97. Правильно. 98. Неверно. Это ничего не дает. Надо изменить фазу напряжения обратной связи. 99. Правильно. 100. Неверно. Так было бы, если бы $u_{yy} = -U_m \sin \omega t$. 101. Неверно. Только $\tau_n = R_0 C$. 102. Неверно. При таком соотношении схема не будет работать. 103. Правильно. 104. Неверно. Вы не учли, что еще необходимо обеспечить нужный сдвиг по фазе в цепи RC . 105. Правильно. 106. Неверно. Это параболическая зависимость. 107. Неверно, так как это схема автогенератора. 108. Неверно. Читайте консультацию № 16. 109. Правильно. 110. Правильно. 111. Неверно. Уясните назначение анодов в ЭЛТ. 112. Правильно. 113. Неверно. Схема не будет работать. 114. Правильно. 115. В общем так, но точнее $R_A \ll R_n$. 116. Неверно. Наоборот, повысится. 117. Неверно. Уясните назначение анодов в ЭЛТ. 118. Неверно. При таком соотношении изображение в целом нельзя увидеть. 119. Правильно, так как емкость C должна полностью разрядиться к приходу следующего запускающего импульса. 120. Правильно.

Консультации к главе 21

1. Укажите еще ряд направлений совершенствования элементной базы. 2. Это важная особенность, но не единственная. 3. Правильно, современные технологии позволяют это сделать. 4. Микросхемы с таким сочетанием пленок не применяют. 5. Применяют и другие виды сварки. 6. Укажите, какие еще контакты применяют для этой цели. 7. Правильно, различные микроэлементы изготавливают из разных пленок. 8. Для изготовления подложек используют и другие материалы. 9. Титанат бария входит в состав диэлектрических паст. 10. Толстопленочные схемы дешевле (в среднем) других микросхем. 11. Укажите еще ряд материалов, применяемых для этой цели. 12. Правильно, этот метод не применяют в технологии толстых пленок. 13. Здесь можно применить менее дорогой метод. 14. Фотошаблон содержит уменьшенное изображение микросхемы. 15. Центрифугирование — один из основных методов нанесения фоторезиста. 16. Повторите последовательность технологических операций. 17. Активные элементы тонкопленочных схем изготавливают навесными. 18. МДП-транзисторы находят применение

в полупроводниковых ИМС. 19. Пленка из диоксида кремния выполняет целый ряд функций. 20. Вы ошиблись в вычислениях. 21. Дайте более полный ответ. 22. В многослойной структуре пленка наносится на обе стороны основания. 23. Используется в гетерозиптаксимальных структурах. 24. Правильно. В центрифуге получают более однородную пленку. 25. Правильно. 26. Правильно. 27. В процессе формирования «карманов» маски меняют. 28. Правильно, к площадкам припаивают тонкие проволочки выводов. 29. Правильно, пассивные элементы изготавливают из пленок. 30. Укажите более обобщенные группы интегральных микросхем. 31. Ответ неполный. 32. Правильно, характерна технология изготовления. 33. Современные технологии позволяют получить столь высокую плотность элементов. 34. Пассивные и активные элементы сочетаются во всех микросхемах. 35. Применяются и другие виды сварки. 36. Правильно, в навесных элементах используют различные контакты. 39. Порошок из сегнетокерамники вводят в диэлектрические пасты. 40. Правильно, навесные элементы входят в толстопленочные микросхемы. 41. Правильно, все перечисленные и ряд других материалов. 42. Подогревом подложки. 43. Правильно, электронный луч расплавляет самые тугоплавкие металлы. 44. Правильно. Отпечаток получают при многократном уменьшении. 45. Правильно. Облученные участки такого фоторезистора растворяются. 46. Правильно. На поверхности подложки остается только пленочная схема. 47. Активные элементы этих схем навесные. 48. Важна также работоспособность кремния при высоких температурах. 49. Пленка диоксида кремния имеет многоцелевое назначение. 50. Дайте более точный ответ. 51. Ответ неполный. 52. Правильно, пленка наносится с двух сторон подложки. 53. Поверхность пластины покрыта эпитаксиальным слоем. 54. Через фотошаблон фоторезист облучают ультрафиолетовым светом. 55. Обратитесь к рис. 21.9, операция 8. 56. Большинство перечисленных элементов получают с помощью p - n -перехода. 57. Правильно. Некоторые элементы соединяют участками кристалла. 58. Токопроводящие дорожки разделяют диэлектрическими пленками. 59. ИМС с этим уровнем содержат до 10 логических элементов. 60. Правильно. В частности, усилительные и генераторные ИМС относят к линейным. 61. Это одно из основных, но не единственное направление. 62. Активное сопротивление — пассивный элемент микросхем. 63. Неполный ответ. 64. Правильно, пленочные — пассивные, навесные — активные элементы. 65. Применяются также сварка лазерным лучом и ультразвуковая сварка. 66. Применяют и другие пленки. 67. Толщина подложки значительно больше. 68. Надежность — одно из достоинств толстопленочных схем. 69. Вы ошиблись. 70. Параметры толстопленочных микросхем высокостабильны. 71. Вакуумное напыление широко применяют в технологии пленок. 72. Назначение экрана — удалять молекулы, движущиеся мимо подложки. 73. Электронный луч применяют при напылении тугоплавких металлов. 74. Правильно. 75. Необлученные участки этого фоторезиста растворяются. 76. Проволочки припаивают к контактным площадкам. 77. Правильно, в полупроводниковых ИМС и активные и пассивные элементы формируют в объеме кристалла. 78. Это только одна из причин. 79. Правильно. Пленку получают окислением поверхности кристалла. 80. Найдите более точный ответ. 81. Правильно. 82. Пленка наносится с двух сторон одной и той же пластины. 83. Правильно, в атмосфере кислорода при повышенной температуре. 84. Правильно (см. рис. 21.9, операции 6 и 7). 85. Конденсаторы

