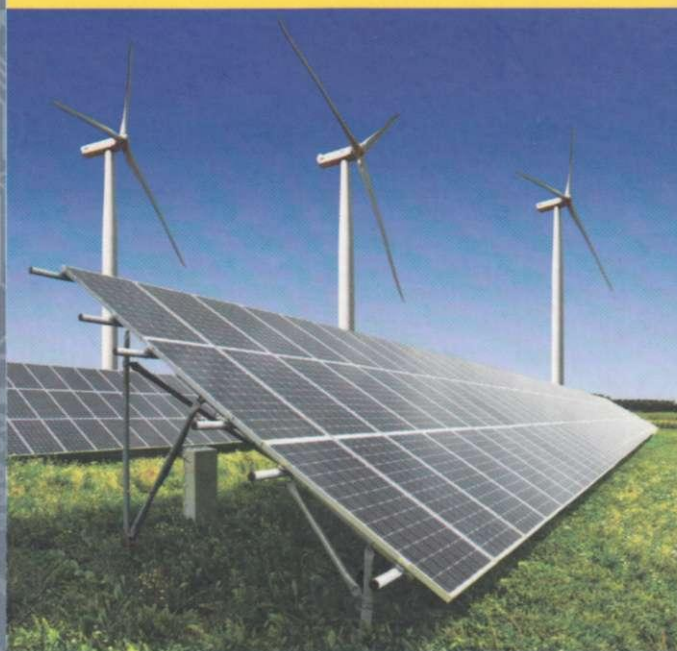


621.3  
П84  
50

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ  
ОБРАЗОВАНИЕ

Учебник



В. М. Прошин



**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
ДЛЯ НЕЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ  
ПРОФЕССИЙ**

## ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

**В. М. ПРОШИН**

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА ДЛЯ НЕЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ПРОФЕССИЙ**

**УЧЕБНИК**

*Рекомендовано*

*Федеральным государственным автономным учреждением «Федеральный институт развития образования» в качестве учебника для использования в образовательном процессе образовательных организаций, реализующих программы среднего профессионального образования по профессиям «Мастер отделочных строительных и декоративных работ», «Мастер по ремонту и обслуживанию инженерных систем жилищно-коммунального хозяйства», «Сварщик (ручной и частично механизированной сварки (наплавки))», «Лаборант по контролю качества сырья, реактивов, промежуточных продуктов, готовой продукции, отходов производства (по отраслям)»*

*Регистрационный номер рецензии 257  
от 17 июля 2017 г. ФГАУ «ФИРО»*

2-е издание, стереотипное



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2018

УДК 621.3(075.32)  
ББК 31.2я722  
П847

Рецензент —  
преподаватель ГБОУ СПО «Строительный техникум № 12» А. М. Пожилыков

**Прошин В. М.**  
П847      Электротехника для неэлектротехнических профессий :  
учебник для студ. учреждений сред. проф. образования /  
В. М. Прошин. — 2-е изд., стер. — М. : Издательский центр  
«Академия», 2018. — 464 с.  
ISBN 978-5-4468-6158-3

Учебник создан в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования по профессиям из списка ТОП-50: «Мастер по ремонту и обслуживанию инженерных систем жилищно-коммунального хозяйства», «Мастер отделочных строительных и декоративных работ», «Сварщик (ручной и частично механизированной сварки (наплавки))», «Лаборант по контролю качества сырья, реактивов, промежуточных продуктов, готовой продукции, отходов производства (по отраслям)» и профессии «Мастер отделочных строительных работ». Учебное издание предназначено для изучения общепрофессиональной дисциплины «Электротехника».

Освещены все основные разделы электротехники: электрические и магнитные цепи, электрические измерения, основы промышленной электроники, электрические машины, производство и распределение электрической энергии. Базовый теоретический материал по каждой из тем дополняют практические задания, контрольные тесты и лабораторные работы.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 621.3(075.32)  
ББК 31.2я722

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

© Прошин В. М., 2018  
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2018  
ISBN 978-5-4468-6158-3      © Оформление. Издательский центр «Академия», 2018

## УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Вы держите в руках учебник, который был подготовлен Издательским центром «Академия» в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом (ФГОС) в рамках реализации комплексного проекта подготовки кадров по 50 наиболее востребованным на рынке труда, новым и перспективным профессиям и специальностям среднего профессионального образования.

Одной из задач проекта является обновление содержания профессионального образования с учетом профессиональных стандартов, современных методик и технологий. При разработке ФГОС также учитывались требования международных конкурсов профессионального мастерства, включая чемпионаты «Молодые профессионалы» (WorldSkills и WorldSkills Russia).

Издательский центр «Академия» является лидером по выпуску учебных материалов для СПО в Российской Федерации. Более двадцати лет наши издания помогают студентам овладевать знаниями, умениями и навыками по рабочим профессиям и специальностям. Стремясь идти в ногу со временем, издательство предлагает не только печатные издания, но и электронные учебники, электронные учебно-методические комплексы и виртуальные практикумы.

Интерактивная форма подачи информации с учетом последних методик и тенденций в преподавании — отличительная особенность и визитная карточка Издательского центра «Академия» на российском рынке.

Мы надеемся, что данный учебник будет полезен студентам, облегчит задачу преподавателей, а также поможет специалистам, которые стремятся расти и развиваться в выбранной ими области, достичь новых профессиональных вершин.

### КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Как-то профессора Сергея Петровича Капицу, долгое время являвшегося ведущим телевизионной передачи «Очевидное — невероятное», спросили о том, какое из открытий человечества по его мнению является величайшим в мире. «Электричество», — не задумываясь, ответил он.

Станки, роботы, информационные системы, автоматические линии и гибкие автоматизированные производства, системы освещения и бытовая техника — все это и многое другое стало возможным благодаря электричеству.

☛ *Электротехника* — это наука об основных законах физики в области электричества и его применении в промышленности и быту.

Она сравнительно молода, годом ее основания принято считать 1802 г., когда академик В. В. Петров открыл и исследовал явление электрической дуги, а также возможности его применения для освещения, сварки и плавения. Далее развитие шло семимильными шагами:

1820 г. — А. М. Ампер измерил силу взаимодействия между двумя параллельными проводниками с током (закон Ампера), создав основу построения *электрических двигателей*;

1826 г. — Г. Ом экспериментально подтвердил закон, названный его именем, положив начало *расчету электрических цепей*;

1831 г. — М. Фарадей открыл явление электромагнитной индукции, создав основу построения *электрических генераторов*;

1834 г. — Б. С. Якоби построил электрический двигатель постоянного тока, ставший *основным приводным двигателем транспортных средств*;

1847 г. — Г. Р. Кирхгоф сформулировал названные его именем законы, позволяющие *расчитывать сложные электрические цепи*;

1872 г. — А. Г. Столетов снял кривую намагничивания железа  $B(H)$ , заложив основу *расчета магнитных цепей*;

1875 г. — П. Н. Яблочков создал трансформатор, обеспечив передачу электрической энергии на значительные расстояния;

1888 г. — М. О. Доливо-Добровольский создал трехфазный асинхронный двигатель переменного тока с короткозамкнутым ротором — основной приводной двигатель любого металлорежущего станка;

1895 г. — А. С. Попов продемонстрировал возможности радиосвязи, заложив основы радио- и телевидения.

Все последующие открытия и изобретения были направлены на создание практически действующих источников и приемников электрической энергии, являющихся основными элементами электротехнических установок.

Преимущества электрической энергии по сравнению с другими видами энергии очевидны:

- способность легко и быстро передаваться на любые расстояния;
- возможность деления на любые части;
- простота преобразования в другие виды энергии (световую, тепловую, механическую и др.).

## **РАБОТА С ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАМИ**

---

У электрической энергии есть лишь один недостаток — ее опасность для жизни человека. Электрический ток по воздействию на человека можно условно подразделить на три вида:

- осязаемый: более 0,6 мА — вызывает слабый зуд, более 3 мА — раздражение, более 8 мА — непроизвольное сокращение мышц руки;
- неотпускающий: более 10 мА — вызывает судороги мышц рук, пострадавший не может разжать руки, более 25 мА — судороги не только мышц рук, но и тела, более 50 мА — потерю сознания, прекращение дыхания и даже смерть;
- фибрилляционный — более 100 мА — раздражает мышцы сердца, сужает сосуды, прекращает движение крови, вызывает смерть.

Принято считать, что опасным для жизни человека является ток более 50 мА.

Можно ли снизить опасность поражения электрическим током? Можно, если принять меры к увеличению сопротивления ветви, по которой течет ток. Так, если прикоснувшийся к токоведущим частям человек стоит на резиновом коврике, который лежит на дере-

вянном сухом полу, то даже при напряжении 380 В ток не превысит 5 мА, т. е. вызовет лишь раздражение. Поэтому одним из путей повышения электробезопасности при работе с электроустановками является применение диэлектрических ковриков, изолирующих подставок, диэлектрических перчаток и бот, изолирующих штанг, инструмента с изолированными ручками и т. д.

Другой путь — это заземление элементов оборудования, к которым может прикоснуться человек, и которые в нормальном состоянии не находятся под напряжением. При наличии заземления тело человека оказывается включенным параллельно заземлителю, сопротивление которого во много раз меньше сопротивления тела человека. Поэтому при нарушении изоляции и попадании напряжения на корпус оборудования через тело человека в случае его прикосновения к корпусу будет проходить небольшой ток, безопасный для его здоровья.

Все токоведущие части машин и механизмов должны быть защищены соответствующими кожухами и ограждениями.

Наиболее действенным способом защиты человека от поражения электрическим током является максимально быстрое отключение тока при любой нештатной ситуации. Время отключения определяет и значение безопасного тока. Если при времени отключения 1 с безопасным считается ток менее 50 мА, то при времени отключения менее 0,1 с он возрастает до 400 мА. Именно такое время отключения имеет устройство защитного отключения (УЗО), представляющее собой быстродействующий автоматический выключатель. Оно предназначено для защиты людей от поражения электрическим током и предотвращения последствий, вызванных коротким замыканием в электропроводке, при неисправном электрооборудовании или случайном контакте человека с открытыми проводящими частями электрооборудования.

## **РОЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ В РАЗВИТИИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА**

---

Без электричества невозможен научно-технический прогресс. Вспомним план ГОЭЛРО, превративший отсталую Россию за короткое время в мощную экономически развитую державу. В настоящее время Россия производит в год около 900 млрд кВт·ч электроэнергии, находясь по этому показателю на четвертом месте в мире. Соединенные Штаты Америки производят электроэнергии в три с лишним раза больше, чем Россия, и являются наиболее тех-

нически развитой страной в мире. Китай за последние 10 лет практически утроил производство электроэнергии и в 2011 г. обогнал по этому показателю США, выйдя на первое место в мире. Как результат — быстрый рост экономики Китая, резкое повышение производительности труда и снижение себестоимости продукции.

Сегодня наша страна 67 % электроэнергии производит на тепловых электростанциях (ТЭС), но из них лишь 16 % (в 2 раза меньше, чем в среднем в мире) — за счет сжигания угля. Основными видами топлива для ТЭС являются нефть и газ. Россия эксплуатирует разведанные запасы нефти и газа, которых, по прогнозу, хватит лишь на 70 лет, в то время как запасов угля хватит на сотни лет. Значит, одна из перспектив развития производства электроэнергии в нашей стране заключается в переводе существующих тепловых электростанций на твердое топливо — уголь.

Другая — это увеличение доли электроэнергии, производимой на атомных электростанциях (АЭС), с 13 до 25 % к 2020 г.

По величине речного стока Россия занимает одно из первых мест в мире, в то же время лишь 20 % этой возобновляемой энергии используется для производства электроэнергии на гидравлических электростанциях.

Прогресс в области потребления электроэнергии сегодня и завтра — это в первую очередь повышение коэффициента полезного действия электроустановок, сокращение потерь при производстве и передаче электроэнергии. Сегодня, покупая холодильник, телевизор, пылесос, стиральную машину, мы интересуемся потребляемой этими приборами мощностью. Все чаще покупаем, хотя и дорогие, но энергосберегающие электролампы — окупятся. Аналогично и в производстве: замена старого оборудования и технологий на современное энергосберегающее требует затрат, но ведь тоже окупится.

Одно из направлений развития электротехники — это снижение влияния энергетических установок на экологическую обстановку. Недопустимо загрязнять атмосферу отходами при сжигании угля, нефти и газа, затоплять тысячи гектар плодородных земель, лесов и целые деревни при строительстве гидроэлектростанций. На улучшение экологической ситуации сегодня направлены усилия ученых, инженеров, технологов и строителей.

Принятый план электрификации России вплоть до 2020 г. — это по существу новый план ГОЭЛРО. Он предусматривает увеличение производства электроэнергии почти на 70 %, что позволит получать до 1 500 млрд кВт·ч в год. Намечается ввести в строй 26 новых блоков АЭС, перевести как можно больше ТЭС на угольное топливо



при строжайшем контроле за качеством отходов, выбрасываемых в атмосферу, наконец, восстановить и построить новые микрогидроэлектростанции на малых реках.

В перспективе для производства электроэнергии все шире будут использоваться такие виды возобновляемой энергии, как солнечная, геотермальная, энергия ветра, морских приливов и др. Над этим сегодня активно работают во всем мире.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 1.1. ФИЗИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ИХ ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

#### ТЕОРИЯ

Что такое электрический ток? Как известно, все тела состоят из атомов. Атом состоит из ядра и вращающихся на различных орбитах электронов (рис. 1.1). Электротехнику прежде всего интересуют электроны, вращающиеся на дальних (внешних) орбитах. Такие электроны имеют наименьшую связь с ядром, поэтому способны покидать атом и становиться свободными. При отсутствии внешнего воздействия свободные электроны движутся хаотично. Под действием внешней энергии можно заставить их двигаться организованно, в определенном направлении, т. е. получить электрический ток.

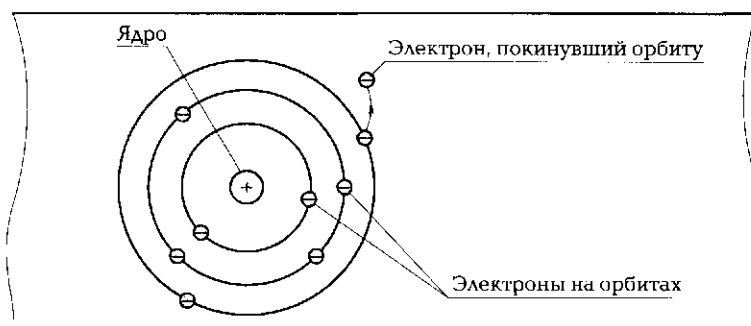


Рис. 1.1. Схема атома

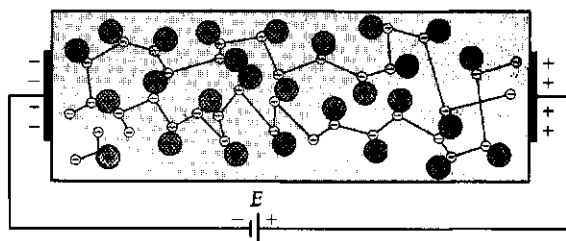


Рис. 1.2. Дрейф электронов

☛ **Электрический ток** — это направленное движение электронов.

Например, если к проводнику подключить источник питания  $E$  (рис. 1.2), то под действием внешнего электрического поля электроны начнут двигаться от одного конца проводника к другому — дрейфовать. По проводнику потечет электрический ток.

Скорость дрейфа электронов невелика (около 1 мм/с). Однако распространение электрического взаимодействия осуществляется со скоростью, близкой к скорости света — 300 м/с.

☛ Под **силой электрического тока**  $I$  понимают число электронов, прошедших через поперечное сечение проводника в единицу времени.

Если за одну секунду через поперечное сечение проходят  $6,24 \cdot 10^{18}$  электронов, что соответствует заряду электричества  $q$ , равному одному кулону ( $q = 1 \text{ Кл} = 6,24 \cdot 10^{18}$  электронов), то сила тока равна одному амперу ( $I = 1 \text{ А}$ ). На рис. 1.3 через поперечное сечение проводника проходит (будем считать, что за 1 с) 20 электронов, следовательно, сила тока при этом всего лишь около  $3 \cdot 10^{-18}$  А. Если принять, что ток равномерно распределяется по поперечному сечению

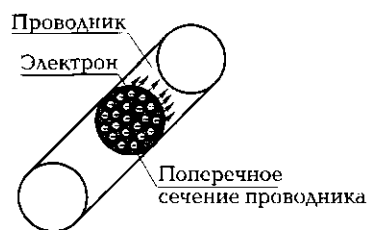


Рис. 1.3. Электроны, проходящие через поперечное сечение проводника

проводника, имеющему площадь  $S$ , то большей силе тока будет соответствовать большая **плотность тока**

$$j = \frac{I}{S} \text{ [А/мм}^2\text{]}.$$

Электрон — отрицательно заряженная частица. Поскольку атом имеет нейтральный заряд, то ядро содержит положительно заряженные частицы — протоны. Заряд протона

равен заряду электрона ( $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл), в то же время масса электрона почти в 2000 раз меньше массы протона. Чем легче частица, тем меньшую энергию надо затратить на приведение ее в движение.

Как уже говорилось, чтобы заставить электроны двигаться направленно, необходимо приложить энергию извне, например создать электрическое поле. Каждая точка поля характеризуется *потенциалом*.

⚡ **Напряжение  $U$**  — это разность потенциалов между двумя точками электрического поля. Она численно равна работе, которую выполняет поле при перемещении заряда из одной точки в другую.

Напряжение на концах проводника создается *электродвижущей силой* (ЭДС)  $E$ , характеризующей работу по перемещению электрических зарядов от одного конца проводника к другому под действием сторонних сил.

Если цепь разомкнута, т. е. источник не подключен к нагрузке, напряжение на его полюсах (зажимах) равно ЭДС. Если к этим полюсам подсоединить нагрузку (например, лампу), т. е. замкнуть цепь, то во внешней цепи появится ток  $I$ , а на нагрузке — напряжение  $U$ . Это напряжение будет меньше ЭДС на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника  $r_0$ :  $U = E - Ir_0$ .

⚡ **ЭДС  $E$**  — это потенциальные возможности источника, напряжение на зажимах источника на холостом ходу ( $I = 0$ ).

Двигаясь по проводнику, электроны встречают на своем пути атомы, колеблющиеся вокруг нейтрального положения. Соударяясь с атомами (рис. 1.4), электроны отдают им часть полученной от источника энергии. Другими словами, электроны встречают сопротивление своему движению со стороны атомов.

⚡ **Сопротивление  $R$**  проводника характеризует его способность препятствовать движению электронов, т. е. прохождению тока.

Оно определяется материалом проводника, а именно, его *удельным электрическим сопротивлением*  $\rho$  или *удельной электрической проводимостью*  $\gamma = 1/\rho$ , а также длиной проводника  $l$  и площадью его поперечного сечения  $S$ :

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\gamma S}.$$

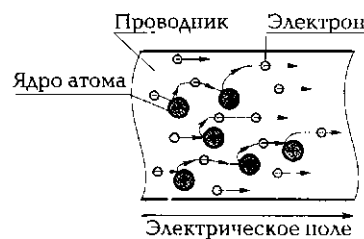


Рис. 1.4. Схема, поясняющая понятие сопротивления

Сопротивление проводника зависит от его температуры:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - T_1)],$$

где  $R_1$ ,  $R_2$  — сопротивления проводника при температуре соответственно  $T_1$  и  $T_2$ ;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления.

Значения  $\rho$  и  $\alpha$  для различных материалов приводятся в справочной литературе.

➤ Проводимостью  $G$  называется величина, обратная сопротивлению  $R$ :

$$G = \frac{1}{R}.$$

➤ Мощность электрической установки  $P$  — это скорость, с которой совершается работа установки, т. е. происходит преобразование электрической энергии  $A$  в другие виды энергии.

Работа, производимая электрическим током силой  $I$  при напряжении  $U$  за время  $t$ , равна  $A = UIt$ . Отсюда

$$P = \frac{A}{t} = \frac{UIt}{t} = UI = \frac{U^2}{R} = I^2R.$$

В металлах (медь, алюминий, серебро, сталь и др.), угле и графите электрический ток создается движущимися электронами (рис. 1.5, а). Такие проводники называют проводниками первого рода. В жидких проводниках и газах (проводниках второго рода) электрический ток создается за счет движения положительно и от-

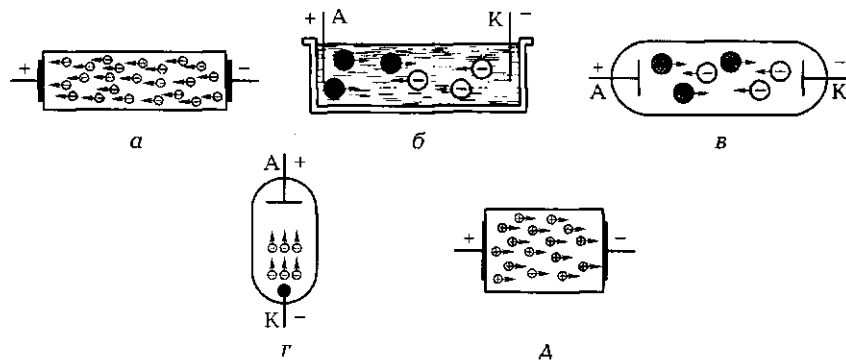


Рис. 1.5. Движение заряженных частиц:  
а — электронов в металле; б — ионов в жидкости; в — ионов в газе; г — электронов в вакууме; д — дырок в полупроводнике типа  $p$

**Таблица 1.1**

Параметр	Обозначение параметра	Единица измерения (ее обозначение)	Дольные единицы измерения	Кратные единицы измерения
Напряжение	$U$	вольт (В)	мкВ, мВ	кВ, МВ
Сила тока	$I$	ампер (А)	мкА, мА	кА, МА
Сопротивление	$R$	ом (Ом)	мкОм, мОм	кОм, МОм
ЭДС	$E$	вольт (В)	мкВ, мВ	кВ, МВ
Проводимость	$G$	сименс (См)	мкСм, мСм	кСм, МСм
Мощность	$P$	ватт (Вт)	мкВт, мВт	кВт, МВт

Примечание. В табл. 1.1 даны следующие обозначения: мк (микро) —  $10^{-6}$ ; м (милли) —  $10^{-3}$ ; к (кило) —  $10^3$ ; М (мега) —  $10^6$ .