и резисторы получают с помощью *p-n*-перехода. 86. После смыва защитной пленки в «карманах» формируют *p-n*-переходы. 87. Термокомпрессию используют для приваривания внешних выводов. 88. Микросхемы снабжены проволочными выводами. 89. В этом случае схема содержит от 10 до 100 логических элементов. 90. Полупроводниковые ИМС обозначаются цифрами 1, 5, 7, 91. Правильно. Отметим также, что эти факторы взаимосвязаны. 92. Этот элемент относится к пассивным элементам микросхем. 93. Может быть размещено как больше, так и меньше. 94. Правильно. Пассивные элементы целесообразно формировать в пленке. 95. Правильно. 96. Применяют также резистивные и диэлектрические пленки. 97. Диапазон толщин пленок значительно шире. 98. Правильно. Применяют и другие материалы: ситалл, сапфир. 99. Правильно. Толщину изменяют шлифовкой, ширину — лазерным лучом. 100. Назовите еще ряд материалов, применяемых для этой цели. 101. Метод химического осаждения применяют только для толстых пленок. 102. Правильно. 103. Выбывание электронов положительными ионами — физический процесс. 104. Этот метод применяют для нанесения любого фоторезиста. 105. Уясните разницу между позитивным и негативным фоторезистами. 106. Вы не правы. 107. Это основной тип транзисторов и интегральных микросхем. 108. Правильно. И то, и другое важно при формировании ИМС. 109. Правильно. При этом каждая микросхема может быть очень сложной. 110. Правильно. В других ответах указаны методы получения пленки. 111. Правильно. Для этого в осаждаемые молекулы добавляют примеси. 112. Кремниевые подложки широко применяют в эпитаксиальных структурах. 113. Неверный ответ. 114. Для получения «карманов» нужны дополнительные технологические операции. 115. Правильно. 116. Правильно. Меняя маски, меняют области проникновения примесей. 117. Пайку используют для присоединения внешних выводов. 118. Правильно. Эти проволочки часто изготавливают из золота. 119. Правильно. БИС содержит свыше 100 логических элементов. 120. Совмещены проволочные и навесные элементы. 121. Миниатюрность только одна из особенностей микросхем. 122. Трансформатор — пассивный элемент микросхем. 123. Найдите более полный ответ. 124. Эти элементы целесообразно делать пленочными. 125. Применяют и другие контакты. 126. Применяют также диэлектрические и проводящие пленки. 127. Это не единственный материал для подложек. 128. Правильно, кроме обеспечения электрических свойств необходима адгезия. 129. Термическая обработка обеспечивает только прочность пленки. 130. Укажите еще ряд материалов, применяемых для этой цели. 131. Этот метод находит применение в тонкопленочной технологии. 132. Для этой цели можно применить более простую технологию. 133. Правильно, отсюда и название метода. 134. Этот метод применяют для нанесения любого фоторезиста. 135. После облучения растворяются только отдельные участки фоторезиста. 136. Правильно, эти элементы обеспечивают надежный контакт. 137. Правильно, биполярные транзисторы проще. 138. Это только одна из функций окисной пленки. 139. Ошибка в вычислениях. 140. Вы ступали определение эпитаксии с методами ее получения. 141. Можно, если использовать соответствующие примеси. 142. Правильно. 143. Этим способом наносят пленку диоксида кремния. 144. Необлученный фоторезист защищал от растворения пленку двуокиси кремния. 145. Дiodы и транзисторы — активные элементы на *p-n*-переходах. 146. *p-n*-переходы формируют повторной диффузией примесей. 147. Пайку и термокомпрессию при-

меняют для сварки проволочных контактов. 148. Такие микросхемы называют пленочными. 149. Укажите более крупное деление. 150. Четными цифрами обозначаются гибридные схемы (два типа элементов). 151. Эта важная, но не единственная особенность. 152. Правильно, наличие *p-n*-перехода делает этот элемент активным. 153. Правильно, при этом размеры кристалла не превосходят долей мм^2 . 154. Резисторы нет смысла делать навесными, трансформаторы — можно. 155. Ответ неполный. 156. В этих областях техники особенно важно уменьшение массы и размеров. 157. Это только одна из основных областей применения микросхем. 158. В вычислительной и космической технике тоже эффективно. 159. Правильно. Область применения микросхем практически неограничена.

Консультации к главе 22

1. Правильно, в пятиричной системе нельзя написать 5. 2. Это число в двоичной системе записывается в виде 1011. 3. Число 101₂ означает 10₁₀. 4. Правильно, 1001₂=9₁₀, 11001₂=25₁₀, 100010₂=34₁₀. 5. Ответ неполный. 6. С перфигурованных карт программу вводят в ВЗУ. 7. Не забудьте, что с увеличением тока I_1 уменьшится $U_{\text{вых}}$. 8. Правильно, назначение схемы — получить импульсы с заданными характеристиками. 9. Вы перепутали названия логических операций. 10. Найдите более точный ответ. 11. В этом случае будет получен только один импульс последовательного кода. 12. Надо сложить числа 1011₂=11₁₀ и 111₂=7₁₀. 13. Правильно, знак числа учитывается знаком мантиссы. 14. Объем памяти определяется количеством колец. 15. Правильно, указанный объем памяти характерен для магнитного барабана. 16. Правильно, $2^5=32$. 17. Арифметическое устройство ЦЭВМ оперирует с числами, представленными в дискретной форме. 18. Правильно, ручные перфораторы относятся к устройствам ввода. 19. Универсальная ЦЭВМ может иметь сотни и тысячи терминалов. 20. Это один из этапов программирования. 21. Можно: 125 в шестиричной системе обозначает 53 в десятичной. 22. Вспомните, что $110_2=1 \cdot 5^2 + 1 \cdot 5^1 + 0 \cdot 5^0$. 23. Вы забыли прибавить единицу к последнему разряду обратного кода. 24. Правильно, ПУ служит для ручного управления. 25. В команду входят и другие элементы. 26. Из УУ в ВЗУ поступает не команда, а ее адрес. 27. При уменьшении тока I_1 ток I_2 увеличивается. 28. Для раздельного запуска нужны две сериальные импульсы. 29. Правильно. 30. Учтите, что при поступлении импульса первый разряд переполнится. 31. Правильно, в четырех триггерах записано четырехразрядное число. 32. Правильно, в этом случае суммирование осуществляется поразрядно. 33. Количество разрядов определяется заданной точностью вычислений. 34. Двух таких импульсов с избытком хватит для перемагничивания кольца. 35. Правильно, на магнитных дисках уместится больше слов, чем на других носителях. 36. Правильно, номер выхода равен числу. 37. Телеграфный код — пятизначный. 38. Правильно, информация, полученная с перфокарты, требует расшифровки. 39. Правильно. 40. Разработка метода решения задачи — это этап программирования. 41. Можно: 125 в восьмеричной системе — это 85 в десятичной. 42. Правильно: $1100_2=1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0=12_{10}$. 43. Вы ошиблись в вычислениях. 44. Правильно. 45. Правильно. Команды могут быть одноадресные, двухадресные и др. 46. Кнопкой «Пуск» запускают машину для решения задачи. 47. Триггер неограниченно долго

сохраняет устойчивое состояние. 48. Правильно, в этом случае триггер реагирует на каждый импульс. 49. Вспомните определение логического умножения. 50. Посмотрите, в каких случаях возникают единицы переноса. 51. Регистр может также хранить и выдавать числа. 52. При сложении двух единиц сумматор ОС-2 потеряет единицу переноса. 53. Правильно, меньше теряется значащих разрядов при умножении. 54. Правильно, два таких импульса перемагничивают кольцо. 55. Правильно, $360 : 2 = 180 \text{ с} = 3 \text{ мин}$. 56. Правильно, количество входов определяется разрядностью чисел. 57. Зависит от количества разрядов. 58. Правильно. 59. Это не единственная причина ошибок. 60. Машинные серии ЕС могут иметь различные характеристики. 61. В двоичной системе такая запись означает 2. 62. Вы ошиблись. 63. Правильно: $1111_2 = 15_{10}$; $111_2 = 7_{10}$; $10110_2 = 22_{10}$. 64. Чем больше объем памяти, тем меньше скорость выбора информации. 65. Из ВЗУ в УУ поступает команда. 66. Правильно, по окончании решения задачи УУ запускает УВО. 67. Правильно, триггер сохраняет новое состояние. 68. Раздельный запуск не используется для подсчета импульсов. 69. Вспомните определение операции логического сложения. 70. Учтите единицы переноса. 71. Регистр может осуществить преобразование кодов. 72. Учтите, что сложение производится поразрядно. 73. Количество значащих разрядов надо по возможности сохранять. 74. Правильно, такие импульсы не смогут перемагнитить кольцо. 75. Правильно, одна головка служит для записи и считывания адреса. 76. Количество входов дешифратора всегда равно количеству разрядов. 77. Правильно, стандартная перфокарта рассчитана на 12 разрядов. 78. Телеграфный аппарат — это электрифицированное механическое устройство. 79. ЯЛС используется для автоматической трансляции алгоритма в ЦЭВМ. 80. Такое быстрое действие теоретически возможно, но в серии ЕС не достигнуто. 81. Правильно. Запись 10 в любой системе означает ее основание. 82. Правильно: $110_2 = 1 \cdot 5^2 + 1 \cdot 5^1 + 0 \cdot 5^0 = 25 + 5 = 30_{10}$. 83. Неверно. 84. ПУ служит для ручного управления. 85. Правильно, из ОЗУ поступают числа, из УУ — код операции. 86. Правильно, именно в ВЗУ ее вводят с перфоносителей информации. 87. Правильно. 88. Такой выход называют счетным. 89. Правильно, истинность высказывания отрицается. 90. Правильно, схемы И играют роль управляемых вентилей. 91. Таким образом можно получить только два разряда последовательного кода. 92. Сумматор ОС-2 не учитывает единицу переноса. 93. Вы забыли знак порядка. 94. В этом случае ферритовое кольцо будет перемагничиваться. 95. Магнитный барабан позволяет записать информации значительно больше. 96. Количество входов равно количеству разрядов. 97. Правильно, контактным или фотоэлектрическим способом. 98. Информацию, полученную с перфораторов, надо расшифровывать. 99. Правильно, в ВЗУ вводят уже готовую программу. 100. Это один из этапов программирования. 101. Запись 10 в любой системе счисления означает ее основание. 102. Правильно представляем троичное число в виде суммы степеней основания и находим результат: 36. 103. Вы ошиблись. 104. Более высокую скорость выбора информации обеспечивает ОЗУ. 105. Правильно, устройство управления выбирает команду по ее адресу. 106. Триггер имеет два устойчивых состояния. 107. Правильно, этим подчеркивается, что импульс поступает на два входа. 108. Найдите более конкретный ответ. 109. Таким количеством триггеров можно отобразить число $2^4 - 1$. 110. Правильно, единицы переноса заставят сработать все триггеры. 111. Регистр позволяет также сдвинуть