рицательно заряженных ионов (рис. 1.5, б и в); в вакууме, например внутри баллона электронной лампы, — за счет движения электронов от катода К к аноду А (рис. 1.5, г); в полупроводниках (германий, кремний и др.) — за счет движения электронов или дырок в зависимости от типа полупроводника (рис. 1.5, д). В диэлектриках (резина, фарфор, слюда и др.) нет свободных электронов и других свободных частиц, поэтому электрический ток течь не может (до определенного предела — пробоя диэлектрика).

Итак, в проводниках первого рода:

- ток — это направленное движение электронов;
- электроны переносят энергию от источника к потребителю;
- чем выше энергия, полученная от источника (т. е. чем выше напряжение), тем больше сила электрического тока;
- чем выше сопротивление проводника, тем меньше сила электрического тока, поступающего к потребителю.

Последнее утверждение является одной из формулировок закона Ома для проводника:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Основные параметры электрической цепи постоянного тока, их обозначения и единицы измерения, а также дольные и кратные величины показаны в табл. 1.1.

Теперь, используя полученные знания, постараемся выполнить простейшие электротехнические расчеты.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. Вычислите плотность тока в медном проводнике диаметром  $d = 1$  мм, если сила тока  $I$  равна 10 А. Как изменится плотность тока, если медный проводник заменить алюминиевым?

*Решение.* Определяем площадь сечения проводника:  $S = \pi d^2/4 = 3,14 \cdot 1^2/4 = 0,785$  мм<sup>2</sup>.

Вычисляем плотность тока:  $j = I/S = 10/0,785 = 12,7$  А/мм<sup>2</sup>.

Как видим из последней формулы, плотность тока не зависит от материала проводника, поэтому для алюминиевого проводника она будет такой же, как и для медного.

*Ответ.* Плотность тока в проводнике 12,7 А/мм<sup>2</sup>.

2. Вычислите ток, протекающий через электрическую лампу, и сопротивление лампы в рабочем состоянии, если ее мощность  $P = 75$  Вт, а напряжение  $U = 220$  В.

*Решение.* Мощность лампы  $P = UI$ , откуда  $I = P/U = 75/220 = 0,341$  А. Сопротивление лампы находим по закону Ома:  $R_\lambda = U/I = 220/0,341 = 645$  Ом. Можно также воспользоваться выражением  $P = U^2/R_\lambda$ . Откуда  $R_\lambda = U^2/P = 220^2/75 = 645$  Ом.

*Ответ.* Сопротивление лампы в рабочем состоянии 645 Ом, ток через нее 0,341 А.

3. Насколько различаются сопротивления лампы накаливания в рабочем состоянии и в выключенном? Исходные данные: мощность электрической лампы 60 Вт, напряжение 220 В, материал нити накаливания вольфрам, температура нити в рабочем состоянии  $T_2 = 3000$  °С, в выключенном состоянии —  $T_1 = 20$  °С.

*Решение.* По справочнику находим, что удельное электрическое сопротивление вольфрама  $\rho = 0,055$  Ом·мм<sup>2</sup>/м, а его температурный коэффициент сопротивления  $\alpha = 0,0045$  1/К.

Определяем сопротивление лампы в рабочем состоянии:  $R_2 = U^2/P = 806,7$  Ом.

В выключенном состоянии сопротивление лампы  $R_1$  (при  $T_1 = 20$  °С) можно найти из выражения  $R_2 = R_1(1 + \alpha(T_2 - T_1))$ . Подставив в него все известные значения, получим  $R_1 = 56$  Ом.

Таким образом, сопротивление лампы накаливания в рабочем состоянии более чем на порядок выше сопротивления в холодном состоянии.

Вычислим, чему равны токи в рабочем и холодном состоянии.

В рабочем состоянии  $I = 220/806,7 = 0,27$  А, в холодном состоянии  $I = 220/56 = 3,9$  А.

Как видим, сила тока при холодном состоянии лампы, хоть и короткое время, велика, что и является причиной выхода ламп из строя именно при их включении.

*Ответ.* Сопротивление лампы накаливания в рабочем состоянии более чем на порядок выше, чем в холодном (выключенном) состоянии.

**4.** При протекании одного и того же тока по проводникам с одинаковой площадью поперечного сечения температура нагрева проводника круглого сечения выше, чем квадратного. Почему?

*Решение.* Проводник нагревается до тех пор, пока не наступит равновесие между количеством теплоты, подводимой к проводнику, и количеством теплоты, отводимой через его внешнюю поверхность. Количество подводимой теплоты определяется площадью поперечного сечения проводника, по которому течет ток. Для круглого сечения  $S_{кр} = \pi d^2/4$ , где  $d$  — диаметр круга, для квадратного —  $S_{кв} = X^2$ , где  $X$  — длина стороны квадрата. Поскольку  $S_{кр} = S_{кв}$ , то  $X = 0,886d$ .

Отводимая теплота определяется площадью внешней поверхности проводника. При одной и той же длине проводников  $l$  площадь внешней поверхности круглого проводника равна  $S^{кр} = \pi dl$ , а квадратного —  $S^{кв} = 4Xl = 4 \cdot 0,886dl = 3,54dl$ . Отношение  $S^{кв}/S^{кр} = 3,54dl/(\pi dl) = 1,13$ .

Таким образом, поверхность охлаждения проводника с квадратным сечением на 13% больше, чем с круглым. А это значит, что проводник с квадратным сечением будет нагреваться меньше, чем с круглым.

*Ответ.* Проводник с квадратным сечением нагревается меньше, так как площадь его охлаждения выше, чем у проводника с круглым сечением.

**5.** Что мешает электронам двигаться по проводнику и почему при увеличении температуры сопротивление проводника растет?

*Ответ.* Электронам мешают двигаться по проводнику колеблющиеся вокруг нейтрального положения атомы. С увеличением температуры проводника частота и амплитуда колебаний атомов растет, поэтому электронам сложнее двигаться направленно.

**6.** Какой из проводников, медный или алюминиевый, при одинаковых длине и площади поперечного сечения нагреется сильнее:

- а) при одном и том же токе;
- б) при одном и том же напряжении?

*Ответ.* Нагрев проводника обусловлен работой электрического тока, которая определяется силой тока и сопротивлением проводника. Сопротивление алюминиевого проводника выше, чем медного,



поскольку выше его удельное сопротивление. Следовательно, при одном и том же токе его работа  $A = I^2 R t$  при протекании по алюминиевому проводнику будет больше, а значит, и нагрев алюминиевого проводника будет выше, чем медного. А вот при одном и том же напряжении сильнее нагреется медный проводник, поскольку  $A = (U^2/R)t$ .

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

7. Чему равна площадь поперечного сечения проводника, если по нему течет ток силой 150 А, а плотность тока составляет 5 А/мм<sup>2</sup>?

8. Электропаяльник, включенный в сеть напряжением 220 В, потребляет ток 0,3 А. Определите сопротивление и мощность электропаяльника.

9. При температуре 20 °С сопротивление катушки, намотанной медным проводом, равно 1,2 Ом. Определите ее сопротивление при температуре 80 °С.

10. Для ремонта паяльника мощностью 40 Вт при напряжении 36 В используется нихромовый провод площадью поперечного сечения 0,02 мм<sup>2</sup>. Вычислите необходимую длину провода.

11. В качестве датчика температуры часто используется медная проволока — термометр сопротивления медный (ТСМ). Определите сопротивление датчика при температуре 270 °С, если при температуре 20 °С оно равнялось 200 Ом.

12. Датчик в виде термометра сопротивления платинового (ТСП) используется для измерения низкой температуры — минус 180 °С. При этом его сопротивление равно 6 Ом. Вычислите сопротивление датчика при нормальной температуре 20 °С.

13. Как показано линиями на рис. 1.6, напряжение обозначается латинской буквой  $U$ , измеряется в вольтах, обозначение единицы из-

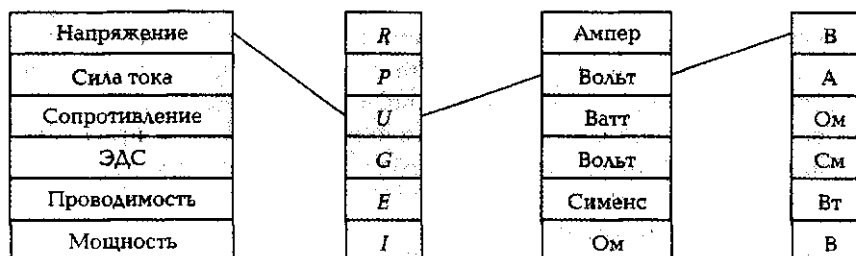


Рис. 1.6. Соответствие между наименованием, обозначением и единицей измерения физических величин [к задаче 13 подразд. 1.1]

мерения — В. Аналогичным образом покажите соответствующие связи для силы тока, сопротивления, ЭДС, проводимости и мощности.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Что такое электрический ток:
  - а) хаотичное движение электронов;
  - б) направленное движение электронов;
  - в) движение протонов;
  - г) упорядоченное движение атомов?
2. Как заряжены электроны:
  - а) отрицательно;
  - б) положительно;
  - в) нейтрально;
  - г) знак заряда электрона может меняться?
3. Какие токи и напряжения считаются безопасными для человека:
  - а) меньше 0,1 А и больше 24 В;
  - б) больше 5 мА и 12 В;
  - в) меньше 50 мА и 36 В;
  - г) меньше 100 мА и 100 В?
4. Почему именно электроны участвуют в создании электрического тока в проводниках:
  - а) их больше, чем протонов;
  - б) они имеют отрицательный заряд;
  - в) они легче протонов;
  - г) они могут покидать свои орбиты и становиться свободными?
5. Что мешает электронам двигаться в проводнике:
  - а) молекулы;
  - б) атомы;
  - в) нейтроны;
  - г) протоны?
6. Чем определяется сопротивление проводника:
  - а) материалом;
  - б) длиной;
  - в) площадью поперечного сечения;
  - г) всеми перечисленными показателями?
7. Что такое напряжение:
  - а) отношение потенциалов двух точек;
  - б) сумма потенциалов двух точек;
  - в) разность потенциалов между двумя точками;
  - г) ни один ответ не верен?

8. Как изменится сила тока, если напряжение увеличить вдвое:
- а) уменьшится вдвое;
  - б) увеличится вдвое;
  - в) не изменится;
  - г) поведет себя непредсказуемо?
9. Как изменится сила тока, если сопротивление увеличить вдвое:
- а) увеличится вдвое;
  - б) не изменится;
  - в) уменьшится вдвое;
  - г) поведет себя непредсказуемо?
10. Как изменится сопротивление проводника, если проводник нагреть:
- а) уменьшится;
  - б) не изменится;
  - в) увеличится;
  - г) поведет себя непредсказуемо?
11. Почему электрическая энергия получила столь широкое применение в промышленности и быту:
- а) она может быть передана на большие расстояния;
  - б) она может быть преобразована в любые другие виды энергии;
  - в) она передается очень быстро;
  - г) все предыдущие ответы верны?

## **1.2. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ. ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

---

### **ТЕОРИЯ**

#### **1.2.1. Виды источников электрической энергии**

Источники электрической энергии являются преобразователями различных видов энергии (химической, механической, световой, тепловой и др.) в электрическую. В середине XVIII в. появились первые источники электрической энергии постоянного тока — химические.

*Химические источники энергии* представляют собой растворы кислот, щелочей и солей, называемые электролитами, в которые помещены электроды из разнородных электропроводящих материалов.

Например, элемент Вольта представляет собой пластины из меди и цинка, помещенные в раствор серной кислоты. В.В.Петров в 1802 г. для исследования электрической дуги впервые использовал батарею из 4 200 медных и цинковых пластин, соединенных последовательно. При этом общая ЭДС батареи равнялась почти 1 700 В. По имени итальянского ученого А.Гальвани, открывшего воздействие электрического тока на живой организм, такие источники были названы гальваническими элементами. До сих пор они широко применяются в виде батареек (рис. 1.7) в часах, плеерах, детских игрушках, фонарях и др.

*Аккумуляторы* — это тоже химические источники, но в них электроды изготовлены из материалов, восстанавливающих свои свойства при пропускании тока в обратном направлении (зарядке аккумулятора).

Основным параметром гальванических источников является их емкость, измеряемая в ампер-часах, т. е. количество электричества, отдаваемое элементом. Широкое применение они находят в качестве маломощных источников электропитания благодаря малым габаритным размерам, массе, стоимости и отсутствию каких-либо пульсаций, которые свойственны другим источникам питания.

*Электромашинные генераторы* постоянного и переменного тока используют явление электромагнитной индукции. Они являются сегодня основными источниками электропитания в про-

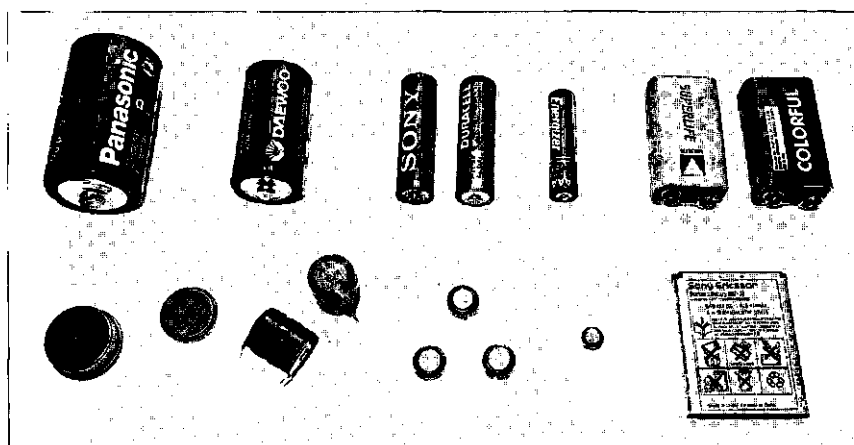


Рис. 1.7. Гальванические источники

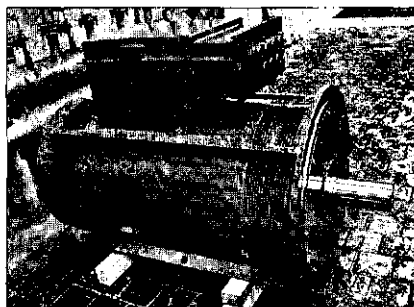


Рис. 1.8. Электромашинный генератор мощностью 4 МВт

мышленности, сельском хозяйстве, на транспорте и в быту. На тепловых, атомных и гидроэлектростанциях устанавливают электромашинные генераторы огромной мощности (рис. 1.8), приводимые в действие паровыми и гидротурбинами. Нередко приводом генераторов служат двигатели внутреннего сгорания.

*Фотозлектрические источники*, преобразующие световую энергию в электрическую с помощью

полупроводниковых фотоэлементов, находят применение в первую очередь на объектах, функционирующих в районах с высокой солнечной интенсивностью: на космических аппаратах и межпланетных станциях (солнечные батареи), в жилых домах (солнечные крыши), на электромобилях и др. Их основное преимущество — использование дарованной природой солнечной энергии в процессе эксплуатации.

*Источник термоЭДС*, преобразующий тепловую энергию в электрическую с помощью двух разнородных проводников, спаянных с одного конца, — еще один вид источника электрической энергии. Величина термоЭДС невелика: всего около  $5 \cdot 10^{-5}$  В/°С. Поэтому наибольшее применение термопреобразователи находят в качестве датчиков температуры.

Источниками электрической энергии могут служить также *пьезоэлектрические преобразователи*, вырабатывающие пьезоЭДС при деформации некоторых материалов, например керамики титаната бария или метаниобата бария и свинца. ПьезоЭДС таких источников может достигать сотен вольт, однако мощность их невелика. Они находят применение в микрофонах, звукоснимателях, датчиках давления и деформаций, пьезозажигалках и др.

## 1.2.2. Понятие электрической цепи

Чтобы электроны смогли перенести энергию от источника к потребителю, необходимо создать для них замкнутый путь.

☛ Совокупность устройств, обеспечивающих протекание электрического тока, называется *электрической цепью* (ЭЦ). Основными элементами ее являются:

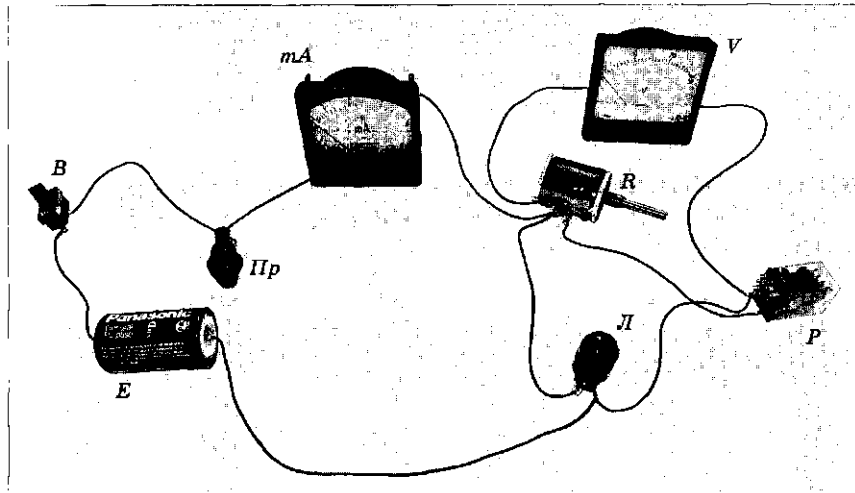


Рис. 1.9. Электрическая цепь

- источники электрической энергии;
- приемники электрической энергии;
- соединительные провода.

Кроме того, в состав ЭЦ могут входить защитные устройства (предохранители, автоматические выключатели и др.), коммутационные устройства (выключатели, рубильники, пускатели и др.) и измерительные приборы (амперметры, вольтметры, ваттметры и др.).

На рис. 1.9 показана простейшая электрическая цепь, состоящая из источника  $E$  (гальванический элемент), проводов, выключателя  $B$ , предохранителя  $Pr$ , измерительных приборов (миллиамперметра  $mA$  и вольтметра  $V$ ) и нагрузки в виде переменного резистора  $R$ , лампочки  $L$  и электромагнитного реле  $P$ , а на рис. 1.10 — эквивалентная схема замещения данной ЭЦ.

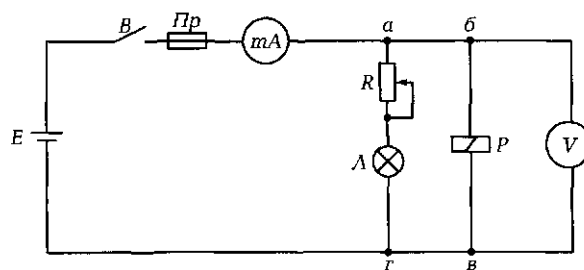


Рис. 1.10. Эквивалентная схема замещения ЭЦ, показанной на рис. 1.9

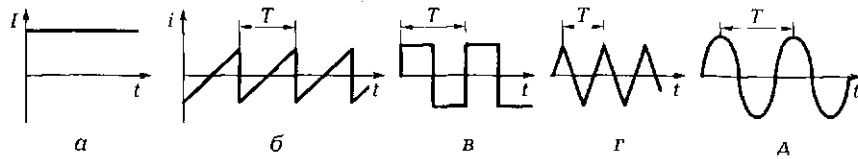


Рис. 1.11. Кривые тока:

*a* — постоянного; *б* — пилообразного; *в* — прямоугольного; *г* — треугольного; *д* — синусоидального; *T* — период колебаний

При рассмотрении электрической цепи используют понятия:

- *ветвь* — участок цепи, по которому течет один и тот же ток (*a* — *г*; *б* — *в* на рис. 1.10);
- *узел* — точка, в которой сходятся не менее трех ветвей (*a*, *г*);
- *контур* — замкнутый участок ЭЦ (*a* — *б* — *в* — *г*).

➤ **Постоянный ток** — это ток в ЭЦ, который не изменяет ни величины, ни направления (рис. 1.11, *a*). Все параметры, относящиеся к постоянному току, обозначаются заглавными латинскими буквами (*I*, *U*, *E*, *R*, *G*, *P*).

➤ **Переменный ток** — это ток в ЭЦ, который изменяется периодически по величине и направлению. Мгновенные значения всех электрических параметров, относящихся к переменному току, обозначаются строчными латинскими буквами (*i*, *u*, *e*, *r*, *g*, *p*). На рис. 1.11, *б* — *д* показаны возможные виды изменений переменного тока.

### 1.2.3. Основные законы электротехники

Для расчетов любых ЭЦ используются законы Ома, Кирхгофа (свои законы он сформулировал в возрасте 26 лет), Джоуля — Ленца и сохранения энергии.

➤ **Закон Ома** — ток в замкнутой неразветвленной электрической цепи (рис. 1.12) пропорционален ЭДС и обратно пропорционален полному сопротивлению:

$$I = \frac{E}{R_{\text{н}} + r_0},$$

где  $R_{\text{н}}$  — сопротивление потребителя;  $r_0$  — внутреннее сопротивление источника.