разряды числа. 112. Два ОС-3 позволяют складывать числа в последовательном коде. 113. Деление чисел можно заменить их сложением по определенным правилам. 114. Такие импульсы тока не могут перемагнитить кольцо. 115. Разделите длину ленты на скорость ее движения. 116. Синхронное управление требует большего времени, чем асинхронное. 117. Эти устройства следует применять и при обработке осциллограмм. 118. Это немеханическое устройство. 119. Это не единственная причина ошибок в программе. 120. Правильно. 121. Переведите эту запись в десятичную систему. 122. Правильно: $210_3 = 2 \cdot 3^2 + 1 \cdot 3^1 + 0 \cdot 3^0 = 21_{10}$. 123. Можно, если использовать численные методы решения уравнений. 124. Это только один из элементов команды. 125. Признак результата прибавляется к адресу следующей команды. 126. Ток I_1 оказывает влияние на смещение лампы L_2 . 127. Укажите еще ряд функций схемы запуска. 128. Повторите определение конъюнкции. 129. Проследите движение сигналов по цепи триггеров. 130. Правильно, надо одновременно подать импульсы на обе шины считывания. 131. Правильно. 132. Правильно, количество ОС-3 определяется разрядностью чисел. 133. Кроме того, надо использовать дополнительный код. 134. Считывание возможно при большем значении импульсов тока. 135. Удваивать количество магнитных головок нет необходимости. 136. Количество входов дешифратора не зависит от его структуры. 137. Это максимальное количество просечек на перфокарте. 138. Электрифицированная пишущая машинка — механическое устройство. 139. Это только одна из возможных причин. 140. Максимальное быстродействие машин серии ЕС значительно больше. 141. Переведите двоичную запись в десятичную. 142. Вы ошиблись: в двоичной системе счисления нет цифры 2. 143. Вычитание заменяют сложением в дополнительном коде. 144. Правильно, такое объединение упрощает схему. 145. ВЗУ связано с арифметическим устройством через ОЗУ. 146. Параллельного соединения клемм здесь нет. 147. Правильно, динамический триггер выдает сигнал в виде переменного напряжения. 148. Правильно, конъюнкция (логическое умножение) выполняется схемой. 149. Правильно. 150. Первый триггер не изменит своего состояния. 151. Правильно, импульс переноса не образуется. 152. Правильно, АУ выполняет любую операцию, указанную в коде команды. 153. Правильно, только при этих условиях деление можно заменить сложением. 154. На кольцо записывается один разряд одного числа. 155. Еще одна головка нужна для адреса чисел. 156. Зависит не от кода, а от числа. 157. Зависит от кода. 158. Телеграф — это электрифицированное механическое устройство. 159. Есть более удобный для этой цели язык. 160. Правильно. При объединении машин в систему скорость можно увеличить. 161. Правильно. 162. Неверно. 163. При определенных условиях можно. 164. Нет только адреса. 165. У признака результата другое назначение. 166. Правильно. 167. Укажите более полный ответ. 168. Правильно, дизъюнкцию (логическое сложение) выполняет схема ИЛИ. 169. Правильно. 170. Можно, если одновременно подать два импульса считывания. 171. Вы ошиблись при сложении двоичных чисел. 172. Вводится знак мантиссы, а не знак числа. 173. Еще необходимы элементы для отображения знака. 174. Этих колец достаточно для записи только одного числа. 175. Магнитные диски позволяют записать больше информации. 176. Переведите двоичное число 10011 в десятичную систему. 177. Правильно, телеграфный код — пятизначный. 178. Эту информацию необходимо еще расшифровывать. 179. АЛГОЛ ориентирован на решение математи-

ческих задач. 180. Правильно, математическое обеспечение — это комплект программ. 181. Экономичность записи чисел несвойственна двоичной системе. 182. Вы ошиблись: $100110_2 = 38_{10}$. 183. Правильно, умножение заменяют сложением в прямом коде. 184. Укажите, какие блоки объединяют. 185. Правильно, признак результата прибавляется к адресу команды. 186. Правильно, абсолютная симметрия схемы практически невозможна. 187. Это только одна из задач схем запуска. 188. Логическое умножение выполняет схема И. 189. Триггер останется в прежнем состоянии. 190. Правильно. 191. Вы ошиблись в вычислениях. 192. Точность зависит от количества разрядов. 193. Правильно, в этом случае меньше вероятность перемагничивания колец за счет помех. 194. Правильно, $1000 \times 16 = 16\,000$. 195. Магнитная лента имеет значительно большую емкость. 196. Количество выходов равно основанию в степени 5. 197. Клавишные машины записывают информацию на перфолентах или перфокартах. 198. Вы перепутали назначение ручных и автоматических перфораторов. 199. Это один из этапов программирования решения задачи. 200. Для этой цели используют другой язык. 201. Правильно. «1» и «0» надежно изображаются импульсом. 202. Правильно. 203. При делении дополнительный код необходим. 204. Процессор объединяет другие блоки. 205. Все команды заранее записаны в ВЗУ и не меняются. 206. Не могут, так как схема всегда хотя бы немного несимметрична. 207. И в том и в другом триггере применяют различные импульсы. 208. Вспомните определение дизъюнкции (логического сложения). 209. Представьте число 1023_{10} в двоичной системе счисления. 210. Регистры не предназначены для счета импульсов. 211. Правильно, других сочетаний входных и выходных сигналов нет. 212. АУ выполняет все операции, записанные в программе. 213. Чем больше объем памяти ОЗУ, тем выше быстродействие машины. 214. Ферритовые матрицы имеют значительно меньшее время обращения. 215. Вы ошиблись, $360:2=180$ с. 216. Правильно, сокращение времени достигается за счет усложнения схемы. 217. Эти устройства целесообразно применять и в других случаях. 218. Вспомните принцип действия электрографического устройства. 219. Правильно. Поэтому перед решением задачи программу тщательно проверяют. 220. Эти характеристики присущи и некоторым другим ЦЭВМ. 221. У двоичной системы счисления есть более важное достоинство. 222. Ошибка в вычислениях. 223. Правильно, к обратному коду прибавляется единица. 224. ПУ не используется в автоматическом режиме работы машины. 225. Найдите более полный ответ. 226. Правильно, нет падения напряжения на анодных сопротивлениях. 227. У того и другого триггера два состояния. 228. Повторите определение логического сложения. 229. Триггер останется в прежнем состоянии. 230. Первый триггер останется в прежнем состоянии. 231. Вы перепутали сигналы, которые появляются на шинах. 232. Правильно, появляется возможность увеличить разрядность чисел. 233. Прямоугольная характеристика увеличивает помехоустойчивость. 234. Такой объем памяти потребовал бы слишком больших матриц. 235. Скорость работы машины задается блоком тактовых импульсов. 236. Время сокращается при асинхронном управлении. 237. Ответ неполный. 238. Экранные устройства вывода информации к механическим не относятся. 239. Для этой цели используют другой язык. 240. Ответ неполный. 241. Удерживать в заданных пределах высоту десяти импульсов труднее, чем трех. 242. Ошибка: $12_{10} = 110_2$. 243. Ошибка: $111_2 = 15_{10}$; $111_2 = 7_{10}$; $1111_2 = 31_{10}$. 244. Правильно. Зато ОЗУ