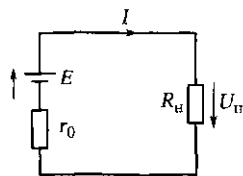


Рис. 1.12. Схема замкнутой неразветвленной ЭЦ

Для участка ЭЦ закон Ома принимает вид

$$I = \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{н}}},$$

где  $U_{\text{н}}$  — падение напряжения на сопротивлении  $R_{\text{н}}$ .

▶ **Первый закон (правило) Кирхгофа** — алгебраическая сумма токов в узле ЭЦ равна нулю:

$$\sum I = 0.$$

Рассмотрим узел *a* участка ЭЦ, показанного на рис. 1.13, а. Ток  $I_1$  в него втекает, а токи  $I_2, I_3, I_4$  — вытекают. Если принять направление тока к узлу положительным, то токи  $I_2, I_3, I_4$ , направленные из узла, будут отрицательны. Тогда  $I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0$ , или  $I_1 = I_2 + I_3 + I_4$ .

*Пример.* Найти ток  $I_4$  (см. рис. 1.13, а), если  $I_1 = 120$  мА,  $I_2 = 20$  мА и  $I_3 = 60$  мА.

*Решение:*  $I_4 = I_1 - I_2 - I_3 = 120 - 20 - 60 = 40$  мА.

▶ **Второй закон (правило) Кирхгофа** — алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжения в замкнутом контуре ЭЦ:

$$\sum E = \sum U = \sum IR.$$

Покажем на рис. 1.13, б направления ЭДС  $E_1, E_2, E_3$  (направление ЭДС определяется направлением сторонних сил — от «минуса» к «плюсу»), условно положительное направление тока  $I$  в ЭЦ и направления падений напряжений  $U_1, U_2, U_3$  на резисторах  $R_1, R_2, R_3$ . Приняв обход контура ЭЦ по часовой стрелке, можно записать:  $E_1 - E_2 - E_3 = U_1 + U_2 + U_3 = I(R_1 + R_2 + R_3 + r_{01} + r_{02} + r_{03})$ .

*Пример.* Для ЭЦ, показанной на рис. 1.13, б, найти ток  $I$  и падение напряжения на резисторе  $R_3$ , если  $E_1 = 20$  В,  $r_{01} = 30$  Ом,  $E_2 = 5$  В,  $r_{02} = 10$  Ом,  $E_3 = 10$  В,  $r_{03} = 20$  Ом,  $R_1 = 70$  Ом,  $R_2 = 140$  Ом,  $R_3 = 230$  Ом.

*Решение.* В соответствии с полученным ранее выражением  $I = (E_1 - E_2 - E_3) / (r_{01} + r_{02} + r_{03} + R_1 + R_2 + R_3) = (20 - 5 - 10) / (30 + 10 + 20 +$

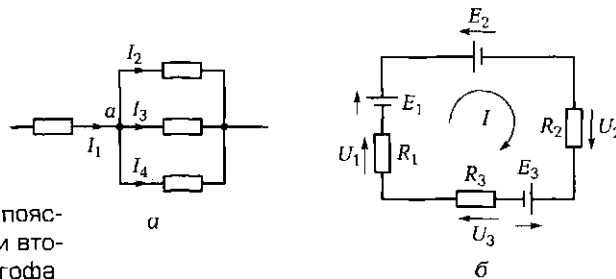


Рис. 1.13. Схемы, поясняющие первый (а) и второй (б) законы Кирхгофа



+ 70 + 140 + 230) = 5/500 = 0,01А = 10 мА. Падение напряжения  $U_3 = IR_3 = 0,01 \cdot 230 = 2,3$  В.

*Закон сохранения энергии (баланс мощностей)* — электрическая энергия (мощность), вырабатываемая источниками, равна энергии (мощности), потребляемой нагрузкой и вспомогательными элементами:

$$\sum P_{\text{ист}} = \sum P_{\text{н}} + \sum P_{\text{всп}}$$

*Пример.* Для ЭЦ, показанной на рис. 1.13, б, составить баланс мощностей.

*Решение.* Мощность источников  $\sum P_{\text{ист}} = E_1 I - E_2 I - E_3 I$ ; мощность нагрузки  $\sum P_{\text{н}} = I^2 R_1 + I^2 R_2 + IU_3$ ; мощность вспомогательных элементов  $\sum P_{\text{всп}} = I^2(r_{01} + r_{02} + r_{03})$ . Отсюда в соответствии с законом сохранения энергии  $E_1 I - E_2 I - E_3 I = I^2 R_1 + I^2 R_2 + IU_3 + I^2(r_{01} + r_{02} + r_{03})$ . Подставив числовые значения из предыдущего примера, получим  $20 \cdot 0,01 - 5 \cdot 0,01 - 10 \cdot 0,01 = 0,01^2 \cdot 70 + 0,01^2 \cdot 140 + 0,01 \cdot 2,3 + 0,01^2(30 + 10 + 20)$ , или  $0,05 = 0,044 + 0,006$ .

Таким образом, мощность, отдаваемая источниками (0,05 Вт), равна сумме мощностей, потребляемых нагрузкой (0,044 Вт) и вспомогательными элементами — внутренними сопротивлениями источников (0,006 Вт).

Законы Ома и Кирхгофа используют для расчета ЭЦ, закон сохранения энергии — как правило, для проверки правильности расчетов.

☛ *Закон Джоуля — Ленца* устанавливает соотношение между количеством теплоты, выделяемым электрическим током в проводнике, силой тока, временем его протекания и сопротивлением проводника. Об использовании этого закона при расчете ЭЦ говорится в подразд. 1.4.2.

## ПРАКТИКА

### Условно-графическое изображение элементов ЭЦ

*Задание:* пользуясь приложением 7 учебника, изобразите на рис. 1.14 условно-графические обозначения перечисленных элементов.

### Примеры решения типовых задач

1. Составьте эквивалентную схему замещения ЭЦ, фото которой показано на рис. 1.15.

Источник ЭДС		Переключатель	
Предохранитель		Выключатель	
Резистор постоянный		Резистор переменный	
Светодиод		Геркон	
Обмотка реле		Контакты реле	
Миллиамперметр		Вольтметр	
Динамик		Транзистор	
Диод		Трансформатор	
Разъем		Выпрямительный мост	
Конденсатор			

Рис. 1.14. Условно-графические обозначения элементов ЭЦ

ЭЦ состоит из колодки (разъема), трансформатора, выпрямительного моста, конденсатора, динамика и транзистора. К двум контактам четырехконтактной колодки подключена первичная обмотка трансформатора, во вторичную обмотку которого включен блок выпрямителя, собранного по мостовой схеме. К выходным зажимам «+» и «-» выпрямительного блока подключены конденсатор и динамик с транзистором. Динамик включен в цепь коллектора транзистора. Эмиттер транзистора соединен с зажимом «+» выпря-

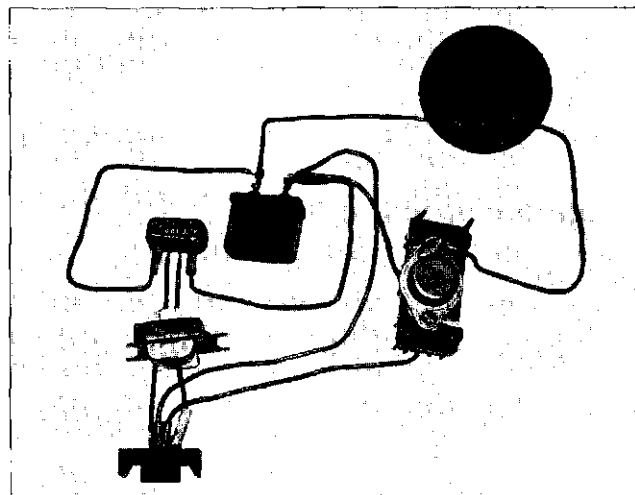


Рис. 1.15. Фото ЭЦ к задаче 1 подразд. 1.2

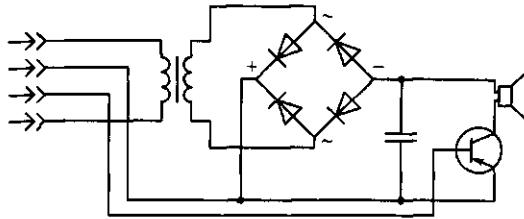


Рис. 1.16. Эквивалентная схема замещения ЭЦ, показанной на рис. 1.15

мительного блока, который подключен к третьему контакту колодки. База транзистора подключена к четвертому контакту колодки.

Пользуясь условно-графическими обозначениями, показанными на рис. 1.14, изобразим эквивалентную схему замещения (рис. 1.16).

2. ЭДС источника питания ЭЦ равна 110 В, внутреннее сопротивление источника 2 Ом. Амперметр, включенный последовательно с нагрузкой, показывает 5 А. Чему равно сопротивление нагрузки?

*Решение.* В соответствии с законом Ома для ЭЦ  $I = E / (R + r_0)$ . Отсюда сопротивление нагрузки  $R = (E - Ir_0) / I = (110 - 5 \cdot 2) / 5 = 20$  Ом.

*Ответ.* Сопротивление нагрузки равно 20 Ом.

3. Как будут вести себя две одинаковые лампы накаливания с номинальным напряжением 110 В каждая, если их включить в сеть напряжением 220 В:

- а) последовательно;
- б) параллельно.

*Ответ.* При последовательном включении ламп в сеть напряжением 220 В на каждую лампу будет приходиться по 110 В, что соответствует их номинальному напряжению. Следовательно, лампы будут отдавать номинальный световой поток. При параллельном включении каждая лампа окажется под напряжением, вдвое превышающем номинальное. В результате обе лампы перегорят.

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

4. На рис. 1.17 показана часть схемы включения ламп накаливания в пятирожковой люстре. Имеются



два выключателя. Первый включает две лампы, второй — три. При включении обоих выключателей горят все пять ламп. Дорисуйте схему.

Рис. 1.17. Схема к задаче 4 подразд. 1.2

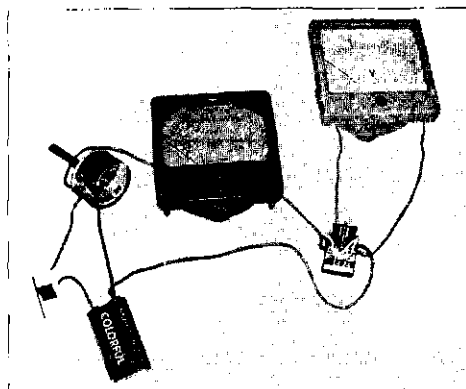


Рис. 1.18. Фото ЭЦ к задаче 5 подразд. 1.2 и эквивалентная схема замещения ЭЦ (изобразите на оставленном месте)

5. Изобразите эквивалентную схему замещения ЭЦ, показанной на рис. 1.18. Цепь включает в себя электромагнитное реле, катушка которого через миллиамперметр подключается к движку переменного резистора, питаемого через выключатель от гальванического источника. Параллельно обмотке реле включен вольтметр.

6. Вычислите силу тока  $I_3$ , вытекающего из узла  $a$  (рис. 1.19, а), если  $I_1 = 120$  мА,  $I_2 = 60$  мА,  $I_4 = 20$  мА,  $I_5 = 100$  мА.

7. Вычислите падение напряжения на резисторе  $R_3$  (рис. 1.19, б), если  $E_1 = 10$  В,  $E_2 = 20$  В,  $E_3 = 15$  В,  $E_4 = 5$  В,  $R_1 = 5$  Ом,  $R_2 = 4$  Ом,  $R_3 = 10$  Ом,  $R_4 = 6$  Ом,  $R_5 = 15$  Ом.

8. Сколько одинаковых ламп потребуется для изготовления елочной гирлянды, питаемой напряжением 220 В, если падение напряжения на каждой лампе 3,5 В, мощность лампы 0,35 Вт? Чему равны потребляемые ток и мощность?

9. Что произойдет с елочной гирляндой, если перегорит одна лампа?

10. Что произойдет с елочной гирляндой, если контакты одной из ламп закоротятся?

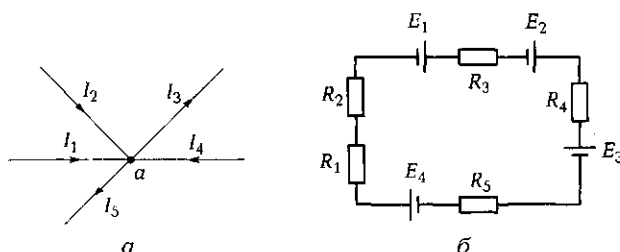


Рис. 1.19. Схемы к задачам 6 (а) и 7 (б) подразд. 1.2



Рис. 1.20. Схема, отражающая связь названий и формул основных законов электротехники (к задаче 13 подразд. 1.2)

11. Для питания лаборатории электротехники напряжением 36 В используется двухпроводная линия длиной 23 м, выполненная медным проводом с площадью поперечного сечения жил 16 мм<sup>2</sup>. Общий потребляемый лабораторией ток равен 20 А. На сколько изменится падение напряжения на подводящих проводах, если медный провод заменить алюминиевым того же сечения?

12. Для освещения двухкомнатной квартиры используются четыре энергосберегающие лампы мощностью 20 Вт каждая, работающие по 5 ч в сутки, и шесть ламп накаливания мощностью по 75 Вт, работающие по 2 ч в сутки. Определите потребляемую электрическую энергию за месяц.

13. На рис. 1.20 покажите с помощью прямых линий взаимосвязь между названием закона и его выражением.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

- Что такое электрическая цепь:
  - набор измерительных приборов, резисторов, конденсаторов и катушек индуктивностей;
  - совокупность устройств, обеспечивающих протекание электрического тока;
  - совокупность устройств, в которых электромагнитные процессы могут быть описаны с помощью понятий об электродвижущей силе, токе и напряжении;
  - предохранители, коммутирующие устройства, амперметры?
- Какие основные устройства входят в состав электрической цепи:
  - резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности;
  - источники, потребители, провода;

- в) лампы, измерительные приборы, выключатели;
  - г) предохранители, коммутирующие устройства, амперметры?
3. Какие дополнительные устройства могут входить в состав электрической цепи:
- а) резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности;
  - б) источники, потребители, провода;
  - в) лампы, нагревательные устройства, выключатели, амперметры;
  - г) предохранители, коммутирующие устройства, измерительные приборы?
4. Укажите *неправильное* выражение для закона Ома:
- а)  $U = IR$ ;
  - б)  $I = U/R$ ;
  - в)  $R = U/I$ ;
  - г)  $I = UR$ .
5. Укажите *правильную* формулировку первого закона Кирхгофа:
- а) алгебраическая сумма токов в электрической цепи равна нулю;
  - б) алгебраическая сумма токов в узле электрической цепи равна нулю;
  - в) сумма токов в замкнутом контуре электрической цепи равна нулю;
  - г) точный ответ не приведен.
6. Укажите *правильную* формулировку второго закона Кирхгофа:
- а) сумма напряжений в электрической цепи равна нулю;
  - б) алгебраическая сумма ЭДС в замкнутом контуре равна сумме падений напряжений;
  - в) сумма токов в узле электрической цепи равна нулю;
  - г) точный ответ не приведен.

### **1.3. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ПРИЕМНИКОВ И ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

#### **ТЕОРИЯ**

##### **1.3.1. Способы соединения приемников электрической энергии**

Любая ЭЦ включает в себя источники электрической энергии (генераторы, аккумуляторы, батареи) и потребителей электриче-

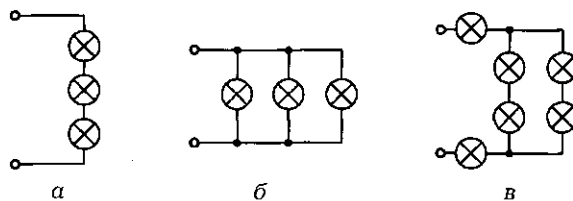


Рис. 1.21. Схемы включения ламп:  
а — последовательная; б — параллельная; в — смешанная

ской энергии (нагреватели, осветительные приборы, реле, двигатели и др.).

Источники характеризуются электродвижущей силой  $E$  и внутренним сопротивлением  $r_0$ . Потребители в электрических цепях постоянного тока характеризуются величиной активного сопротивления  $R$ . При этом они могут быть подключены к источнику питания последовательно (елочная гирлянда), параллельно (лампы освещения промышленных и бытовых помещений, улиц) или смешанно.

При *последовательном* соединении элементов цепи (рис. 1.21, а) конец первого потребителя соединяется с началом второго, конец второго — с началом третьего и т.д. Начало первого и конец последнего потребителей подключаются к зажимам источника питания.

На сопротивлении каждого из потребителей (рис. 1.22, а) падает напряжение, определяемое величиной тока и сопротивления:

$$U_1 = IR_1; U_2 = IR_2; U_3 = IR_3.$$

В соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$0 = U_1 + U_2 + U_3 - U, \text{ или } U = U_1 + U_2 + U_3.$$

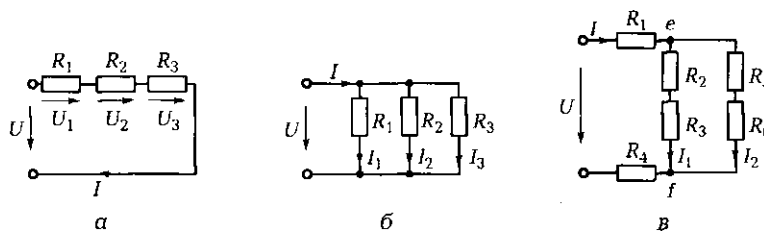


Рис. 1.22. Схемы замещения, соответствующие схемам включения ламп, показанным на рис. 1.21:

а — последовательное включение нагрузки; б — параллельное; в — смешанное

Поскольку ток в такой цепи является общим для всех потребителей, то, разделив последнее выражение на силу тока  $I$ , получим

$$R = R_1 + R_2 + R_3.$$

Общее сопротивление всей цепи  $R$  при последовательном включении потребителей равно сумме сопротивлений отдельных потребителей.

Умножив полученное выражение на  $I^2$ , будем иметь

$$I^2 R = I^2 R_1 + I^2 R_2 + I^2 R_3,$$

или

$$P_{\text{ЭЦ}} = P_1 + P_2 + P_3.$$

Потребляемая ЭЦ мощность равна сумме мощностей, потребляемых каждым элементом цепи. Отдаваемая источником мощность равна мощности, потребляемой всей цепью.

При *параллельном* соединении потребителей (рис. 1.21, б и 1.22, б) их начала соединяются в одну точку (узел), а концы — в другую. Обе точки (узла) присоединяются к разноименным зажимам источника питания.

В соответствии с первым законом Кирхгофа алгебраическая сумма токов для любого узла ЭЦ равна нулю, поэтому при параллельном соединении

$$I - I_1 - I_2 - I_3 = 0, \text{ или } I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Поскольку напряжение для всех потребителей одно и то же, то в соответствии с законом Ома

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U}{R_3}; \quad I = \frac{U}{R},$$

а значит,

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}.$$

Отсюда

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3},$$

или

$$G = G_1 + G_2 + G_3,$$

где  $G = 1/R$  — величина, обратная сопротивлению, — общая проводимость потребителей, измеряемая в сименсах (См).



☛ При параллельном соединении потребителей общая проводимость равна сумме проводимостей отдельных потребителей.

Для общего сопротивления можно записать

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 \text{ или } R = 1/(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3).$$

Умножив первое выражение на  $U^2$ , получим

$$\frac{U^2}{R} = \frac{U^2}{R_1} + \frac{U^2}{R_2} + \frac{U^2}{R_3},$$

или

$$P = P_1 + P_2 + P_3.$$

☛ При параллельном соединении элементов, как и при последовательном, потребляемая ЭЦ мощность равна сумме мощностей, потребляемых каждым элементом цепи, а также равна мощности, отдаваемой источником.

Расчет ЭЦ при смешанном соединении потребителей (рис. 1.21, в и 1.22, в) может быть выполнен на основе полученных ранее соотношений. Так, общее сопротивление цепи

$$R = R_1 + R_{ef} + R_4,$$

где

$$R_{ef} = \frac{1}{\frac{1}{R_2 + R_3} + \frac{1}{R_5 + R_6}}.$$

В соответствии с выражением для баланса мощностей мощность, отдаваемая источником, равна сумме мощностей, потребляемых каждым элементом цепи:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6.$$

### 1.3.2. Способы соединения источников электрической энергии

Соединение источников энергии может быть последовательным, параллельным и групповым.

Последовательное соединение (рис. 1.23, а) применяют для повышения напряжения питания. Как правило, так соединяют одинаковые по типу источники. При этом их ЭДС  $E$  и внутренние со-

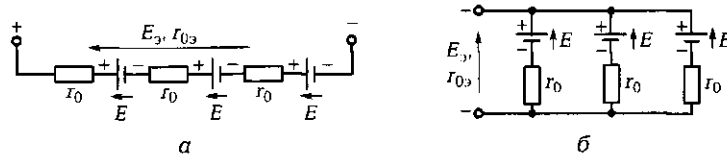


Рис. 1.23. Схемы включения источников:  
 а — последовательная; б — параллельная

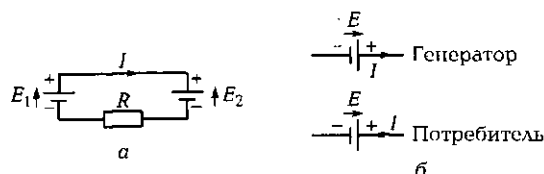


Рис. 1.24. Встречное включение источников:  
 а — схема включения; б — режимы работы источников

противления  $r_0$  складываются, в результате образуется как бы один источник с эквивалентной ЭДС  $E_э$  и эквивалентным внутренним сопротивлением  $r_{0э}$ :

$$E_э = \sum E; \quad r_{0э} = \sum r_0.$$

*Параллельное соединение* (рис. 1.23, б) используют для повышения мощности источника. Так включают источники с одинаковыми величинами ЭДС. При этом эквивалентная ЭДС равна ЭДС источника, а эквивалентное внутреннее сопротивление  $r_{0э}$  определяется, как эквивалентное сопротивление параллельно включенных резисторов:

$$E_э = E; \quad r_{0э} = \frac{1}{\sum \frac{1}{r_0}}.$$

*Групповое соединение* служит для повышения и напряжения, и мощности питания. В ЭЦ с несколькими источниками, включенными встречно друг другу (рис. 1.24) (например, аккумулятор и его зарядное устройство) необходимо различать источник, работающий в режиме генератора, и источник, работающий в режиме потребителя.

Согласно второму закону Кирхгофа  $E_1 - E_2 = IR$ . Если  $E_1 > E_2$ , то направление тока совпадает с направлением ЭДС  $E_1$ , источник которой работает генератором, и противоположно направлению ЭДС  $E_2$ , источник которой работает потребителем. Если  $E_1 < E_2$ , то наоборот.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. Имеется разветвление, состоящее из четырех параллельно включенных резисторов с сопротивлениями  $R_1 = 10$  Ом,  $R_2 = 5$  Ом,  $R_3 = 4$  Ом,  $R_4 = 8$  Ом (рис. 1.25). Ток  $I$ , втекающий в точку разветвления, равен 20 А. Определите токи, протекающие в каждой ветви.

*Решение.* Вычислим эквивалентное сопротивление параллельно включенных резисторов:

$$R_{\text{экв}} = 1/(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_4) = 1/(1/10 + 1/5 + 1/4 + 1/8) = 1,48 \text{ Ом.}$$

Определим падение напряжения на сопротивлении  $R_{\text{экв}}$ , создаваемое протекающим током:

$$U = R_{\text{экв}} I = 1,48 \cdot 20 = 29,6 \text{ В.}$$

Вычислим токи в каждой ветви в соответствии с законом Ома:

$$I_1 = U/R_1 = 29,6/10 = 2,96 \text{ А}; I_2 = U/R_2 = 29,6/5 = 5,92 \text{ А};$$

$$I_3 = U/R_3 = 29,6/4 = 7,4 \text{ А}; I_4 = U/R_4 = 29,6/8 = 3,7 \text{ А.}$$

Проверим правильность расчетов, используя первый закон Кирхгофа, согласно которому  $\sum I = 0$ . В нашем случае

$$\sum I = I - (I_1 + I_2 + I_3 + I_4) = 20 - (2,96 + 5,92 + 7,4 + 3,7) = 0,02 \text{ А.}$$

Сумма токов в узле близка нулю, т. е. задача решена верно.

*Ответ.* Токи в ветвях равны соответственно 2,96 А; 5,92 А; 7,4 А; 3,7 А.

2. Для простой ЭЦ с несколькими источниками питания и смешанным включением приемников (рис. 1.26) известны ЭДС и внутренние сопротивления источников, а также сопротивления приемников. Определите токи в ветвях и падения напряжений на каждом элементе цепи. Проверьте правильность расчета, составив уравнение баланса мощностей.

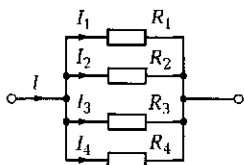


Рис. 1.25. Расчетная схема простой ЭЦ к задаче 1 подразд. 1.3

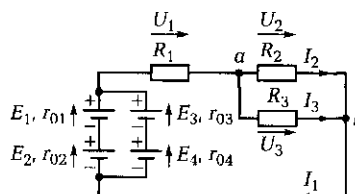


Рис. 1.26. Схема ЭЦ к задаче 2 подразд. 1.3

Дано:  $E_1 = E_2 = E_3 = E_4 = E_0 = 4,5 \text{ В}$ ;  $r_{01} = r_{02} = r_{03} = r_{04} = r_0 = 1 \text{ Ом}$ ;  $R_1 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 40 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 60 \text{ Ом}$ .

Найти:  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $U_{r_{03}}$ .

Решение. Эквивалентное сопротивление нагрузки ЭЦ

$$R_3 = R_1 + 1/(1/R_2 + 1/R_3) = 44 \text{ Ом.}$$

Эквивалентная ЭДС источника питания

$$E_3 = E_1 + E_2 = 2E_0 = 9 \text{ В.}$$

Эквивалентное внутреннее сопротивление источника питания

$$r_{03} = 1/(2/r_0) + 1/(2/r_0) = 1 \text{ Ом.}$$

Полный ток ЭЦ

$$I_1 = E_3/(R_3 + r_{03}) = 9/(44 + 1) = 0,2 \text{ А.}$$

Падение напряжения на участке  $a - b$

$$U_{ab} = U_2 = U_3 = I_1(1/(1/R_2 + 1/R_3)) = 0,2 \cdot 24 = 4,8 \text{ В.}$$

Ток через резистор  $R_2$

$$I_2 = U_{ab}/R_2 = 4,8/40 = 0,12 \text{ А.}$$

Ток через резистор  $R_3$

$$I_3 = U_{ab}/R_3 = 4,8/60 = 0,08 \text{ А.}$$

Падение напряжения на резисторе  $R_1$

$$U_1 = I_1 R_1 = 0,2 \cdot 20 = 4 \text{ В.}$$

Падение напряжения на эквивалентном внутреннем сопротивлении источника  $r_{03}$

$$U_{r_{03}} = I_1 r_{03} = 0,2 \cdot 1 = 0,2 \text{ В.}$$

Мощности, рассеиваемые на резисторах  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,

$$P_1 = I_1^2 R_1 = 0,8 \text{ Вт}; P_2 = I_2^2 R_2 = 0,576 \text{ Вт}; P_3 = I_3^2 R_3 = 0,384 \text{ Вт.}$$

Мощность, отдаваемая источниками,

$$P_{\text{ист}} = I_1(E_1 + E_2) = 2E_0 I_1 = 1,8 \text{ Вт.}$$

Мощность, расходуемая на внутреннем сопротивлении источников,

$$P_{r_{03}} = I_1^2 r_{03} = 0,04 \text{ Вт.}$$

Проверяем правильность расчетов, используя баланс мощностей:

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_{r_{03}} = 0,8 + 0,576 + 0,384 + 0,04 = 1,8 \text{ Вт} = P_{\text{ист.}}$$

Баланс мощностей соблюдается, следовательно, расчет ЭЦ выполнен верно.

*Ответ.* Токи в ветвях:  $I_1 = 0,2 \text{ А}$ ;  $I_2 = 0,12 \text{ А}$ ;  $I_3 = 0,08 \text{ А}$ . Падения напряжений:  $U_1 = 4 \text{ В}$ ;  $U_2 = U_3 = 4,8 \text{ В}$ ;  $U_{r_{03}} = 0,2 \text{ В}$ .

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

3. Дорисуйте показанную на рис. 1.27 схему так, чтобы лампы были соединены последовательно и подключены к источнику питания. Что произойдет с лампами, если выключатель *B1* перевести во включенное положение? Что произойдет с лампами, если выключатель *B2* перевести в выключенное положение?

4. Дорисуйте показанную на рис. 1.28 схему так, чтобы лампы были соединены параллельно и подключены к источнику питания. Что произойдет с лампами, если выключатель *B1* перевести во включенное положение? Что произойдет с лампами, если выключатель *B2* перевести в выключенное положение?

5. Чему равно эквивалентное сопротивление цепи, схема которой показана на рис. 1.29, а, если каждый резистор имеет сопротивление 30 Ом?

6. Чему равно эквивалентное сопротивление цепи, схема которой изображена на рис. 1.29, б, если  $R = 50 \text{ Ом}$ ?

7. Напишите выражение для эквивалентного сопротивления ЭЦ, схема замещения которой показана на рис. 1.30.

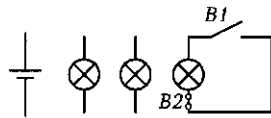


Рис. 1.27. Схема к задаче 3 подразд. 1.3

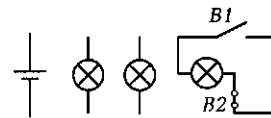
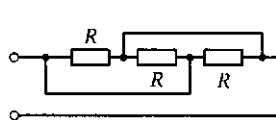
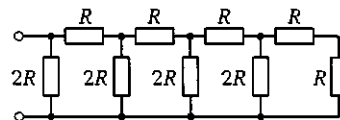


Рис. 1.28. Схема к задаче 4 подразд. 1.3



а



б

Рис. 1.29. Схемы к задачам 5 (а) и 6 (б) подразд. 1.3

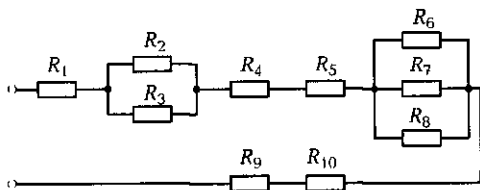


Рис. 1.30. Схема к задаче 7 подразд. 1.3

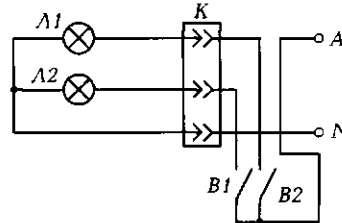


Рис. 1.31. Схема к задаче 8 подразд. 1.3

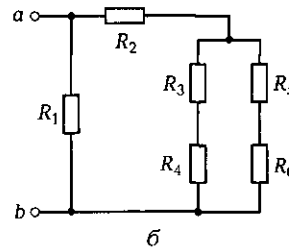
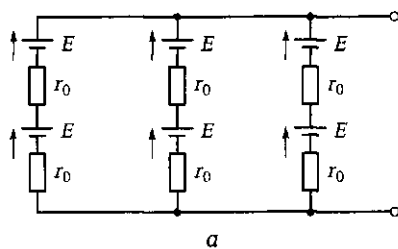


Рис. 1.32. Схемы к задачам 9 (а) и 10 (б) подразд. 1.3

**8.** К трехконтактной колодке  $K$  подключены две лампы светильника, включаемые спаренным выключателем  $B1 - B2$  параллельно (рис. 1.31). Как нужно пересоединить концы проводов на колодке  $K$  (покажите на схеме), чтобы при замыкании только выключателя  $B1$  лампа  $L2$  находилась под полным напряжением, а при замыкании только выключателя  $B2$  напряжение на обеих лампах равнялось бы половине полного?

**9.** Вычислите эквивалентную ЭДС и внутреннее сопротивление источника питания для ЭЦ, схема которой показана на рис. 1.32, а, если  $E = 1,5$  В,  $r_0 = 1,5$  Ом.

**10.** Для простой ЭЦ со смешанным включением приемников энергии (рис. 1.32, б) известны сопротивления приемников:  $R_1 = 20$  Ом,  $R_2 = 5$  Ом,  $R_3 = 10$  Ом,  $R_4 = 20$  Ом,  $R_5 = 20$  Ом,  $R_6 = 10$  Ом. Определите эквивалентное сопротивление между точками  $a$  и  $b$  цепи.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Как могут быть включены приемники электрической энергии:
  - а) последовательно;
  - б) параллельно;
  - в) смешанно;
  - г) любым из перечисленных способов?

2. Каким может быть соединение источников электрической энергии:
  - а) последовательным;
  - б) параллельным;
  - в) групповым;
  - г) любым из перечисленных?
3. Как включают в электрическую цепь амперметр:
  - а) последовательно с нагрузкой;
  - б) параллельно;
  - в) смешанно;
  - г) как проще?
4. Как включают в электрическую цепь предохранитель, защищающий оборудование от токов, превышающих номинальные:
  - а) последовательно с оборудованием;
  - б) параллельно;
  - в) смешанно;
  - г) как проще?
5. Как надо соединить несколько источников, чтобы повысить напряжение питания:
  - а) параллельно;
  - б) последовательно;
  - в) звездой;
  - г) как ни соединяй — повысить не удастся?
6. Как соединяют лампы в елочной гирлянде:
  - а) параллельно;
  - б) последовательно;
  - в) звездой;
  - г) так, чтобы было красиво?
7. В каком случае лампы освещения включают параллельно:
  - а) при освещении бытовых помещений;
  - б) освещении промышленных помещений;
  - в) уличном освещении;
  - г) во всех перечисленных случаях?
8. Что произойдет, если в электрической цепи с последовательным соединением ламп одна перегорит:
  - а) остальные лампы будут гореть с меньшим накалом;
  - б) остальные лампы перегорят;
  - в) остальные лампы потухнут;
  - г) остальные лампы будут гореть ярче?
9. Что произойдет, если в электрической цепи с последовательным соединением ламп концы одной из них закортятся:
  - а) остальные лампы будут гореть с меньшим накалом;

- б) остальные лампы сгорят;
  - в) остальные лампы потухнут;
  - г) остальные лампы будут гореть ярче?
10. Как включают в электрическую цепь вольтметр:
- а) последовательно;
  - б) параллельно;
  - в) смешанно;
  - г) как проще?

## 1.4. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ. РАСЧЕТ ПРОВОДОВ. РАЗВЕТВЛЕННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ

### ТЕОРИЯ

#### 1.4.1. Режимы работы электрических цепей

Электрическая цепь может работать в четырех основных режимах.

- *Номинальный режим* — это режим, рекомендуемый заводом-изготовителем. Номинальные данные оговариваются в справочной литературе и паспортных данных. В этом режиме устройство может работать в течение длительного времени.

Например, для резистора оговариваются номинальные значения сопротивления и мощности, для конденсатора — номинальные значения емкости и рабочего напряжения, для генератора — номинальные значения напряжения и тока. В последнем случае под номинальным значением тока понимается такой ток, который генератор длительное время может отдавать во внешнюю цепь, не перегреваясь.

- *Режим холостого хода (ХХ)* — это режим, при котором через источник или приемник не протекает ток ( $I_{\text{ХХ}} = 0$ ). Напряжение на источнике в этом случае равно его ЭДС.

- *Режим короткого замыкания (КЗ)* — это режим, когда зажимы источника, приемника или иных элементов ЭЦ, между которыми имеется напряжение, соединены между собой или через ничтожно малое сопротивление (например, через амперметр, включенный по ошибке параллельно нагрузке).

Режим КЗ является аварийным, поскольку ток короткого замыкания во много раз превышает номинальный ток установки и мо-



жет вызвать ее повреждение. Для защиты от токов короткого замыкания используются предохранители и автоматические выключатели, рассчитанные на определенное значение тока.

- *Согласованный режим* — это режим, при котором мощность, передаваемая от источника к потребителю, максимальна.

На первый взгляд, это наиболее выгодный режим. Но так как максимальная мощность от источника к нагрузке передается при  $R_n = r_0$ , то коэффициент полезного действия (КПД) установки

$$\eta = \frac{P_n}{P_{ист}} = \frac{U_n I}{EI} = \frac{U_n}{E} = \frac{E \frac{R_n}{R_n + r_0}}{E} = \frac{R_n}{R_n + r_0} = 0,5.$$

Подобный режим по меркам общей электротехники не является рациональным. Энергетические установки работают обычно в режиме, когда токи и мощности лежат в пределах от номинальных значений до их значений при холостом ходе. При этом  $\eta$  стремится к 1.

Однако в отдельных случаях согласованный режим бывает предпочтительным. Например, для магнитоэлектрического генератора импульсного действия основной задачей является передача максимальной мощности в нагрузку, а это возможно лишь в согласованном режиме.

### 1.4.2. Расчет проводов на потерю напряжения и на нагревание

Одним из важных этапов расчета ЭЦ является расчет проводов на потерю напряжения и на нагревание.

При расчетах известны:

- напряжение источника питания  $U_0$ ;
- напряжение на нагрузке  $U_n$ , обеспечивающее номинальный режим работы оборудования;
- ток нагрузки  $I_n$ ;
- длина линии передачи  $l$ ;
- материал провода.

Потери напряжения  $\Delta U$  в линии передачи в этом случае определяются площадью поперечного сечения проводов  $S$ . Действительно,  $\Delta U = U_0 - U_n = 2R_\lambda I_n = 2I_n \rho l / S$ , где  $R_\lambda$  и  $\rho$  — соответственно сопротивление проводов линии передачи и удельное электрическое сопротивление материала провода. Отсюда

$$S = \frac{2\rho l I_n}{\Delta U}.$$

Вычислив  $S$ , по справочнику выбирают ближайшее стандартное значение площади поперечного сечения провода.

Для уменьшения потерь напряжения в проводах необходимо увеличивать площадь их поперечного сечения.

Одновременно с расчетом на потерю напряжения выполняют расчет на нагревание проводов, поскольку оно ведет не только к потере энергии, но и нарушению работоспособности электрооборудования. Значительный ток может привести к перегреву проводов и нарушению их изоляции. Количество теплоты, выделяющейся в проводах, вычисляют в соответствии с законом Джоуля — Ленца:

$$Q_{\text{пр}} = 0,24I^2R_{\text{пр}}t.$$

Как правило, расчет проводов сводится к определению площади поперечного сечения провода для обеспечения допустимого падения напряжения и к последующей проверке по справочнику допустимости полученного значения площади сечения для заданной токовой нагрузки. Если в справочнике указан ток, меньший заданного, то площадь сечения увеличивается таким образом, чтобы она соответствовала требованиям нагрузки.

Одну и ту же мощность по проводам можно передавать при высоком напряжении и низком токе или при низком напряжении и высоком токе. Поскольку потери мощности в проводах пропорциональны квадрату тока ( $P_{\text{пр}} = I^2R_{\text{пр}}$ ), то очевидно, что передачу энергии выгоднее осуществлять при высоком напряжении и малом токе. Это позволяет уменьшить площадь поперечного сечения проводов, а значит, и расход материала на их изготовление. Именно так передают энергию на переменном токе в линии электропередач (ЛЭП), повышая напряжение до 500 — 1 150 кВ и тем самым снижая ток в линии и потери.

### 1.4.3. Разветвленная электрическая цепь. Метод контурных токов

☛ *Разветвленные ЭЦ* — это многоконтурные цепи с несколькими источниками питания. Для их расчета разработан ряд методов. Основными из них являются:

- метод непосредственного применения законов Кирхгофа;
- метод контурных токов;
- метод узлового напряжения;
- метод эквивалентного генератора.

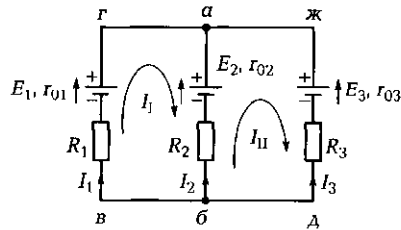


Рис. 1.33. Схема разветвленной ЭЦ

Метод контурных токов благодаря своей универсальности нашел наиболее широкое применение. Использование этого метода позволяет сократить число уравнений, которые составляют лишь по второму закону Кирхгофа для условных контурных токов в замкнутых участках цепи. При этом число уравнений должно

быть равно числу смежных контуров.

Для ЭЦ, схема которой показана на рис. 1.33, число смежных контуров равно двум, поэтому и уравнений должно быть два. На схеме ЭЦ показаны условно положительные направления контурных токов ( $I_I$  и  $I_{II}$ ) и токов в ветвях ( $I_1, I_2, I_3$ ).

Для смежных контуров  $a-b-v-g-a$  и  $a-ж-д-б-a$  в соответствии со вторым законом Кирхгофа, обходя контур по часовой стрелке, запишем:

$$E_1 - E_2 = I_I(R_1 + r_{01} + R_2 + r_{02}) - I_{II}(R_2 + r_{02});$$

$$E_2 - E_3 = I_{II}(R_2 + r_{02} + R_3 + r_{03}) - I_I(R_2 + r_{02}).$$

Решая полученные уравнения, находим контурные токи  $I_I$  и  $I_{II}$ .

Ток ветви  $б-в-g-a$   $I_1$  равен контурному току  $I_I$ .

Ток ветви  $a-ж-д-б$   $I_3$  равен по величине и противоположен по направлению контурному току  $I_{II}$ , т. е.  $I_3 = -I_{II}$ .

Ток смежной ветви  $a-б$   $I_2$  равен разности контурных токов  $I_{II} - I_I$ .

Если при решении обнаруживается, что отдельные токи в ветвях оказались отрицательными, это значит, что действительное направление токов противоположно условно выбранному направлению.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. Определите параметры кабеля для подводки электропитания к лаборатории электротехники от понижающего трехфазного трансформатора с линейным напряжением 36 В. Длина линии  $l = 20$  м, напряжение на нагрузке должно быть не ниже 35 В, общий потребляемый ток  $I_n = 20$  А.

*Решение.* В качестве материала провода выбираем медь, имеющую удельное электрическое сопротивление  $\rho = 0,0175$  Ом·мм<sup>2</sup>/м.

Вычисляем площадь поперечного сечения провода, обеспечивающую заданное падение напряжения на подводящих проводах:

$$S = 2\rho I_n / \Delta U = 2 \cdot 0,0175 \cdot 20 \cdot 20 / (36 - 35) = 14 \text{ мм}^2.$$

По справочнику выбираем ближайшую большую площадь сечения  $S = 16 \text{ мм}^2$ . Проверяем по справочнику допустимый ток в изолированных проводах при продолжительной нагрузке. Он равен 75 А, что значительно превышает заданную величину.