уступает ВЗУ по объему памяти. 245. Программа записывается в память ВЗУ. 246. Правильно. 247. Учтите, что правый транзистор закроется. 248. Правильно, логические уравнения можно моделировать схемами. 249. Еще раз проверьте свои рассуждения. 250. Часть триггеров останется в исходном состоянии. 251. На шине «Сумма» образуется единица. 252. Это неполный ответ. 253. Надежность не связана с объемом памяти машины. 254. Правильно, такое время обращения характерно для магнитных лент. 255. Правильно. Но частота импульса соответствует возможностям АУ. 256. АУ машины рассчитано на работу с дискретными сигналами. 257. Правильно. 258. Правильно, алфавитно-цифровое печатающее устройство — механическое. 259. Для автоматической трансляции программы используют другой язык. 260. Высокая скорость нужна также при управлении производственными процессами. 261. Правильно. 262. Ошибка: $10_{10} = 1010_2$. 263. Ошибка в вычислениях. Переведите числа в десятичную систему. 264. Ответ неполный. 265. Программа хранится в ОЗУ. 266. Только два. 267. Неверно. 268. Найдите более точный ответ. 269. Правильно: $1023 = 2^{10} - 1$. 270. Правильно, у регистра нет счетного входа. 271. Других комбинаций сигналов нет. 272. Ответ неполный. 273. Правильно, чем меньше объем памяти, тем меньше время обращения. 274. Для этого носителя характерно меньшее время обращения. 275. Скорость работы машины определяется блоком тактовых импульсов. 276. Правильно, АУ оперирует импульсными сигналами. 277. Вспомните назначение ручных клавишных перфораторов. 278. Правильно, количество терминалов может достигать многих сотен. 279. Это один из начальных этапов программирования. 280. Правильно, для этой цели используют язык логических схем. 281. Правильно. 282. Правильно, это следует из характеристик ЦЭВМ. 283. Проанализируйте характеристики ЦЭВМ. 284. Емкость оперативной памяти в некоторых случаях одинакова. 285. Быстродействие в некоторых случаях одинаково. 286. Укажите более важный (для рассматриваемого случая) фактор. 287. Правильно, управление должно быть осуществлено в реальном масштабе времени. 288. Укажите более важную характеристику. 289. Правильно. 290. Помимо арифметического устройства и устройства управления в кристалле микропроцессора есть и другие элементы. 291. Такое большое быстродействие не характерно для микропроцессоров. 292. Однокристалльная схема обычно применяется в специализированных и проблемно-ориентированных микропроцессорах. 293. Вы ошибаетесь. 294. Ответ неполный. 295. Для микропроцессоров характерно меньшее быстродействие. 296. Правильно: при увеличении разрядности с 4 до 32 бит точность вычислений увеличивается с 12,5 до 0,00001%. 297. Это зависит от принципа управления. 298. Учтите, что при аппаратном принципе управления перестройка программы управления невозможна. 299. Микропроцессор содержит и другие элементы. 300. Правильно, эти микропроцессоры допускают изменение программы управления. 301. Для микропроцессоров характерно более высокое быстродействие. 302. Правильно. 303. В этом случае основную роль играет принцип управления. 304. Стоимость увеличивается. 305. Правильно, быстродействие микропроцессоров лежит в пределах от 200 тыс. до 2 млн. опер./с. 306. Точность работы увеличивается. 307. Правильно. Каждый разряд двоичного числа содержит 1 бит информации. 308. Космические аппараты движутся с большой скоростью, поэтому многие вычисления должны выполняться очень быстро. 309. Принцип управления определяет универсальность МП. 310. Микропроцессор

перерабатывает информацию, поступающую в числовой форме. 311. Правильно. 312. Найдите в таблице 22,4 разрядность, которую имеет «Электроника С5-21». 313. Для расчетов, связанных с движением космических аппаратов, характерна очень высокая точность. 314. ОЗУ обеспечивает вычислительный процесс в микропроцессоре. 315. «Электроника С5-21» оперирует 16-разрядными двоичными числами. 316. Правильно, космические аппараты предъявляют очень высокие требования к бортовой вычислительной технике. 317. Быстродействие «Электроники 60» примерно в 2 раза меньше. 318. Правильно, указанное преобразование выполняет аналого-цифровой преобразователь. 319. Быстродействие микроЭВМ «Электроника 60» выше указанной цифры. 320. Правильно. 321. Большие интегральные схемы имеют самое широкое применение. Найдите более конкретный ответ. 322. Для космических исследований необходима не только большая точность вычислений. 323. Вы ошиблись. 324. Постоянное запоминающее устройство предназначено для хранения и выдачи двоичных чисел. 325. Цифро-аналоговый преобразователь преобразует последовательность двоичных чисел в непрерывный сигнал. 326. Размеры и масса микропроцессора сравнительно невелики по отношению к размерам и массе микроЭВМ. 327. Количество шагов программы ограничено; следовательно, ограничена и ее сложность. 328. Правильно, в непрограммируемых микрокалькуляторах нет необходимости хранить программы. 329. В оперативном запоминающем устройстве хранятся числа, с которыми оперирует АЛУ, и результаты промежуточных операций. 330. Вы не учли разряды порядка. 331. ОЗУ может быть выполнено в одном кристалле БИС. 332. Оперативное запоминающее устройство необходимо всем микрокалькуляторам. 333. Правильно, в частности, органы ручного управления (клавиши) не могут быть слишком маленькими. 334. Этот блок имеется у всех микропроцессоров. 335. Правильно, количество шагов программы не превышает 98. 336. Два разряда используются только для записи порядка числа. 337. Программы хранятся в специальном запоминающем устройстве. 338. Правильно. 339. Размеры ПЗУ можно уменьшить до размеров кристалла БИС. 340. Нужны еще разряды для записи порядка числа. 341. Правильно, восемь разрядов для мантиссы, два — для порядка. 342. Стекло — это сверхоперативная память машины, в нем может временно храниться всего несколько чисел. 343. Правильно. 344. Укажите более полный ответ. 345. Электронные устройства есть почти во всех узлах роботов. 346. В металлургии и машиностроении тоже надо применять роботы. 347. Ознакомьтесь с таблицей технических данных манипуляторов. 348. Правильно. 349. Рабочего может заменить и обычный автомат. 350. Многозвенный манипулятор тоже обеспечивает свободу перемещений. 351. Правильно, эти особенности позволяют отличать робот от других автоматов. 352. Не только в датчиках, но и в программирующих устройствах. 353. Такая точность позиционирования еще не достигнута. 354. В атомной промышленности тоже широко применяют манипуляторы. 355. Правильно. 356. В датчиках тоже используют электронные устройства. 357. Эта цифра характеризует другой робот. 358. Дайте более полный ответ. 359. Шасси обеспечивает способность перемещаться всему роботу. 360. Правильно. 361. Программа решения этих задач по определению свойств дифференциальных уравнений и подсчету количества парных простых хранятся во внешнем запоминающем устройстве (ВЗУ).