*Ответ.* Для питания лаборатории трехфазным линейным напряжением 36 В необходимо выбрать четырехжильный кабель с площадью поперечного сечения жил  $16 \text{ мм}^2$ .

2. Вычислите сопротивление нагрузки, обеспечивающей согласованный режим работы ЭЦ, если ЭДС источника  $E = 3 \text{ В}$ , а ток короткого замыкания  $I_{КЗ} = 1 \text{ А}$ .

*Решение.* В согласованном режиме сопротивление нагрузки должно быть равно внутреннему сопротивлению  $r_0$  источника питания. В соответствии с законом Ома внутреннее сопротивление источника  $r_0 = E / I_{КЗ} = 3 / 1 = 3 \text{ Ом}$ .

*Ответ.* Сопротивление нагрузки, обеспечивающее согласованный режим работы электрической цепи, а значит, и максимальную мощность, передаваемую от источника к нагрузке, должно быть равно 3 Ом.

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

3. Согласно паспортным данным при номинальном режиме работы двигателя постоянного тока номинальный ток в обмотке возбуждения, имеющей сопротивление 100 Ом, должен быть равен 1 А. Определите напряжение источника питания, которое обеспечит нормальную работу двигателя, если сопротивление подводящих проводов и внутреннее сопротивление источника составляют 10 Ом.

4. Определите ток короткого замыкания в ЭЦ, если  $E = 9 \text{ В}$ ,  $r_0 = 10 \text{ Ом}$ , номинальное сопротивление нагрузки  $R_n = 80 \text{ Ом}$ . Во сколько раз этот ток превышает номинальный ток ЭЦ?

5. В режиме холостого хода напряжение источника с внутренним сопротивлением 2 Ом равно 114 В. Чему будет равно напряжение на нагрузке, номинальный ток через которую равен 2 А?

6. Определите номинальное напряжение питания двигателя постоянного тока, сопротивление якоря которого равно 0,5 Ом, номинальный ток якоря  $I_{я} = 10 \text{ А}$ , противоЭДС при номинальной частоте вращения  $E_{я} = 105 \text{ В}$ .

7. Какой должна быть площадь сечения алюминиевого провода, соединяющего однофазный двигатель с источником питания ( $E = 230 \text{ В}$ )? Расстояние между двигателем и источником 50 м. Потребляемый ток равен 10 А при напряжении 220 В.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Чему равен ток в ЭЦ в режиме холостого хода:
  - а) номинальному току;
  - б) нулю;
  - в) максимальному току;
  - г) значение тока может быть любым?
2. Какое определение подходит для режима короткого замыкания:
  - а) безопасный режим;
  - б) аварийный режим;
  - в) согласованный режим;
  - г) ни одно из определений не подходит?
3. Какое определение подходит для номинального режима работы:
  - а) обеспечивает нормальную работу оборудования в течение длительного времени;
  - б) указывается в паспортных данных;
  - в) рекомендуется заводом-изготовителем;
  - г) подходят все определения?
4. Какой режим используется для передачи максимальной мощности от источника к потребителю:
  - а) короткого замыкания;
  - б) холостого хода;
  - в) согласованный;
  - г) все перечисленные режимы?
5. Что необходимо знать при расчетах потерь в подводящих проводах:
  - а) ток и сопротивление нагрузки;
  - б) длину и материал проводов;
  - в) напряжение источника питания;
  - г) все перечисленные показатели?
6. Что такое разветвленная ЭЦ:
  - а) многоконтурная цепь с одним источником питания;
  - б) одноконтурная цепь с несколькими источниками питания;
  - в) цепь с несколькими источниками питания в нескольких контурах;
  - б) цепь, в которой текут контурные токи?

## 1.5. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

### ТЕОРИЯ

#### 1.5.1. Виды вольт-амперных характеристик нелинейных элементов

Широкое применение в системах автоматического управления и регулирования, различного рода электротехнических установках и приборах нашли *нелинейные элементы*. Это такие элементы, у которых зависимость между напряжением и током — вольт-амперная характеристика (ВАХ) — является нелинейной.

По виду ВАХ нелинейные элементы (НЭ) подразделяются следующим образом:

- симметричные (электрическая лампа накаливания) — рис. 1.34, а;
- несимметричные (полупроводниковый диод) — рис. 1.34, б;
- управляемые (транзистор) — рис. 1.34, в.

Нелинейность ВАХ лампы накаливания определяется зависимостью удельного электрического сопротивления материала нити  $\rho$  от температуры. В свою очередь температура нити накаливания зависит от тока  $I$ , протекающего по ней. Следовательно,

$$\rho = f(I).$$

Так как сопротивление нити  $R = \rho l/S$ , то оно также является функцией тока.

Для *проводников* удельное электрическое сопротивление увеличивается с ростом температуры. Поскольку температура нити накаливания в рабочих условиях изменяется от 20 до 2 500 °С, то при

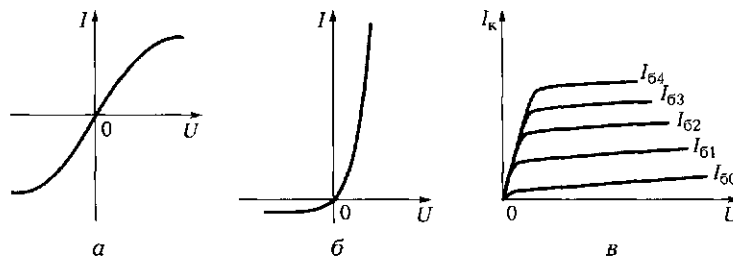


Рис. 1.34. Виды ВАХ нелинейных элементов:

а — симметричная; б — несимметричная; в — управляемая

увеличении приложенного напряжения сопротивление лампы накаливания растет ( $R_{T2} = R_{T1}(1 + \alpha\Delta T)$ ) и увеличение тока происходит не по линейной зависимости.

В основу работы нелинейных *полупроводниковых* элементов (диод, стабилитрон, транзистор) положено изменение сопротивления  $n-p$ -перехода, образованного двумя полупроводниками с  $n$ - и  $p$ -проводимостью. При отсутствии внешнего электрического поля на границе  $n-p$ -перехода существует внутреннее поле, препятствующее свободному перемещению электронов и дырок. Сопротивление перехода велико. Если направление внешнего поля совпадает с направлением внутреннего, то сопротивление еще более увеличивается и ток через  $n-p$ -переход чрезвычайно мал. Если же внешнее поле направлено навстречу внутреннему, то сопротивление  $n-p$ -перехода уменьшается и через переход может протекать значительный ток (подробнее см. подразд. 6.1.5).

Таким образом,  $n-p$ -переход в полупроводниках обладает вентильным свойством, пропуская ток в одном направлении и не пропуская при обратной полярности приложенного напряжения. Это свойство  $n-p$ -перехода положено в основу работы полупроводникового диода. Его ВАХ показана на рис. 1.34, б.

Биполярный транзистор строится на основе двух  $n-p$ -переходов и обладает управляемой ВАХ (см. рис. 1.34, в). Если к одному  $n-p$ -переходу (база — эмиттер) прикладывать небольшое напряжение, обеспечивающее протекание токов  $I_{\beta 0}, I_{\beta 1}, I_{\beta 2}, I_{\beta 3}, I_{\beta 4}$ , то можно управлять значительным током  $I_k$  через другой  $n-p$ -переход (коллектор — эмиттер).

### 1.5.2. Последовательное соединение нелинейных элементов

☛ К нелинейным ЭЦ применимы основные законы электротехники. При этом расчеты таких цепей удобно выполнять с помощью графоаналитических методов.

Суть его заключается в том, что по известным ВАХ элементов строят ВАХ отдельных участков или всей цепи и далее по результирующей ВАХ определяют или токи в ветвях, или напряжения на элементах.

Для ЭЦ с последовательным соединением НЭ (например, полупроводникового диода и лампы накаливания — рис. 1.35, а) результирующая ВАХ  $I(U)$  (штриховая линия на рис. 1.35, б) строится на основе второго закона Кирхгофа суммированием абсцисс точек ВАХ отдельных элементов при общем для них значении тока. Для

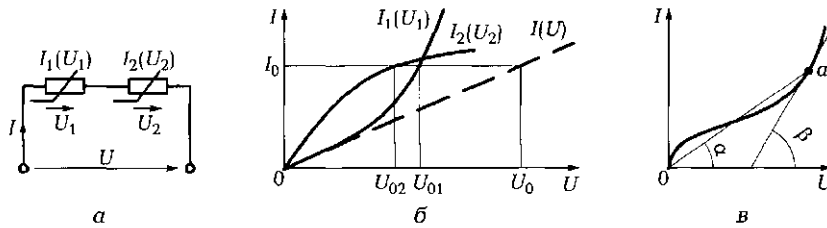


Рис. 1.35. Электрическая цепь с последовательным включением нелинейных элементов:

*a* — схема ЭЦ; *б* — графоаналитический метод расчета с использованием реальных ВАХ элементов; *в* — график, поясняющий суть статического и динамического сопротивлений

полученной ВАХ при любом значении напряжения на ЭЦ  $U_0$  может быть определен ток  $I_0$  и соответственно падения напряжений на нелинейных элементах  $U_{01}$  и  $U_{02}$ .

Для нелинейного элемента характерно два вида сопротивления. Например, для точки *a* (рис. 1.35, *в*) можно рассматривать сопротивления:

- *статическое*, пропорциональное  $\operatorname{tg} \alpha$ ;
- *дифференциальное (динамическое)*, позволяющее судить о приращении напряжения и тока. Оно пропорционально  $\operatorname{tg} \beta$ , где  $\beta$  — угол между осью абсцисс и касательной к ВАХ.

### 1.5.3. Параллельное соединение нелинейных элементов

При *параллельном* соединении нелинейных элементов (рис. 1.36, *a*) результирующая ВАХ  $I(U)$  строится на основе первого закона Кирхгофа суммированием ординат точек ВАХ отдельных нелинейных элементов при общих для них значениях напряжения (рис. 1.36, *б*). На основе полученной результирующей ВАХ  $I(U)$  при любом значении напряжения на ЭЦ может быть определен общий ток, потребляемый цепью, и токи в ветвях с нелинейными элементами.

При *смешанном* соединении нелинейных элементов результирующая ВАХ строится в соответствии с приведенными ранее алгоритмами.

Так, для ЭЦ, показанной на рис. 1.36, *в*, алгоритм имеет следующий вид:

- строится суммарная ВАХ двух последовательно включенных нелинейных элементов  $NЭ1$  и  $NЭ2$ ;



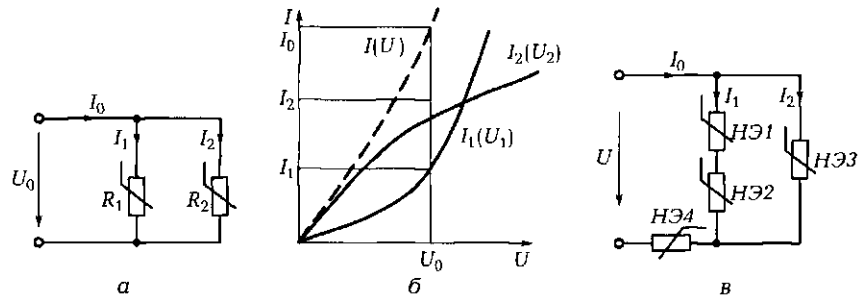


Рис. 1.36. Электрические цепи с параллельным (а, б) и смешанным (в) включением нелинейных элементов:

а — схема ЭЦ с параллельным включением НЭ; б — графоаналитический метод расчета с использованием реальных ВАХ элементов; в — схема ЭЦ со смешанным включением НЭ

- полученная суммарная ВАХ складывается графически с ВАХ нелинейного элемента *НЭ3*, включенного параллельно;
- вновь полученная суммарная ВАХ складывается с ВАХ нелинейного элемента *НЭ4*, включенного последовательно;
- на основе полученной результирующей ВАХ для заданного значения величины напряжения  $U$  могут быть определены токи в ветвях  $I_1$  и  $I_2$ , падения напряжений на каждом нелинейном элементе и общий ток  $I_0$ , потребляемый ЭЦ.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. На рис. 1.37, а изображена схема усилителя на транзисторе КТ3107Б с резистором в цепи коллектора  $R_k = 70$  Ом и источником пи-

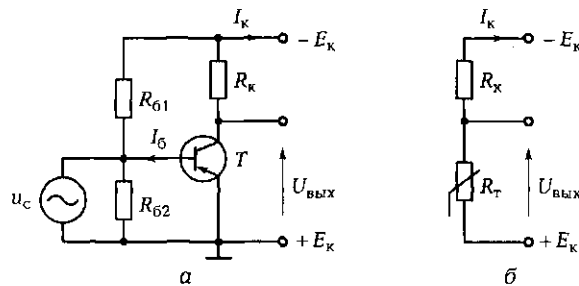


Рис. 1.37. Схема усилителя (а) и его схема замещения (б) к задаче 1 подразд. 1.5

тания  $E_k = 9$  В. На рис. 1.37, б показана схема замещения усилителя, где  $R_r$  — нелинейное сопротивление транзистора  $T$ . При  $u_c = 0$  за счет базового делителя  $R_{б1} - R_{б2}$  в цепи базы течет ток  $I_б = 0,8$  мА. В рабочем режиме входной сигнал  $u_c$  изменяет базовый ток от 0,2 до 1,6 мА.

Определите значения выходного напряжения  $U_{вых}$  и коллекторного тока  $I_k$  при  $u_c = 0$ , а также диапазон изменения напряжения и тока в рабочем режиме.

Расчеты выполним графоаналитическим методом с использованием реальных вольт-амперных характеристик линейных и нелинейных элементов.

*Решение.* Изображаем нелинейные управляемые ВАХ транзистора, взятые из справочника, и опрокинутую линейную ВАХ коллекторного резистора (рис. 1.38). Последняя строится по двум точкам: холостого хода  $E_k = 9$  В и короткого замыкания  $I_{кз} = E_k/R_k = 9/70 = 0,128$  А. Точки пересечения ВАХ транзистора и опрокинутой ВАХ резистора позволяют определить значения тока коллектора и выходного напряжения.

Для  $I_б = 0,8$  мА находим точку пересечения характеристик  $P$ . Проекция этой точки на ось токов дает значение коллекторного тока  $I_{к0} = 72$  мА, а на ось напряжений — значение выходного напряжения  $U_{вых0} = 4,1$  В.

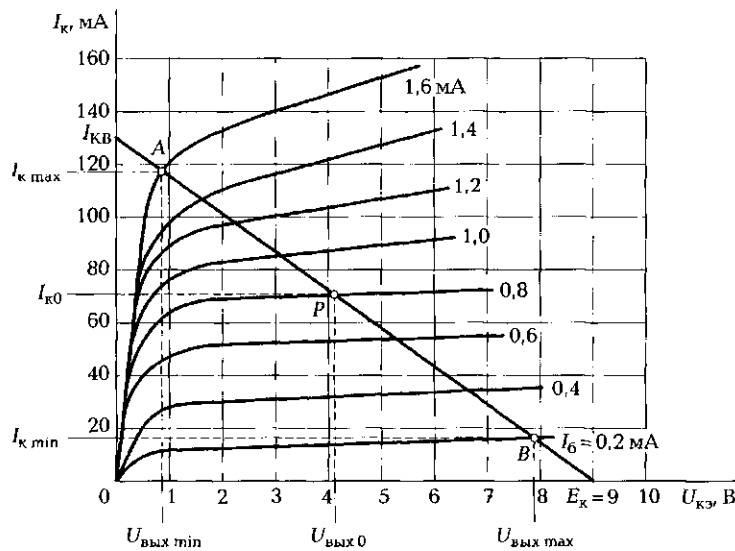


Рис. 1.38. Вольт-амперные характеристики транзистора и коллекторного резистора к задачам 1 и 8 подразд. 1.5

При поступлении на вход транзистора минимального значения сигнала  $u_c$ , соответствующего  $I_b = 0,2$  мА, ВАХ пересекаются в точке В. Проекции этой точки на оси токов и напряжений позволяют определить соответственно значения  $I_{k \min} = 17$  мА и  $U_{\text{вых max}} = 7,9$  В.

При поступлении на вход транзистора максимального значения сигнала  $u_c$ , соответствующего  $I_b = 1,6$  мА, ВАХ пересекаются в точке А. Проекции этой точки на оси токов и напряжений позволяют определить соответственно значения  $I_{k \max} = 118$  мА и  $U_{\text{вых min}} = 0,8$  В.

*Ответ.* При отсутствии входного сигнала ток коллектора равен 72 мА, а выходное напряжение составляет 4,1 В. При изменении входного сигнала в заданном диапазоне ток коллектора изменяется от 17 до 118 мА, а выходное напряжение — от 7,9 до 0,8 В.

2. Две лампы накаливания различной мощности, рассчитанные на напряжение 36 В, включены параллельно на напряжение 24 В (рис. 1.39, а). ВАХ обеих ламп известны. Каким будет показание амперметра при указанном напряжении и какой ток будет протекать через каждую лампу?

*Решение.* Изображаем в одной системе координат нелинейные ВАХ обеих ламп накаливания — кривые Л1 и Л2 на рис. 1.39, б.

Строим результирующую ВАХ ЭЦ, складывая при одном и том же значении напряжения значения токов, протекающих через лампы.

Проводим вертикальную линию для рабочего напряжения  $U_0 = 24$  В до пересечения с результирующей ВАХ. Проекция точки пересечения А на ось токов позволяет определить ток, потребляемый ЭЦ:  $I_0 = 98$  мА.

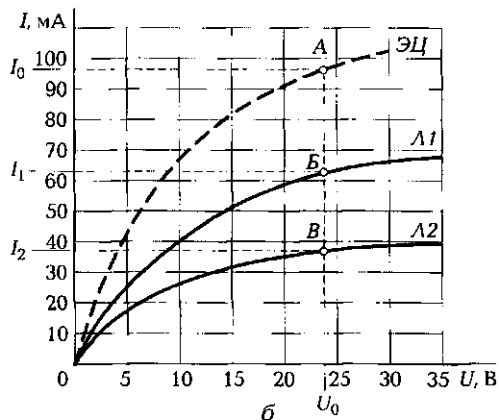
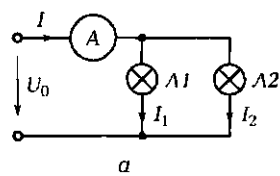


Рис. 1.39. Схема ЭЦ с параллельным включением нелинейных элементов (а) и ВАХ нелинейных элементов и ЭЦ (б) к задаче 2 подразд. 1.5

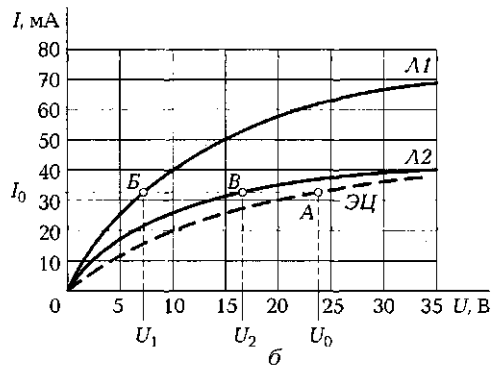
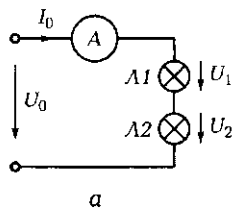


Рис. 1.40. Схема ЭЦ с последовательным включением нелинейных элементов (а) и ВАХ нелинейных элементов и ЭЦ (б) к задаче 3 подразд. 1.5

Проекции точек пересечения линии  $U_0 = 24$  В с ВАХ каждой лампы (точки  $B$  и  $B'$ ) на ось токов позволяют определить токи в ветвях:  $I_1 = 61$  мА;  $I_2 = 37$  мА.

*Ответ.* Амперметр при напряжении 24 В покажет потребляемый ЭЦ ток, равный 98 мА. Лампа  $L1$  потребляет ток, равный 61 мА, а лампа  $L2$  — 37 мА.

**3.** Лампы накаливания включены в ЭЦ последовательно на напряжение 24 В (рис. 1.40, а). ВАХ этих ламп изображены на рис. 1.40, б. Определите падение напряжений на каждой лампе и ток, потребляемый ЭЦ.

*Решение.* Строим результирующую ВАХ ЭЦ, складывая при одном и том же значении тока значения напряжений на каждой лампе.

Проводим вертикальную линию для рабочего напряжения  $U_0 = 24$  В до пересечения с результирующей ВАХ. Проекция точки пересечения  $A$  на ось токов позволяет определить ток, потребляемый ЭЦ:  $I_0 = 33$  мА.

Проекции точек пересечения линии  $I_0 = 33$  мА с ВАХ каждой лампы (точки  $B$  и  $B'$ ) на ось напряжений позволяют определить падение напряжений на каждой лампе:  $U_1 = 7,5$  В;  $U_2 = 16,5$  В.

*Ответ.* Амперметр при напряжении 24 В покажет потребляемый ЭЦ ток, равный 33 мА. Падение напряжения на лампе  $L1$  составляет 7,5 В, а на лампе  $L2$  — 16,5 В.

**4.** Назовите основные элементы ЭЦ постоянного тока, обладающие нелинейными ВАХ.

*Ответ.* Лампы накаливания, транзисторы, диоды, стабилитроны, тиристоры, варисторы, терморезисторы, фоторезисторы, т.е. элементы, у которых сопротивление зависит от температуры, освещенности или приложенного напряжения.

**5.** Прямое падение напряжения на диоде с идеальной ВАХ равно нулю, а на включенной последовательно с диодом нагрузке — 100 В.

Чему будет равно обратное напряжение на диоде и нагрузке, если поменять местами зажимы источника питания постоянного тока?

*Ответ.* В идеале диод пропускает ток в одном направлении и не пропускает в обратном. Следовательно, прямое сопротивление диода равно нулю, а обратное — бесконечности. Поскольку прямое падение напряжения на диоде равно нулю, то все напряжение источника питания оказывается приложенным к нагрузке. Обратное напряжение на диоде при смене полярности источника питания должно быть равно 100 В, т. е. напряжению источника питания. Напряжение на нагрузке в этом случае будет равно нулю.

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

6. Определите статическое и дифференциальное сопротивление нелинейного элемента в точке А его ВАХ, которая показана на рис. 1.41.

7. Каково соотношение между статическим и динамическим сопротивлениями для линейного элемента?

8. Используя выходные характеристики транзистора (см. рис. 1.38), постройте нагрузочную характеристику для  $E_k = 10$  В,  $R_k = 100$  Ом и определите ток коллектора и напряжение  $U_{кз}$  для тока базы  $I_b = 1,2$  мА.

9. Определите минимальное и максимальное выходное напряжение в ЭЦ, схема которой изображена на рис. 1.42, а, если входное напряжение  $U_{вх}$  может изменяться в диапазоне от 12 до 20 В. ВАХ стабилитрона Д и опрокинутая ВАХ резистора  $R_6$  показаны на рис. 1.42, б. Определите сопротивление резистора  $R_6$ .

10. Два диода КД206А включены на параллельную работу (рис. 1.43, а). ВАХ диодов (рис. 1.43, б) идентичны. Определите падение напряжения на диодах при общем токе  $I_0 = 6$  А.

11. Вычислите токи в ветвях и ток, потребляемый ЭЦ (рис. 1.44, а), при напряжении питания 16 В. ВАХ нелинейных элементов показаны на рис. 1.44, б.

12. Вычислите ток, потребляемый ЭЦ (рис. 1.45, а), и падение напряжения на нелинейных элементах при напряжении питания 25 В. ВАХ нелинейных элементов показаны на рис. 1.45, б.

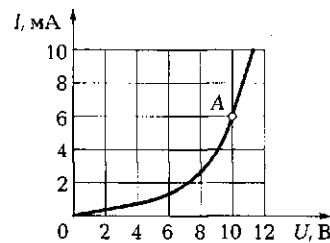


Рис. 1.41. Вольт-амперная характеристика нелинейного элемента к задаче 6 подразд. 1.5

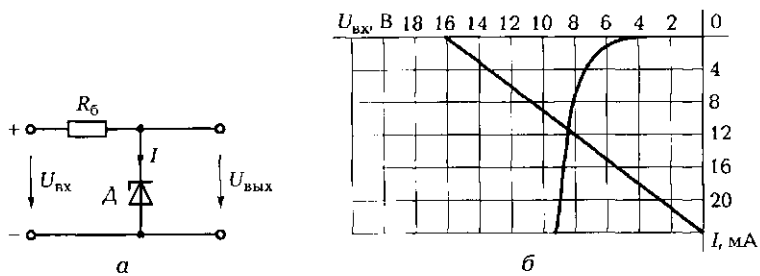


Рис. 1.42. Схема ЭЦ (а) и ВАХ нелинейного и линейного элементов (б) к задаче 9 подразд. 1.5

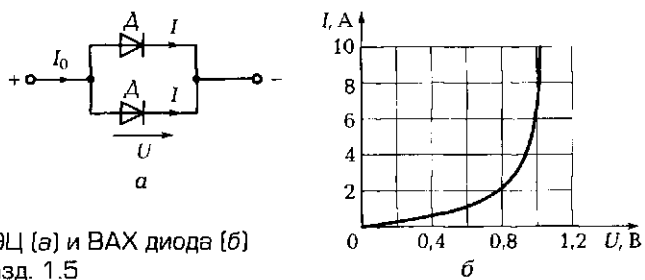


Рис. 1.43. Схема ЭЦ (а) и ВАХ диода (б) к задаче 10 подразд. 1.5

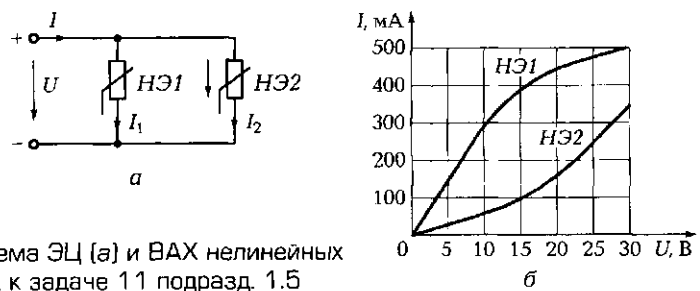


Рис. 1.44. Схема ЭЦ (а) и ВАХ нелинейных элементов (б) к задаче 11 подразд. 1.5

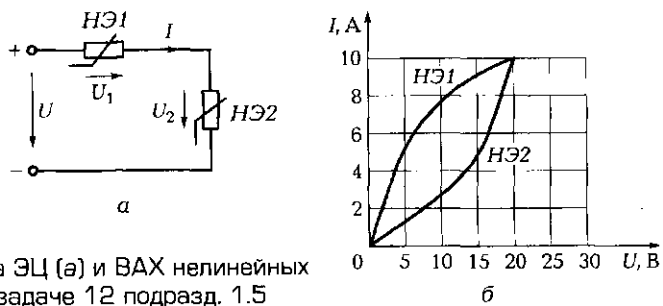


Рис. 1.45. Схема ЭЦ (а) и ВАХ нелинейных элементов (б) к задаче 12 подразд. 1.5

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Какого вида ВАХ диода:
  - а) симметричная;
  - б) несимметричная;
  - в) управляемая;
  - г) может быть любой из перечисленных?
2. Какой прибор обладает управляемой ВАХ:
  - а) лампа накаливания;
  - б) стабилитрон;
  - в) транзистор;
  - г) диод?
3. Чем пользуются при расчете нелинейных электрических цепей:
  - а) законом Ома;
  - б) законами Кирхгофа;
  - в) реальными ВАХ элементов электрической цепи;
  - г) всем перечисленным?
4. Что используют при построении результирующей ВАХ электрической цепи с последовательным включением нелинейных элементов:
  - а) закон Ома;
  - б) первый закон Кирхгофа;
  - в) второй закон Кирхгофа;
  - г) закон Джоуля — Ленца?
5. Что используют при построении результирующей ВАХ электрической цепи с параллельным включением нелинейных элементов:
  - а) закон Ома;
  - б) первый закон Кирхгофа;
  - в) второй закон Кирхгофа;
  - г) закон Джоуля — Ленца?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### Измерение напряжения, силы тока, мощности и сопротивления в электрических цепях постоянного тока

#### 1. Цель работы

- 1.1. Получить предварительные представления об измерительных приборах — амперметре, вольтметре, ваттметре и омметре.

1.2. Изучить следующие основные характеристики измерительных приборов: класс точности, номинальная величина, погрешности измерения.

1.3. Изучить методы измерений тока, напряжения, мощности и сопротивления с помощью электроизмерительных приборов.

## 2. Объект испытаний

Объектом испытаний служат многофункциональные измерительные приборы — мультиметры, ваттметр и элементы электрической цепи, установленные на наборном поле стенда (см. приложение 1).

## 3. Краткие теоретические сведения

*Измерение* — это определение истинного значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Приборы, используемые для измерения электрических величин (тока, напряжения, мощности, сопротивления, емкости и т. д.), называются *электроизмерительными приборами*.

*Амперметр* — это прибор, измеряющий силу тока и поэтому включаемый в ЭЦ последовательно с нагрузкой (рис. А1.1, а). Для исключения влияния прибора на режим работы цепи (силу тока) его внутреннее сопротивление должно быть ничтожно мало. Поэтому включение амперметра в цепь параллельно нагрузке вызовет протекание по нему значительного тока и выведет его из строя.

*Вольтметр* — это прибор, измеряющий напряжение (разность потенциалов) и поэтому включаемый в ЭЦ параллельно нагрузке (рис. А1.1, б). Для исключения влияния прибора на режим работы цепи его внутреннее сопротивление должно быть бесконечно большим, а потребляемый прибором ток — ничтожно малым. Поэтому разрешается измерять напряжение путем касания подключенными к вольтметру щупами соответствующих точек схемы ЭЦ.

*Ваттметр* — это прибор, измеряющий, активную мощность  $P$ , потребляемую ЭЦ или отдельными ее элементами. При постоян-

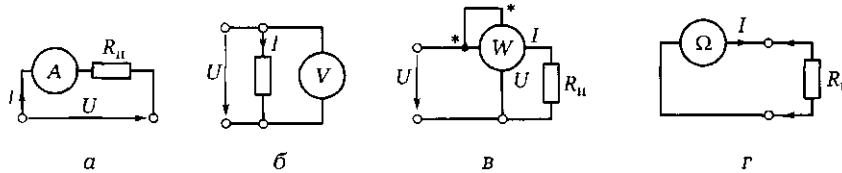


Рис. А1.1. Схемы включения электроизмерительных приборов:

а — амперметра; б — вольтметра; в — ваттметра; г — омметра



ном токе  $P = IU$ , поэтому ваттметр должен иметь токовую катушку, включаемую в схему, как и амперметр, т. е. последовательно с нагрузкой, и катушку напряжения, включаемую, как и вольтметр, параллельно нагрузке (рис. А1.1, в).

*Омметр* — это прибор, измеряющий электрическое сопротивление элементов, участков ЭЦ и ЭЦ в целом в обесточенном состоянии (при отключенных источниках питания ЭЦ). В основу действия прибора положено измерение силы тока в исследуемом резисторе, создаваемого эталонным источником ЭДС, находящимся внутри прибора (рис. А1.1, г).

**Измерение сопротивления в цепи с включенным источником питания недопустимо!**

Основные характеристики электроизмерительных приборов показаны в подразд. 5.1.2.

#### 4. Задание к лабораторной работе

4.1. Ознакомиться с порядком выполнения лабораторной работы № 1, краткими теоретическими сведениями по данной теме. Подготовить в рабочей тетради протокол испытаний.

4.2. Собрать ЭЦ в соответствии с рис. А1.2. Подключить один конец ЭЦ к зажиму источника регулируемого напряжения постоянного тока  $-13 \dots 13$  В, другой — к зажиму  $N$  трехфазного источника питания.

В качестве нагрузки использовать любой мини-блок резисторов с сопротивлением от 100 до 330 Ом. В качестве амперметра и вольтметра использовать мультиметры, установив на них режимы и диапазоны измерений соответственно постоянного тока и напряжения.

4.3. После проверки собранной ЭЦ преподавателем установить автоматы и выключатель УЗО в положение «Вкл.», подать с помощью выключателя «Сеть» напряжение на ЭЦ, мультиметры и ваттметр. При этом должны загореться соответствующие сигнальные лампы.

4.4. Установить на выходе источника питания напряжение  $U = 5$  В и снять показания амперметра и ваттметра. Измерить напряжение на нагрузке  $U_n$ . Данные измерений занести в табл. А1.1. Повторить измерения при напряжениях источника питания 10 и 13 В. Данные измерений занести в табл. А1.1.

*Примечание.* В процессе всех испытаний следить за сигнальными светодиодами ваттметра. При включении светодиодов « $I >$ » или « $U >$ » переключатель ваттметра необходимо перевести на больший предел, при включении « $I <$ » или « $U <$ » — на меньший.

4.5. После согласования результатов измерений с преподавателем отключить питание ЭЦ.

4.6. Измерить сопротивление резистора  $R_H$  с помощью мультиметра в режиме «Омметр». Результаты занести в табл. Л1.1.

4.7. Заполнить табл. Л1.2, занеся в нее основные характеристики используемых измерительных приборов.

4.8. Разобрать ЭЦ, провода и мини-блоки убрать на место, рабочее место привести в порядок.

### 5. Протокол испытаний и отчет о работе № 1

#### *Измерение напряжения, силы тока, мощности и сопротивления в электрических цепях постоянного тока*

5.1. Цель работы \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

5.2. Формулы и предварительные расчеты.

Закон Ома для участка цепи: \_\_\_\_\_

Формулы для определения мощности: \_\_\_\_\_

5.3. Схема электрической цепи и таблицы.

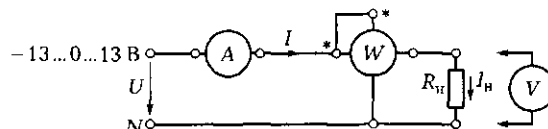


Рис. Л1.2. Схема ЭЦ для проверки основных параметров электроизмерительных приборов

Таблица Л1.1						
$U, В$	Измеренные значения				Вычисленные значения	
	$U_H, В$	$I, мА$	$P, мВт$	$R_H, Ом$	$P, мВт$	$R_H, Ом$
5						
10						
13						

**Таблица Л1.2**

Режим работы прибора	Тип прибора	Класс точности	Номинальная величина

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

**5.4. Расчетно-графическая часть.**

Формулы, используемые для обработки экспериментальных данных, занесенных в табл. Л1.1:

$$\Delta A = \gamma_{\text{пр}} A_{\text{ном}} / 100; \quad \gamma = 100 \Delta A / A_{\text{и}}$$

где  $A_{\text{и}}$  — измеренное значение.

**Таблица Л1.3**

Параметр	Вольтметр	Амперметр	Ваттметр	Омметр
Класс точности				
$\Delta A$				
$\gamma$ , %, при напряжении питания $U$ , В	5			
	10			
	13			

5.5. Краткие выводы \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

**6. Требования к расчетно-графической части отчета**

6.1. В соответствии с данными табл. Л1.1 вычислить значения сопротивления нагрузки и потребляемой ею мощности при различных

значениях напряжения питания  $U$ , данные занести в табл. А1.1 (два последних столбца). Сравнить рассчитанные значения с измеренными.

6.2. Зная класс точности измерительных приборов, вычислить абсолютную погрешность измерения  $\Delta A$  и относительную погрешность  $\gamma$  для трех значений напряжения питания. Результаты вычислений занести в табл. А1.3.

6.3. Сделать краткие выводы по результатам испытаний.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

---

1. Назовите основные характеристики электроизмерительных приборов.
2. Какой амперметр лучше: с малым или с большим внутренним сопротивлением?
3. Какой вольтметр лучше: с малым или с большим внутренним сопротивлением?
4. В чем различия при выполнении мультиметром измерений тока и напряжения?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2**

---

### **Испытания электрической цепи постоянного тока при последовательном соединении приемников электрической энергии**

#### **1. Цель работы**

1.1. Изучить методы измерения тока, напряжения, мощности и сопротивления в электрических цепях постоянного тока с последовательным соединением резисторов.

1.2. Проверить экспериментальным и расчетным путями закон Ома, второй закон Кирхгофа и закон сохранения энергии (баланс мощностей).

#### **2. Объект и средства испытаний**

Объектом испытаний служит электрическая цепь, содержащая три последовательно включенных резистора (мини-блока) сопротивлениями от 22 до 220 Ом, установленных на наборном поле стенда. Последовательно с каждым резистором включены специальные мини-блоки для измерения токов мультиметром, снабженным специальным двухжильным кабелем со штекерами.

В качестве измерительных приборов используются мультиметры, работающие в режимах амперметра, вольтметра и омметра, а также электронный ваттметр.

Питание электрической цепи осуществляется от источника постоянного напряжения +15 В.

### **3. Задание к лабораторной работе**

#### ***Выполняется при подготовке к работе***

3.1. Ознакомиться с порядком выполнения лабораторной работы № 2, теоретическими сведениями по данной теме. Оформить в рабочей тетради протокол испытаний.

3.2. Записать в протоколе испытаний применительно к ЭЦ, показанной на рис. А2.1, выражение для закона Ома, второго закона Кирхгофа и баланса мощностей.

#### ***Выполняется в лаборатории***

3.3. Собрать ЭЦ в соответствии с рис. А2.1, установив мини-блоки с сопротивлениями в диапазоне 33...100 Ом. Подключить один конец ЭЦ к зажиму источника постоянного напряжения +15 В, другой — к зажиму  $N$  трехфазного источника питания.

После проверки собранной ЭЦ преподавателем установить автоматы и выключатель УЗО в положение «Вкл.». Подать с помощью выключателя «Сеть» напряжение на мультиметры и ваттметр. При этом должны загореться соответствующие сигнальные лампы.

Измерить сопротивление каждого резистора и всей ЭЦ в целом ( $R_{\text{экв}}$ ) с помощью мультиметра, работающего в режиме «Омметр». Данные занести в табл. А2.1.

3.4. Подать с помощью выключателя «Сеть» напряжение на ЭЦ и измерить падения напряжения на резисторах ( $U_1, U_2, U_3$ ) и на входе ЭЦ ( $U_0$ ). Данные занести в табл. А2.1. Занести в табл. А2.1 показания амперметров в указанных точках ЭЦ. Измерить с помощью ваттметра мощности, потребляемые каждым резистором и всей цепью. Для этого выводы ваттметра, промаркированные  $U-U^*$ , поочередно подключать параллельно каждому резистору, предварительно убрав переключку  $\cdot - \cdot$ . Результаты занести в табл. А2.1.

3.5. Заполнить табл. А2.2, занеся в нее основные характеристики измерительных приборов, используемых в процессе выполнения работы.

3.6. После согласования протокола испытаний с преподавателем ЭЦ обесточить и разобрать, проводники и мини-блоки убрать на место, рабочее место привести в порядок.

#### 4. Протокол испытаний и отчет о работе № 2

##### Испытания электрической цепи постоянного тока при последовательном соединении приемников электрической энергии

4.1. Цель работы \_\_\_\_\_

---



---



---



---

4.2. Формулы и предварительные расчеты.

Закон Ома для участка цепи:

$$R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$R_3 = \underline{\hspace{2cm}}$$

Второй закон Кирхгофа: \_\_\_\_\_

Баланс мощностей: \_\_\_\_\_

4.3. Схема электрической цепи и таблицы.

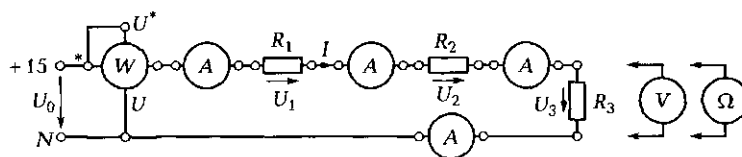


Рис. Л2.1. Схема ЭЦ для проверки второго закона Кирхгофа

Таблица Л2.1				
Параметр	Участок ЭЦ			
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_{\text{жв}}$
$R$ , Ом				
$U$ , В				
$I$ , мА				
$P$ , мВт				

Таблица Л2.2			
Режим работы прибора	Тип прибора	Класс точности	Номинальная величина

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_  
 Преподаватель \_\_\_\_\_

#### 4.4. Расчетно-графическая часть.

Таблица Л2.3				
Параметр	Участок ЭЦ			
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_{\text{экв}}$
$I$ , мА				
$P$ , мВт				

#### 4.5. Краткие выводы \_\_\_\_\_

---



---



---



---

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

### 5. Требования к расчетно-графической части отчета

5.1. Пользуясь полученными в результате измерений значениями  $R$  и  $U$  (первая и вторая строки табл. Л2.1), вычислить значения тока  $I$  и мощности  $P$  на каждом участке ЭЦ. Данные занести в табл. Л2.3. Сравнить значения параметров ЭЦ, полученные экспериментальным (третья и четвертая строки табл. Л2.1) и расчетным (см. табл. Л2.3) путем.

5.2. Проверить закон сохранения энергии, вычислив мощность, отдаваемую источником питания и потребляемую всей ЭЦ.

5.3. Сделать краткие выводы по работе.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

---

1. Что такое сила электрического тока?
2. Какой ток называется постоянным?
3. В каких единицах измеряются сила тока, напряжение, мощность, сопротивление?
4. Какими параметрами определяется сопротивление проводника?
5. Почему розетки и вилки электрических приборов могут нагреваться во время работы?
6. Что называется электрической цепью?
7. Приведите пример последовательного включения приемников электрической энергии.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3**

---

### **Испытания электрической цепи постоянного тока при смешанном соединении приемников электрической энергии**

#### **1. Цель работы**

1.1. Изучить методы измерения электрического тока, напряжения, мощности и сопротивления в электрических сетях постоянного тока с последовательным, параллельным и смешанным соединением резисторов.

1.2. Проверить экспериментальным и расчетным путем закон Ома, первый и второй законы Кирхгофа и закон сохранения энергии (баланс мощностей).

#### **2. Объект и средства испытаний**

Объектом испытаний служит электрическая цепь, содержащая четыре резистора (мини-блока) с сопротивлениями от 22 до 220 Ом, соединенных последовательно-параллельно (смешанно) и установленных на наборном поле стенда. Последовательно с каждым резистором включены специальные мини-блоки для измерения токов мультиметром, снабженным специальным двухжильным кабелем со штекерами.

В качестве измерительных приборов используются мультиметры, работающие в режимах амперметра, вольтметра и омметра, а также электронный ваттметр.

Питание электрической цепи осуществляется от источника постоянного напряжения +15 В.



### 3. Задание к лабораторной работе

#### *Выполняется при подготовке к работе*

3.1. Ознакомиться с порядком выполнения лабораторной работы № 3, теоретическими сведениями по данной теме. Оформить в рабочей тетради протокол испытаний.

3.2. Записать в протоколе испытаний применительно к ЭЦ рис. Л3.1 выражение для закона Ома, первого и второго закона Кирхгофа, баланса мощностей.

#### *Выполняется в лаборатории*

3.3. Собрать ЭЦ в соответствии с рис. Л3.1, установив мини-блоки с сопротивлениями в диапазоне 33 ... 100 Ом и включив в каждую ветвь мини-блок для подключения амперметра. Подключить один конец ЭЦ к зажиму источника постоянного напряжения + 15 В, другой — к зажиму  $N$  трехфазного источника питания.