ЛИТЕРАТУРА

- Бочаров Л. Н. Электронные приборы. М., 1979.
 Долин П. А. Основы техники безопасности в электроустановках. М., 1979.
 Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. М., 1980.
 Иванов Е. Л., Степанов И. М., Хомиков К. С. Периферийные устройства ЭВМ и систем. М., 1987.
 Касаткин А. С., Немцов М. В. Электротехника. М., 1999.
 Общая электротехника / Под ред. А. Т. Блажнина. Л., 1986.
 Овечкин Ю. А. Полупроводниковые приборы. М., 1979.
 Основы метрологии и электрические измерения / Под ред. Е. М. Душина. Л., 1987.
 Стрыгин В. В. Основы автоматики и вычислительной техники. М., 1981.
 Электротехника / Под ред. В. Г. Герасимова. М., 1985.
 Электроника. Энциклопедический словарь (гл. ред. В. Г. Колесников). М., 1991.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава 1. Электрическое поле	8
§ 1.1. Определение и изображение электрического поля ..	8
§ 1.2. Закон Кулона. Напряженность электрического поля ..	10
§ 1.3. Потенциал. Электрическое напряжение ..	13
§ 1.4. Проводники в электрическом поле. Электростатическая индукция ..	16
§ 1.5. Диэлектрики в электрическом поле. Поляризация диэлектрика ..	18
§ 1.6. Электроизоляционные материалы ..	20
§ 1.7. Электрическая емкость. Плоский конденсатор ..	23
§ 1.8. Соединение конденсаторов. Энергия электрического поля ..	25
Глава 2. Электрические цепи постоянного тока	28
§ 2.1. Электрическая цепь ..	28
§ 2.2. Электрический ток ..	29
§ 2.3. ЭДС и напряжение ..	32
§ 2.4. Закон Ома ..	34
§ 2.5. Электрическое сопротивление и проводимость ..	37
§ 2.6. Основные проводниковые материалы и проводниковые изделия ..	39
§ 2.7. Зависимость сопротивления от температуры ..	41
§ 2.8. Способы соединения сопротивлений ..	42
§ 2.9. Электрическая работа и мощность. Преобразование электрической энергии в тепловую ..	50
§ 2.10. Токовая нагрузка проводов и защита их от перегрузок ..	52
§ 2.11. Потери напряжения в проводах ..	55
§ 2.12. Два режима работы источника питания ..	57
§ 2.13. Расчет сложных электрических цепей ..	60
§ 2.14. Нелинейные электрические цепи ..	66
Глава 3. Электромагнетизм	69
§ 3.1. Характеристики магнитного поля ..	69
§ 3.2. Закон полного тока ..	73
§ 3.3. Магнитное поле прямолинейного тока ..	75
§ 3.4. Магнитное поле кольцевой и цилиндрической катушек ..	78
§ 3.5. Намагничивание ферромагнитных материалов ..	81
§ 3.6. Циклическое намагничивание ..	83
§ 3.7. Расчет магнитной цепи ..	86
§ 3.8. Электрон в магнитном поле ..	90
§ 3.9. Проводник с током в магнитном поле. Взаимодействие параллельных проводников с током ..	93
§ 3.10. Закон электромагнитной индукции ..	96
§ 3.11. ЭДС индукции в контуре ..	98
§ 3.12. Принцип Ленца ..	101
§ 3.13. Преобразование механической энергии в электрическую ..	104

§ 3.14. Преобразование электрической энергии в механическую ..	106
§ 3.15. Потокосцепление и индуктивность катушки ..	108
§ 3.16. ЭДС самоиндукции. Энергия магнитного поля ..	111
§ 3.17. ЭДС взаимной индукции. Вихревые токи ..	113
Глава 4. Основные понятия переменного тока	116
§ 4.1. Определение, получение и изображение переменного тока ..	116
§ 4.2. Параметры переменного тока ..	118
§ 4.3. Фаза переменного тока. Сдвиг фаз ..	122
§ 4.4. Изображение синусоидальных величин с помощью векторов ..	124
§ 4.5. Сложение и вычитание синусоидальных величин ..	126
§ 4.6. Поверхностный эффект. Активное сопротивление ..	129
Глава 5. Однофазные электрические цепи	131
§ 5.1. Особенность электрических цепей ..	131
§ 5.2. Цепь с активным сопротивлением ..	132
§ 5.3. Цепь с индуктивностью ..	134
§ 5.4. Цепь с активным сопротивлением и индуктивностью ..	138
§ 5.5. Цепь с емкостью ..	141
§ 5.6. Цепь с активным сопротивлением и емкостью ..	144
§ 5.7. Цепь с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью ..	147
§ 5.8. Резонансный режим работы цепи ..	150
§ 5.9. Резонанс напряжений ..	150
§ 5.10. Разветвленная цепь. Метод проводимостей ..	154
§ 5.11. Резонанс токов ..	158
§ 5.12. Коэффициент мощности ..	162
Глава 6. Трехфазные электрические цепи	164
§ 6.1. Принцип получения трехфазной ЭДС. Основные схемы соединения трехфазных цепей ..	164
§ 6.2. Соединение трехфазной цепи звездой. Четырех- и трехпроводная цепи ..	169
§ 6.3. Соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами при симметричной нагрузке в трехфазной цепи, соединенной звездой ..	171
§ 6.4. Назначение нулевого провода в четырехпроводной цепи ..	174
§ 6.5. Соединение нагрузки треугольником. Векторные диаграммы, соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями ..	176
§ 6.6. Активная, реактивная и полная мощности трехфазной цепи. Коэффициент мощности ..	178
§ 6.7. Выбор схем соединения осветительной и силовой нагрузок при включении их в трехфазную сеть ..	180
Глава 7. Трансформаторы	182
§ 7.1. Назначение трансформаторов и их применение ..	182
§ 7.2. Устройство трансформатора ..	183
§ 7.3. Формула трансформаторной ЭДС ..	187
§ 7.4. Принцип действия однофазного трансформатора. Коэффициент трансформации ..	188
§ 7.5. Трехфазные трансформаторы ..	191