После проверки собранной ЭЦ преподавателем установить автоматы и выключатель УЗО в положение «Вкл.». Подать с помощью выключателя «Сеть» напряжение на мультиметры и ваттметр. При этом должны загореться соответствующие сигнальные лампы.

Измерить сопротивление каждого резистора, извлекая их по очереди из схемы, и всей ЭЦ в целом ( $R_{\Sigma}$ ) с помощью мультиметра, работающего в режиме «Омметр». Данные занести в табл. Л3.1.

3.4. Подать с помощью выключателя «Сеть» напряжение на ЭЦ и измерить падения напряжения на резисторах ( $U_1, U_2, U_3, U_4$ ) и на входе ЭЦ ( $U_0$ ). Данные занести в табл. Л3.1. Занести в табл. Л3.1 показания амперметра в каждой ветви ЭЦ. Измерить с помощью ваттметра мощность, потребляемую всей цепью. Результаты занести в табл. Л3.1.

3.5. Заполнить табл. Л3.2, занеся в нее основные характеристики измерительных приборов, используемых в процессе выполнения работы.

3.6. После согласования протокола испытаний с преподавателем ЭЦ обесточить и разобрать, проводники и мини-блоки убрать на место, рабочее место привести в порядок.

### 4. Протокол испытаний и отчет о работе № 3

#### *Испытания электрической цепи постоянного тока при смешанном соединении приемников электрической энергии*

4.1. Цель работы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

4.2. Формулы и предварительные расчеты.

Закон Ома: \_\_\_\_\_

Первый закон Кирхгофа: \_\_\_\_\_

Второй закон Кирхгофа: \_\_\_\_\_

Баланс мощностей: \_\_\_\_\_

4.3. Схема электрической цепи.

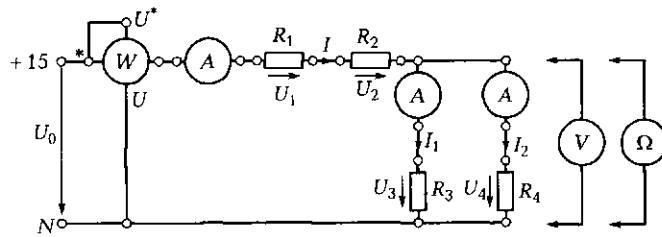


Рис. ЛЗ.1. Схема ЭЦ для проверки первого и второго законов Кирхгофа и закона сохранения энергии

Таблица ЛЗ.1					
Параметр	Участок ЭЦ				
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_{э\text{кв}}$
$R$ , Ом					
$U$ , В					
$I$ , мА					
$P$ , мВт					

Таблица ЛЗ.2			
Наименование прибора	Тип прибора	Класс точности	Номинальная величина

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

#### 4.4. Расчетно-графическая часть.

Таблица ЛЗ.3					
Параметр	Участок ЭЦ				
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_{\text{экв}}$
$I$ , мА					
$P$ , мВт					

#### 4.5. Краткие выводы

---

---

---

---

---

---

---

---

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

### 5. Требования к расчетно-графической части

5.1. Пользуясь полученными в результате измерений значениями  $R$  и  $U$  (первая и вторая строки табл. ЛЗ.1), вычислить значения токов  $I$  и мощностей  $P$  на каждом участке ЭЦ и мощность, потребляемую всей цепью. Данные занести в табл. ЛЗ.3. Сравнить значения параметров ЭЦ, полученные экспериментальным (третья и четвертая строки табл. ЛЗ.1) и расчетным (см. табл. ЛЗ.3) путем.

5.2. Проверить закон сохранения энергии, вычислив мощность, отдаваемую источником и потребляемую всей ЭЦ.

5.3. Сделать краткие выводы по работе.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется электрической цепью?
2. Назовите основные элементы ЭЦ.
3. Какие вспомогательные элементы могут входить в состав ЭЦ?
4. Укажите назначение и основные характеристики амперметра, вольтметра и ваттметра.
5. Назовите основные способы измерения сопротивлений.
6. На чем основано измерение сопротивления омметром?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### Испытания нелинейных электрических цепей постоянного тока

#### 1. Цель работы

- 1.1. Познакомиться с видами вольт-амперных характеристик (ВАХ).
- 1.2. Исследовать ВАХ нелинейных элементов.
- 1.3. Освоить графоаналитические методы расчета нелинейных цепей.

#### 2. Объект и средства испытаний

Объектом испытаний служит электрическая цепь, содержащая различные сочетания нелинейных и линейных элементов и питаемая источником постоянного напряжения.

Все элементы в виде мини-блоков устанавливаются на наборном поле стежда и включаются в цепь с помощью контактных гнезд и проводников со штекерами. Для измерения тока и напряжения используются мультиметры.

*Симметричные ВАХ* обеспечиваются двумя параллельно включенными лампочками (рис. Л4.1).

*Несимметричная постоянная ВАХ* обеспечивается последовательным включением стабилитрона  $\Delta$  и резистора  $R_{отр}$  (рис. Л4.2).

*Семейство управляемых ВАХ* может быть получено с помощью транзистора  $T$ , у которого ток коллектора  $I_k$  зависит не только от напряжения на коллекторе  $U_k$ , но и от тока базы  $I_b$  (рис. Л4.4).

#### 3. Задание к лабораторной работе

##### *Выполняется при подготовке к работе*

3.1. Ознакомиться с порядком выполнения лабораторной работы № 4, теоретическими сведениями по данной теме. Подготовить в рабочей тетради протокол испытаний.

3.2. Вычислить сопротивление лампочки в рабочем состоянии, если ее номинальное напряжение 24 В, а мощность 3 Вт. Результаты вычислений привести в протоколе испытаний.

##### *Выполняется в лаборатории*

3.3. Собрать ЭЦ с электрическими лампочками в соответствии с рис. Л4.1, подключить ее к регулируемому источнику постоянного

напряжения, соединив один конец ЭЦ с зажимом источника +13 В, а другой — с зажимом N трехфазного источника питания.

3.4. Снять ВАХ двух параллельно соединенных лампочек Л1 и Л2 при положительных значениях напряжения, а затем при отрицательных. Для этого, устанавливая поочередно указанные в табл. Л4.1 значения напряжения, снять показания амперметра. Данные занести в соответствующие строки табл. Л4.1.

3.5. Собрать ЭЦ со стабилитроном Д и резистором  $R_{\text{огр}} = 100 \text{ Ом}$  в соответствии с рис. Л4.2, снять ВАХ при положительных и отрицательных значениях напряжения. Данные занести в табл. Л4.2.

3.6. Снять ВАХ резистора  $R_{\text{огр}}$  (рис. Л4.3). Данные занести в табл. Л4.3.

3.7. Собрать ЭЦ в соответствии с рис. Л4.4, установив  $R_x = 220 \text{ Ом}$  и  $R_6 = 10 \text{ кОм}$ , переменный резистор  $R = 1 \text{ Ом}$  и транзистор. Снять ВАХ транзистора Т, изменяя напряжение на коллекторе транзистора в соответствии со значениями табл. Л4.4. Измерения выполнять для трех фиксированных значений тока базы ( $I_{61} = 0,1 \text{ мА}$ ,  $I_{62} = 0,2 \text{ мА}$ ,  $I_{63} = 0,25 \text{ мА}$ ). Данные занести в табл. Л4.4.

3.7. После согласования протокола испытаний с преподавателем ЭЦ обесточить и разобрать, проводники и мини-блоки убрать на место, рабочее место привести в порядок.

#### 4. Протокол испытаний и отчет о работе № 4

##### *Испытания нелинейных электрических цепей постоянного тока*

4.1. Цель работы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

4.2. Формулы и предварительные расчеты.

Сопротивление лампы в рабочем состоянии  $R_\lambda =$  \_\_\_\_\_

4.3. Схемы электрических цепей и таблицы.

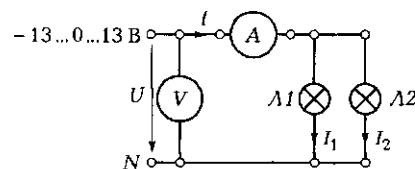


Рис. Л4.1. Схема ЭЦ для снятия ВАХ ламп накаливания

Таблица П4.1						
$U, В$	0	1	2	5	10	13
$I, мА$						
$I, мА$						

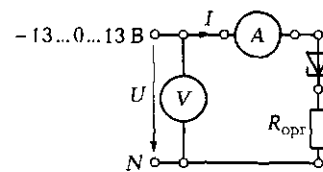


Рис. П4.2. Схема ЭЦ для снятия ВАХ стабилитрона

Таблица П4.2						
$\pm U, В$	0	1	2	5	10	13
$I, мА$						
$I, мА$						

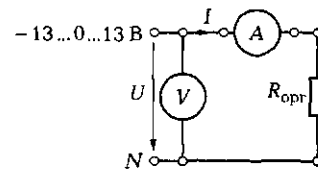


Рис. П4.3. Схема ЭЦ для снятия ВАХ резистора

Таблица П4.3						
$\pm U, В$	0	1	2	5	10	13
$I, мА$						
$-I, мА$						

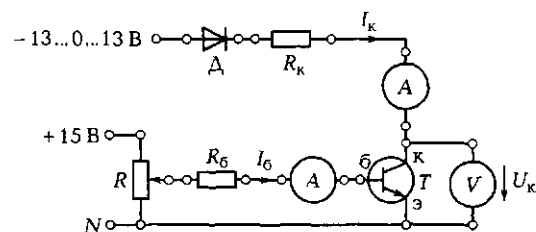


Рис. П4.4. Схема ЭЦ для снятия ВАХ транзистора

Таблица Л4.4							
$+U, В$		0	1	2	5	10	13
$I_{к}, мА,$ при токе базы	$I_{б1}$						
	$I_{б2}$						—
	$I_{б3}$					—	—

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_  
 Преподаватель \_\_\_\_\_

4.4. Расчетно-графическая часть.

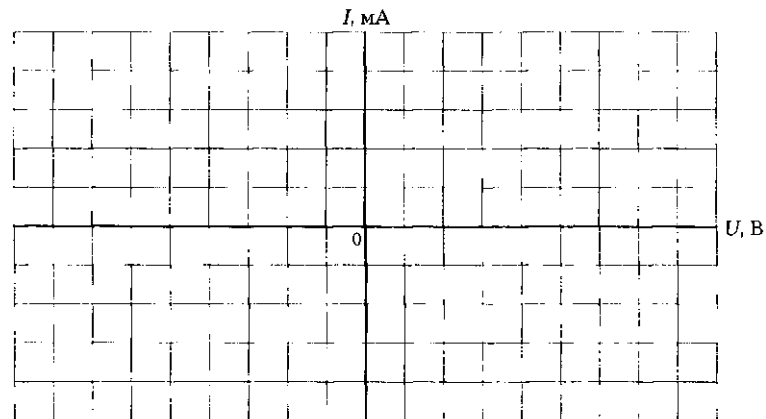


Рис. Л4.5. ВАХ лампы накаливания, стабилитрона и резистора

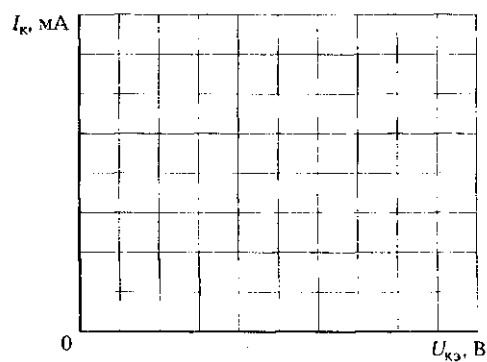


Рис. Л4.6. ВАХ транзистора

Таблица Л4.5									
$I, \text{мА}$	80	60	40	20	0	-20	-40	-60	-80
$R_n, \text{Ом}$									
$R_{орп}, \text{Ом}$									

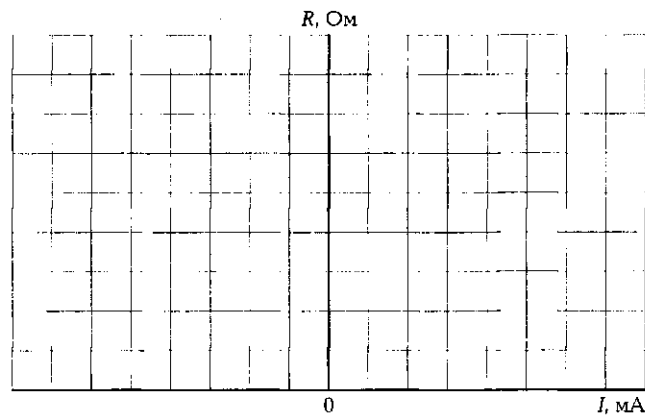


Рис. Л4.7. Зависимость сопротивления лампы накаливания ( $R_n$ ) и резистора ( $R_{орп}$ ) от тока

4.5. Краткие выводы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

### 5. Требования к расчетно-графической части отчета

5.1. В соответствии с данными табл. Л4.1, Л4.2, Л4.3 построить на рис. Л4.5 в одной системе координат зависимости  $I(U)$ .

5.2. Вычислить и построить там же ВАХ одной лампочки и стабилизатора.

5.3. В соответствии с данными табл. Л4.4 построить на рис. Л4.6 ВАХ транзистора  $I_k(U)$  при  $I_0 = \text{const}$ .

5.4. **Дополнительное задание.** Вычислить при различных значениях тока (первая строка табл. Л4.5) статические сопротивления



ния лампы ( $R_\lambda$ ) и резистора ( $R_{огр}$ ). Данные занести соответственно во вторую и третью строки табл. Л4.5. По результатам вычислений построить на рис. Л4.7 зависимости  $R(I)$  для лампы и резистора.

5.5. Сделать краткие выводы по результатам испытаний.

#### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

---

1. Какая зависимость определяет деление ЭЦ на линейные и нелинейные?
2. Как изменяется сопротивление лампы накаливания при изменении подводимого к ней напряжения?
3. Почему наиболее опасным для электрической лампы является режим включения?
4. Назовите основные виды ВАХ нелинейных элементов.
5. Укажите основные методы анализа нелинейных электрических цепей.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

## 2.1. ПОНЯТИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ. ПОНЯТИЕ ЕМКОСТНОГО И ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЙ

### ТЕОРИЯ

#### 2.1.1. Основные понятия и определения

Цепи с периодически изменяющимся во времени током называются *электрическими цепями переменного тока*.

Наибольшее промышленное применение получили цепи синусоидального тока, величина которого изменяется по закону синуса. Это обусловлено достаточно простым способом получения синусоидального тока, а также более высоким КПД генераторов, двигателей, трансформаторов, линий передач при работе на синусоидальном токе по сравнению с несинусоидальным.

Если поместить рамку в равномерное магнитное поле (рис. 2.1, а) и вращать ее с частотой  $\omega$ , то в ней в соответствии с законом электромагнитной индукции будет наводиться переменная ЭДС (рис. 2.1, б)

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi),$$

где  $e$  — мгновенное значение ЭДС, В;  $E_m$  — амплитудное значение ЭДС, В;  $\omega$  — угловая частота, рад/с (радиан в секунду);  $\psi$  — начальная фаза, определяющая значение  $e$  при  $t = 0$ , рад;  $(\omega t + \psi)$  — текущее значение фазы, рад.

При этом угловая частота  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ , где  $f$  — линейная частота, Гц;  $T$  — период колебаний, с.

Расчет цепей с использованием мгновенных значений синусоидальных ЭДС, токов и напряжений достаточно сложен, поэто-

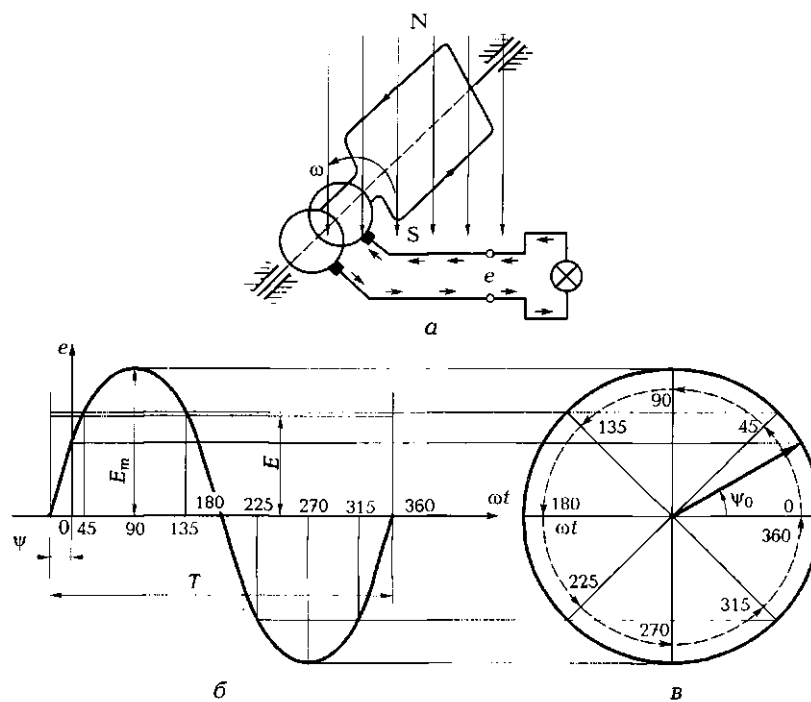


Рис. 2.1. Способ получения синусоидальной ЭДС (а), ее временная (б) и векторная (в) диаграммы

му мгновенные значения заменяют действующими значениями. На рис. 2.1, б  $E$  — действующее значение ЭДС, В.

➤ **Действующее значение переменного тока  $I$**  — это неизменное во времени значение такого тока, при протекании которого в сопротивлении  $R$  выделяется за период столько же теплоты, как и при протекании реального синусоидального тока  $i = I_m \sin \omega t$ .

Если синусоидальный ток  $i$  нагревает проводник, например, до температуры  $100^\circ\text{C}$ , то постоянный ток, значение которого равно амплитуде синусоидального ( $I = I_m$ ), нагреет тот же проводник сильнее. Чтобы нагреть проводник постоянным током до тех же  $100^\circ\text{C}$ , необходимо значение тока уменьшить до

$$I = I_m / \sqrt{2} = 0,707 I_m.$$

Шкалы измерительных приборов переменного тока отградуированы в действующих значениях тока и напряжения. Вольтметр,

включенный в розетку промышленной сети, покажет напряжение 220 В. Это действующее значение синусоидального напряжения, амплитудное значение которого равно  $220\sqrt{2} = 311$  В.

При расчете выпрямительных устройств пользуются средними значениями тока, ЭДС и напряжения. При этом соотношение между средним и амплитудным значениями определяется выражением  $I_{cp} = 2I_m/\pi$ .

Отношение действующего значения к среднему называется коэффициентом формы кривой. Для синусоиды:

$$\frac{I}{I_{cp}} = \frac{I_m/\sqrt{2}}{2I_m/\pi} = 1,11.$$

Именно в 1,11 раза показания прибора магнитоэлектрической системы с выпрямителем будут ниже показаний прибора электромагнитной системы.

☞ Таким образом, в ЭЦ переменного тока следует различать:

- мгновенные значения ЭДС, напряжения, тока и мощности  $e, u, i, p$ ;
- амплитудные значения  $E_m, U_m, I_m, P_m$ ;
- действующие значения  $E, U, I, P$ .

☞ Основными параметрами синусоидальных колебаний принято считать:

- амплитуду  $A_m$ ;
- частоту  $f$  или период  $T = 1/f$ ;
- начальную фазу  $\psi$ .

В линейных цепях синусоидальная ЭДС создает синусоидальный ток как в ветви с активным сопротивлением, так и в ветвях с емкостью и индуктивностью. Однако в отличие от ЭЦ постоянного тока в ЭЦ переменного тока на отдельных участках напряжение и ток могут не совпадать по фазе, т.е. их начальные фазы  $\psi_U$  и  $\psi_I$  не равны. Следовательно, между ними появляется фазовый сдвиг  $\varphi = \psi_U - \psi_I$ . Это объясняется наличием в ЭЦ конденсаторов и катушек индуктивностей с реактивным сопротивлением, обладающим свойством инерционности.

### 2.1.2. Векторные диаграммы

☞ Поскольку синусоидальная функция определяется амплитудой и начальной фазой, то она может быть изображена в виде вектора, длина которого пропорциональна амплитуде, а полярный угол — начальной фазе (рис. 2.1, в).

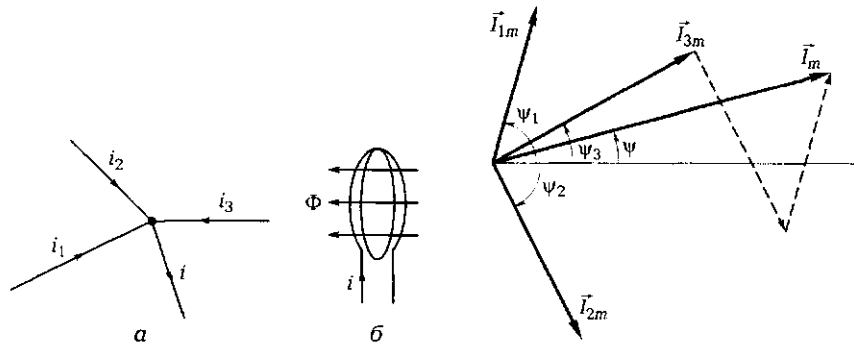


Рис. 2.2. Узел ЭЦ (а) и контур с током (б)

Рис. 2.3. Векторная диаграмма токов

Введение векторов и векторных диаграмм значительно упрощает расчеты ЭЦ переменного тока.