§ 7.6. Автотрансформаторы и измерительные трансформаторы	193
§ 7.7. Сварочные трансформаторы	196
Глава 8. Электрические машины переменного тока	199
§ 8.1. Вращающееся магнитное поле	199
§ 8.2. Устройство асинхронного двигателя	208
§ 8.3. Принцип действия асинхронного двигателя. Физические процессы, происходящие при раскручивании ротора	209
§ 8.4. Скольжение и частота вращения ротора	211
§ 8.5. Влияние скольжения на ЭДС в обмотке ротора	213
§ 8.6. Зависимость значения и фазы тока от скольжения и ЭДС ротора	215
§ 8.7. Вращающий момент асинхронного двигателя	217
§ 8.8. Влияние активного сопротивления обмотки ротора на форму зависимости вращающего момента от скольжения	220
§ 8.9. Пуск асинхронного двигателя	222
§ 8.10. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя	225
§ 8.11. КПД и коэффициент мощности асинхронного двигателя	227
§ 8.12. Однофазный асинхронный двигатель	230
§ 8.13. Синхронный генератор	233
§ 8.14. Синхронный двигатель	236
Глава 9. Электрические машины постоянного тока	239
§ 9.1. Устройство электрических машин постоянного тока. Обратимость машин	239
§ 9.2. Принцип работы машины постоянного тока	243
§ 9.3. Понятие об обмотке якоря. Коллектор и его назначение	248
§ 9.4. ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря	251
§ 9.5. Реакция якоря	253
§ 9.6. Коммутация и способы ее улучшения. Дополнительные полюсы	256
§ 9.7. Генераторы постоянного тока независимого возбуждения	260
§ 9.8. Генераторы с самовозбуждением	264
§ 9.9. Двигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения. Вращающий момент	269
§ 9.10. Механическая и рабочие характеристики двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения	272
§ 9.11. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения	275
§ 9.12. Двигатели постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения	277
Глава 10. Электрические и магнитные элементы автоматики	281
§ 10.1. Автоматы и автоматика	281
§ 10.2. Структура системы автоматического регулирования	283
§ 10.3. Устройства для измерения сигналов в автоматических системах	287
§ 10.4. Реле	292

§ 10.5. Магнитные усилители, их назначение и классификация	295
§ 10.6. Принцип действия дроссельного магнитного усилителя	297
§ 10.7. Принцип действия трансформаторного магнитного усилителя	301
§ 10.8. Влияние обратной связи на коэффициент усиления магнитного усилителя	303
§ 10.9. Дифференциальный магнитный усилитель с обмотками смещения	307
§ 10.10. Дифференциальный магнитный усилитель с обратной связью	310
§ 10.11. Магнитный усилитель, собранный по мостовой схеме	312
§ 10.12. Ферромагнитные стабилизаторы напряжения	315
Глава 11. Электрические измерения и приборы	318
§ 11.1. Сущность и значение электрических измерений	318
§ 11.2. Основные единицы электрических и магнитных величин в Международной системе единиц	320
§ 11.3. Производные и кратные единицы	323
§ 11.4. Основные методы электрических измерений. Погрешности измерительных приборов	324
§ 11.5. Классификация электроизмерительных приборов. Условные обозначения на шкале	327
§ 11.6. Электроизмерительные приборы непосредственной оценки	330
§ 11.7. Приборы магнитоэлектрической системы	333
§ 11.8. Приборы электромагнитной системы	336
§ 11.9. Приборы электродинамической системы	338
§ 11.10. Цифровые приборы	340
§ 11.11. Измерение напряжений, токов и мощности	342
§ 11.12. Расширение пределов измерения приборов непосредственной оценки	345
§ 11.13. Измерение мощности в трехфазных цепях	348
§ 11.14. Индукционный счетчик электрической энергии. Учет энергии в однофазных и трехфазных цепях	350
§ 11.15. Измерение сопротивлений	354
§ 11.16. Измерение сопротивлений с помощью моста постоянного тока	357
§ 11.17. Магнитоэлектрический осциллограф	359
Глава 12. Передача и распределение электрической энергии	362
§ 12.1. Назначение и классификация электрических сетей, их устройство и графическое изображение	362
§ 12.2. Провода, кабели, электроизоляционные материалы в сетях напряжением до 1000 В	365
§ 12.3. Электроснабжение промышленных предприятий	368
§ 12.4. Падение и потеря напряжения в линиях электроснабжения	371
§ 12.5. Расчет проводов по допустимой потере напряжения в линиях постоянного, однофазного и трехфазного тока	373
§ 12.6. Сопоставление двухпроводной однофазной системы передачи энергии с трехфазными системами по расходу цветного металла	376
§ 12.7. Расчет проводов по допустимому нагреву	379

§ 12.8. Плавкие предохранители	381
§ 12.9. Выбор плавких вставок	384
§ 12.10. Выбор площади сечения проводов в зависимости от установленных предохранителей	386
§ 12.11. Действие электрического тока на организм человека. Понятие о напряжении прикосновения. Допустимые значения напряжения прикосновения	387
§ 12.12. Защитное заземление трехпроводных цепей трехфазного тока	390
§ 12.13. Защитное заземление четырехпроводных цепей трехфазного тока	392
§ 12.14. Устройство и простейший расчет заземлителей	396
Глава 13. Основы электропривода	398
§ 13.1. Понятие об электроприводе	398
§ 13.2. Нагревание и охлаждение электродвигателей	400
§ 13.3. Режимы работы электродвигателей. Выбор мощности	402
§ 13.4. Релейно-контакторное управление электродвигателями	407
Глава 14. Электронные лампы	414
§ 14.1. Общие сведения	414
§ 14.2. Электронная эмиссия	414
§ 14.3. Катоды электронных ламп	417
§ 14.4. Движение электронов в электрическом и магнитном полях	419
§ 14.5. Дюды	422
§ 14.6. Триоды	427
§ 14.7. Тетроды	436
§ 14.8. Пентоды. Лучевые тетроды	439
§ 14.9. Многоэлектродные и комбинированные лампы	441
Глава 15. Газоразрядные приборы	442
§ 15.1. Основные разновидности электрических разрядов в газе	442
§ 15.2. Газотрон	446
§ 15.3. Тиратрон	448
§ 15.4. Стабилитрон	451
§ 15.5. Газосветные сигнальные лампы и индикаторы	453
§ 15.6. Условные обозначения и маркировка газоразрядных приборов	455
Глава 16. Полупроводниковые приборы	457
§ 16.1. Атомы	457
§ 16.2. Энергетические уровни и зоны	463
§ 16.3. Проводники, изоляторы и полупроводники	465
§ 16.4. Электропроводность полупроводников	469
§ 16.5. Электронно-дырочный переход	477
§ 16.6. Полупроводниковые дюды	482
§ 16.7. Биполярный транзистор	489
§ 16.8. Полевые транзисторы	499
§ 16.9. Тиристоры	503
§ 16.10. Области применения транзисторов и тиристоров	508

Глава 17. Фотоэлектрические приборы	510
§ 17.1. Основные понятия и определения	510
§ 17.2. Электронные фотоэлементы с внешним фотоэффектом	512
§ 17.3. Фотоэлектронные умножители	514
§ 17.4. Фоторезисторы	517
§ 17.5. Фотодиоды	520
§ 17.6. Фототранзисторы	523
Глава 18. Электронные выпрямители	525
§ 18.1. Основные сведения о выпрямителях	525
§ 18.2. Однополупериодный выпрямитель	526
§ 18.3. Двухполупериодный выпрямитель	529
§ 18.4. Трехфазный выпрямитель	531
§ 18.5. Выпрямитель на тиристоре. Стабилизатор напряжения	534
§ 18.6. Сглаживающие фильтры. Выпрямление с умножением напряжения	537
Глава 19. Электронные усилители	541
§ 19.1. Общие сведения	541
§ 19.2. Предварительный каскад УНЧ	545
§ 19.3. Выходной каскад УНЧ	548
§ 19.4. Обратная связь в усилителях	551
§ 19.5. Межкаскадные связи. Усилители постоянного тока	554
§ 19.6. Импульсные и избирательные усилители	558
Глава 20. Электронные генераторы и измерительные приборы	560
§ 20.1. Общие сведения	560
§ 20.2. Транзисторный автогенератор типа LC	561
§ 20.3. Транзисторный автогенератор типа RC	563
§ 20.4. Генераторный линейно изменяющегося напряжения	565
§ 20.5. Мультивибратор	569
§ 20.6. Электронно-лучевые трубки	571
§ 20.7. Электронный осциллограф	575
§ 20.8. Аналоговый электронный вольтметр	578
§ 20.9. Цифровой электронный вольтметр	581
Глава 21. Интегральные схемы микроэлектроники	584
§ 21.1. Общие сведения	584
§ 21.2. Гибридные интегральные микросхемы	586
§ 21.3. Толсто пленочные микросхемы	589
§ 21.4. Тонкопленочные микросхемы	591
§ 21.5. Фотолитография	595
§ 21.6. Полупроводниковые интегральные микросхемы	597
§ 21.7. Планарно-эпитаксиальная технология изготовления ИМС	599
§ 21.8. Элементы полупроводниковых микросхем и их соединение	604
§ 21.9. Применение интегральных микросхем	607
Глава 22. Цифровые электронные вычислительные машины. Микропроцессоры и микроЭВМ	610
§ 22.1. Системы счисления	610
§ 22.2. Перевод чисел из одной системы в другую	612
§ 22.3. Арифметические операции с двоичными числами	614

§ 22.4. Структурная схема цифровой электронной вычислительной машины	616
§ 22.5. Принцип действия ЦЭВМ	619
§ 22.6. Триггеры	621
§ 22.7. Логические элементы	625
§ 22.8. Счетчики импульсов	628
§ 22.9. Регистры	631
§ 22.10. Сумматор	633
§ 22.11. Арифметическое устройство	636
§ 22.12. Оперативное запоминающее устройство	641
§ 22.13. Внешние запоминающие устройства	644
§ 22.14. Устройство управления	647
§ 22.15. Устройства ввода информации	651
§ 22.16. Устройства вывода и отображения информации	654
§ 22.17. Понятие о программировании	657
§ 22.18. Технические характеристики и применение ЦЭВМ	660
§ 22.19. Микропроцессоры	662
§ 22.20. Микрокалькуляторы	666
§ 22.21. МикроЭВМ	669
§ 22.22. Робототехника	671
Консультации	674
Литература	745

Учебное издание

Данилов Илья Александрович

Иванов Петр Михайлович

**ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
С ОСНОВАМИ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Редактор *Т. Ф. Мельникова*

Художественный редактор *Ю. Э. Иванова*

Технический редактор *Л. А. Маркова*

Лицензия ИД № 06236 от 09.11.01.

Изд. № РЕНТ-148. Подп. в печать 29.09.04. Формат 60×88¹/₈.

Бум. газетная. Гарнитура литературная. Печать офсетная.

Объем 46,06 усл. печ. л. 46,06 усл. кр.-отг.

Тираж 3000 экз. Заказ Я-806.

ФГУП «Издательство «Высшая школа»,
127994, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., 29/14.

Тел.: (095) 200-04-56.

<http://www.v-shkola.ru> E-mail: info@v-shkola.ru

Отдел реализации: (095) 200-07-69, 200-59-39; факс: (095) 200-03-01.

E-mail: sales@v-shkola.ru

Отпечатано в типографии ГУП ПИК «Идел-Пресс»,
420066, г. Казань, ул. Декабристов, 2.