Например, если заданы токи в узле ЭЦ (рис. 2.2, а)

$$i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1),$$

$$i_2 = I_{2m} \sin(\omega t - \psi_2),$$

$$i_3 = I_{3m} \sin(\omega t + \psi_3),$$

то в соответствии с первым законом Кирхгофа результирующий ток  $i = i_1 + i_2 + i_3$ .

Сложить мгновенные значения синусоидальных токов практически невозможно, поэтому прибегают к помощи векторов. Складывая векторы, изображенные в определенном масштабе, по правилу параллелограмма или топографическим методом (из конца одного вектора откладывается начало другого и т. д.), определяют суммарный вектор тока, а значит, амплитудное значение тока  $I_m$  и его начальную фазу  $\psi$  (рис. 2.3). Мгновенное значение результирующего тока в этом случае  $i = I_m \sin(\omega t + \psi)$ , а действующее значение тока  $I = I_m / \sqrt{2}$ .

### 2.1.3. Емкость

☛ Два проводника, разделенные любым диэлектриком (воздух, слюда, бумага, керамика и др.), образуют электрический конденсатор (рис. 2.4, а). Он обладает свойством накапливать и удерживать на проводниках (обкладках) равные по величине и противоположные по знаку электрические заряды.

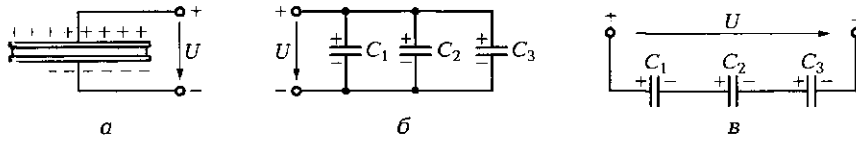


Рис. 2.4. Конденсатор (а); параллельное (б) и последовательное (в) соединения нескольких конденсаторов

Отношение заряда  $q$  одной из обкладок к напряжению  $U$  между обкладками представляет собой постоянную величину, называемую емкостью конденсатора:

$$C = \frac{q}{U}.$$

Емкость измеряют в фарадах (Ф). Один фарад — это емкость конденсатора, заряд которого равен 1 Кл при напряжении между обкладками 1 В. Емкость 1 Ф чрезвычайно велика (емкость земного шара равна 6 Ф), поэтому на практике пользуются дольными единицами измерения: микрофарад (1 мкФ =  $10^{-6}$  Ф), нанофарад (1 нФ =  $10^{-9}$  Ф) и пикофарад (1 пФ =  $10^{-12}$  Ф).

Емкость конденсатора определяется его размерами, формой и относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  материала, помещенного между обкладками. Для плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d},$$

где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная (абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума), равная  $8,86 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $S$  — площадь обкладки;  $d$  — расстояние между обкладками.

Для повышения емкости конденсатора используют материалы с большой относительной диэлектрической проницаемостью. У отдельных видов керамики  $\epsilon$  достигает нескольких тысяч, например у титаната бария ( $\text{BaTiO}_3$ ) она равна 5 000.

При необходимости увеличения емкости можно воспользоваться *параллельным* соединением нескольких конденсаторов (рис. 2.4, б). При таком соединении как бы увеличивается площадь обкладок и общая емкость равна сумме емкостей каждого конденсатора:

$$C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + C_3.$$

В случае *последовательного* соединения конденсаторов (рис. 2.4, в) их общая емкость уменьшается. Она может быть вычислена по формуле

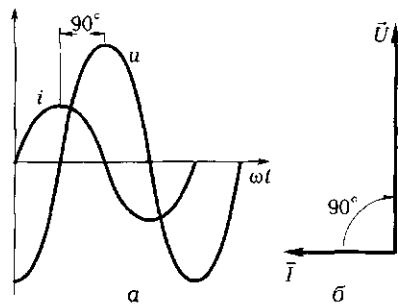


Рис. 2.5. Временная (а) и векторная (б) диаграммы для ЭЦ с конденсатором

$$C_{\text{общ}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

Поскольку конденсатор представляет собой два проводника, разделенных диэлектриком, то постоянный ток через него протекать не может. Сопротивление конденсатора бесконечно большое.

Если к зажимам конденсатора подвести синусоидальное напряжение

$$u = U_m \sin \omega t,$$

то заряд конденсатора будет изменяться синусоидально:

$$q = Cu = CU_m \sin \omega t.$$

Поскольку электрический ток — это скорость изменения заряда, то

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = C \frac{\Delta u}{\Delta t} = CU_m \frac{\Delta(\sin \omega t)}{\Delta t} = \omega CU_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Таким образом, ток в электрической цепи с конденсатором изменяется синусоидально, опережая напряжение по фазе на угол  $\varphi$ , равный  $90^\circ$  (рис. 2.5). Принято считать, что векторы вращаются против часовой стрелки, поэтому направление угла  $\varphi$  отсчитывается от вектора тока к вектору напряжения.

Учитывая, что  $I_m = \omega CU_m = U_m / (1/(\omega C))$ , можно записать выражение для емкостного сопротивления.

$$X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Это сопротивление, обратно пропорциональное частоте приложенного напряжения и емкости ЭЦ, получило название *реактивного емкостного сопротивления*. Как и активное сопротивление, оно измеряется в омах (Ом).

Электрическая энергия, которую запасает конденсатор,

$$W_C = \frac{CU^2}{2}.$$

## 2.1.4. Индуктивность

Синусоидальный ток  $i = I_m \sin \omega t$  создает в контуре, по которому он протекает, синусоидальный магнитный поток  $\Phi$  (рис. 2.2, б).

Этот магнитный поток прямо пропорционален току, т. е.

$$\Phi = Li,$$

где  $L$  — коэффициент пропорциональности между магнитным потоком и током.

Данный коэффициент называют *индуктивностью*, или *коэффициентом самоиндукции*. Индуктивность измеряют в генри (Гн). Она зависит от размеров и формы контура, а также от свойств окружающей среды (магнитной проницаемости  $\mu$ ). Для катушки

$$L = \mu_0 \mu \frac{w^2 S}{l},$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная (магнитная проницаемость воздуха);  $w$ ,  $S$ ,  $l$  — соответственно число витков, площадь поперечного сечения,  $m^2$ , и длина, м, катушки.

Созданный магнитный поток, пересекая контур, наводит в нем в соответствии с законом электромагнитной индукции ЭДС самоиндукции  $e_L$ , которая равна скорости изменения магнитного потока.

Эта ЭДС уравновешивает приложенное напряжение  $u$  и направлена навстречу ему:

$$e_L = -u.$$

Тогда

$$u = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = L \frac{\Delta i}{\Delta t} = L \frac{\Delta(I_m \sin \omega t)}{\Delta t} = \omega L I_m \cos \omega t = U_m \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Таким образом, напряжение в электрической цепи с катушкой индуктивности изменяется синусоидально, опережая ток по фазе на  $90^\circ$  (рис. 2.6). Для удобства запоминания: ток как бы «запутался» в витках катушки и пришел ко второму ее выводу позже.

Учитывая, что  $U_m = \omega L I_m$ , можно записать выражение для индуктивного сопротивления:

$$X_L = \omega L.$$

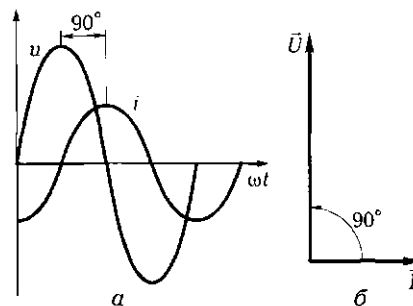


Рис. 2.6. Временная (а) и векторная (б) диаграммы для ЭЦ с катушкой индуктивности



Это сопротивление, прямо пропорциональное частоте приложенного напряжения и индуктивности ЭЦ, получило название *реактивного индуктивного* сопротивления. Оно измеряется в омах.

Магнитная энергия, которую запасает катушка индуктивности при протекании электрического тока,

$$W_L = \frac{LI^2}{2}.$$

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. В узел *a* (рис. 2.7, *a*) втекают три синусоидальных тока одинаковой частоты, один ток из узла вытекает. Известны мгновенные значения втекающих токов:  $i_1 = 2 \sin(\omega t + 30^\circ)$ ;  $i_2 = 2,7 \sin(\omega t - 45^\circ)$ ;  $i_3 = 3,3 \sin(\omega t + 110^\circ)$ . Определите мгновенное значение вытекающего тока  $i$  и показания амперметра электромагнитной системы. Расчет выполните с помощью векторной диаграммы.

*Решение.* В соответствии с первым законом Кирхгофа для узла *a* можно записать:  $i = i_1 + i_2 + i_3$  или применительно к векторам:  $\vec{I}_m = \vec{I}_{1m} + \vec{I}_{2m} + \vec{I}_{3m}$ .

Расчет выполняем следующим образом.

Выбираем масштаб токов  $m_I = 0,1 \text{ А/мм}$ .

Строим векторную диаграмму токов, откладывая в выбранном масштабе векторы под соответствующими углами относительно горизонтальной оси (рис. 2.7, *б*).

Соединив начало первого вектора с концом последнего, получаем результирующий вектор  $\vec{I}_m$ . Определяем его длину (31 мм), пропорциональную амплитудному значению результирующего тока, и полярный угол ( $40^\circ$ ) — угол сдвига фаз между током и напряжением. Записываем выражение для мгновенного значения вытекающего тока:

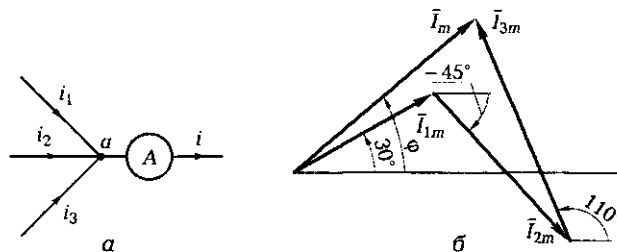


Рис. 2.7. Узел ЭЦ (*a*) и векторная диаграмма токов (*б*) к задаче 1 подразд. 2.1

$$i = m_i \cdot 31 \sin(\omega t + 40^\circ) = 0,1 \cdot 31 \sin(\omega t + 40^\circ) = 3,1 \sin(\omega t + 40^\circ).$$

Амперметр, включенный в ветвь с вытекающим током  $i$ , покажет действующее значение тока  $I = I_m / \sqrt{2} = 2,2$  А.

*Ответ.* Мгновенное значение вытекающего тока  $i = 3,1 \sin(\omega t + 40^\circ)$ ; амперметр покажет действующее значение тока  $I = 2,2$  А.

2. Одинаковы ли действующие значения токов, формы которых показаны на рис. 2.8, а и б?

*Ответ.* Нет, не одинаковы. Синусоидальный ток в течение периода в каждый момент времени по-разному нагревает проводник, прямоугольный — одинаково. Следовательно, нагрев проводника прямоугольным током будет больше (в  $\sqrt{2}$  раз), чем синусоидальным.

3. Одинаковы ли действующие значения двух синусоидальных токов с одинаковой амплитудой, но разной частотой?

*Ответ.* Одинаковы, поскольку действующее значение тока  $I = I_m / \sqrt{2}$ , где  $I_m$  — амплитудное значение тока. В нашем случае амплитудные значения обоих токов равны.

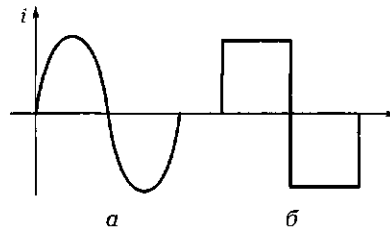


Рис. 2.8. Формы (а, б) токов к задаче 2 подразд. 2.1

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

4. Вольтметр электромагнитной системы, подключенный к выводам ЭЦ переменного тока, показывает 220 В. Чему равно амплитудное значение напряжения ЭЦ?

5. Дроссель пускорегулирующей аппаратуры для люминесцентных ламп имеет индуктивность 1,3 Гн. Вычислите его индуктивное сопротивление на промышленной частоте 50 Гц.

6. При частоте 50 Гц емкостное сопротивление конденсатора равно 318 Ом. Вычислите емкость конденсатора.

7. Чему равны частота, начальная фаза и амплитуда синусоидального напряжения, осциллограмма которого показана на рис. 2.9, а?

8. Каким будет показание вольтметра, подключенного к зажимам источника питания, осциллограмма напряжения которого показана на рис. 2.9, а?

9. Определите начальные фазы для синусоидальных напряжения и тока, осциллограммы которых показаны на рис. 2.9, б.

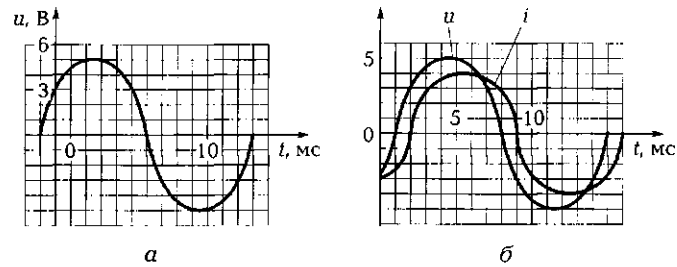


Рис. 2.9. Осциллограммы напряжений и тока:  
 а — к задачам 7, 8 подразд. 2.1; б — к задачам 9—11 подразд. 2.1

10. Определите фазовый сдвиг между синусоидальными током и напряжением, осциллограммы которых показаны на рис. 2.9, б.

11. Определите характер ЭЦ, осциллограммы тока и напряжения которой показаны на рис. 2.9, б.

12. Ток и напряжение в цепи описываются выражениями:  $i = 22 \sin(314t - 90^\circ)$ , А;  $u = 220 \sin(314t - 90^\circ)$ , В. Определите характер нагрузки и частоту переменного тока.

13. Ток и напряжение в цепи описываются выражениями  $i = 24 \sin 314t$ , А;  $u = 32 \sin 314t$ , В. Определите действующие значения тока, напряжения и мощности.

14. Электрическая плитка мощностью 660 Вт получает питание от сети, напряжение которой определяется выражением  $u = 311 \sin 314t$ , В. Какие значения напряжения и тока покажут включенные в сеть вольтметр и амперметр?

Наименование	Обозначение	Единица измерения
ЭДС	$\epsilon, E_m, E$	В
Сила тока	$i, I_m, I$	А
Напряжение	$u, U_m, U$	В
Индуктивность	$\Phi$	град.
Емкость	$L$	Ф
Угол сдвига фаз	$C$	В

Рис. 2.10. Связи между наименованиями физических величин, их обозначениями и единицами измерения к задаче 15 подразд. 2.1

15. На рис. 2.10 соответствующими линиями покажите связи между основными параметрами электрической цепи переменного тока, их обозначениями и единицами измерения.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Как изменяется переменный ток:
  - а) по величине;
  - б) по направлению;
  - в) периодически;
  - г) все приведенные ответы верны?
2. Назовите основные параметры синусоидального тока:
  - а) амплитуда;
  - б) частота;
  - в) начальная фаза;
  - г) все приведенные ответы верны.
3. Что такое действующее значение переменного тока:
  - а) неизменное значение такого тока, при протекании которого выделяется столько же теплоты за период, как и при протекании реального синусоидального тока;
  - б) значение тока, в  $\sqrt{2}$  раз меньшее амплитудного значения;
  - в) значение тока, которое измеряют приборы электромагнитной системы;
  - г) все приведенные ответы верны?
4. Какими параметрами переменного тока определяется вектор тока:
  - а) амплитудой и начальной фазой;
  - б) частотой и амплитудой;
  - в) начальной фазой и частотой;
  - г) периодом и частотой?
5. Какое из приведенных выражений для емкостного сопротивления верно:
  - а)  $X_C = \omega C$ ;
  - б)  $X_C = 1/(\omega C)$ ;
  - в)  $X_C = \omega L$ ;
  - г)  $X_C = 1/(\omega L)$ ?
6. Как ведет себя протекающий через конденсатор ток по отношению к напряжению на обкладках:
  - а) опережает на  $90^\circ$ ;
  - б) отстает на  $90^\circ$ ;
  - в) совпадает по фазе;
  - г) как проще?

7. Какое из приведенных выражений для индуктивного сопротивления верно:
- $X_L = \omega C$ ;
  - $X_L = 1/(\omega C)$ ;
  - $X_L = \omega L$ ;
  - $X_L = 1/\omega L$ ?
8. Как ведет себя ток, протекающий по катушке индуктивности по отношению к напряжению на ней:
- опережает на  $90^\circ$ ;
  - отстает на  $90^\circ$ ;
  - совпадает по фазе;
  - как проще?
9. Как изменится емкостное сопротивление конденсатора, если частота тока увеличится вдвое:
- увеличится вдвое;
  - не изменится;
  - уменьшится вдвое;
  - непредсказуемо?

## 2.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ, ИНДУКТИВНОСТЬЮ И ЕМКОСТЬЮ

### ТЕОРИЯ

#### 2.2.1. Цепь с активным сопротивлением

Пусть к ЭЦ с сопротивлением  $R$  (рис. 2.11, а) приложено синусоидальное напряжение  $u = U_m \sin \omega t$ . Тогда ток в цепи  $i = u/R = (U_m/R) \sin \omega t = I_m \sin \omega t$  также изменяется синусоидально и совпа-

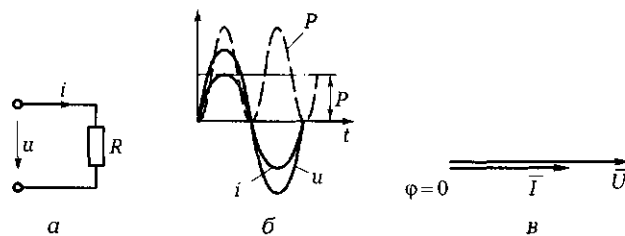


Рис. 2.11. Электрическая цепь с активным сопротивлением: а — схема ЭЦ; б — временная диаграмма; в — векторная диаграмма

двиг по фазе с приложенным напряжением (рис. 2.11, б). Векторная диаграмма имеет вид, показанный на рис. 2.11, в.

Мгновенная мощность в цепи с активным сопротивлением

$$p = ui = U_m I_m \sin^2 \omega t = \frac{U_m I_m}{2} - \frac{U_m I_m}{2} \cos 2\omega t = UI - UI \cos 2\omega t = P - P \cos 2\omega t.$$

Из полученного выражения следует, что мгновенная мощность  $p$  на активном сопротивлении включает в себя постоянную составляющую  $P$  и переменную двойной частоты. При этом мощность всегда положительна (см. рис. 2.11, б) и изменяется от 0 до  $P_m = U_m I_m$ . Это означает, что в цепи с активным сопротивлением энергия в течение всего периода потребляется от источника и необратимо преобразуется на сопротивлении в теплоту.

Мощность в цепи с активным сопротивлением называется активной, обозначается символом  $P$  и измеряется в ваттах (Вт).

### 2.2.2. Цепь с индуктивностью

Пусть в ЭЦ (рис. 2.12, а) активное сопротивление индуктивной катушки мало и им можно пренебречь (идеальная катушка индуктивности). Ток в катушке изменяется по синусоидальному закону:

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

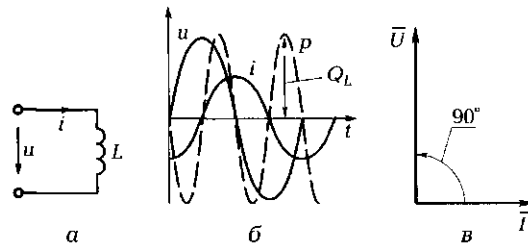
Как было показано ранее, напряжение на зажимах катушки в этом случае опережает ток на  $90^\circ$  (рис. 2.12, б). Векторная диаграмма цепи с идеальной катушкой индуктивности принимает вид, показанный на рис. 2.12, в.

Мгновенная мощность в цепи с индуктивностью

$$p = ui = U_m \sin \omega t I_m \cos \omega t = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t.$$

Мгновенная мощность изменяется с двойной частотой. При нарастании тока (независимо от его направления) происходит накопление энергии магнитного поля, которая поступает из сети. На-

Рис. 2.12. Электрическая цепь с идеальной катушкой индуктивности: а — схема ЭЦ; б — временная диаграмма; в — векторная диаграмма



копленная энергия увеличивается от нуля до максимального значения. Цепь в данном случае работает в режиме потребителя.

При уменьшении тока энергия магнитного поля катушки снижается от максимального значения до нуля. Накопленная энергия возвращается в сеть, цепь работает в режиме генератора.

Таким образом, в цепи с идеальной катушкой индуктивности энергия не расходуется, а происходит периодический обмен ею между сетью и катушкой индуктивности.

☛ Средняя мощность за период равна нулю, активная мощность  $P$  также равна нулю. Максимальное значение мощности в цепи с индуктивностью принято называть реактивной мощностью и обозначать символом  $Q_L$ ;

$$Q_L = U_L I = I^2 \omega L = \frac{U_L^2}{\omega L}.$$

Единица измерения реактивной мощности  $Q$  — вольт-ампер реактивный (вар).

### 2.2.3. Цепь с индуктивностью и активным сопротивлением

Реальная катушка индуктивности всегда содержит активное сопротивление (рис. 2.13, а), поскольку выполнена медным или алюминиевым проводом.

Тогда в соответствии со вторым законом Кирхгофа  $u = u_R + u_L$ , или применительно к векторам  $\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L$ . Векторная диаграмма в этом случае имеет вид, показанный на рис. 2.13, б.

Векторы напряжений образуют прямоугольный треугольник — треугольник напряжений, из которого следует, что

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} \quad \text{или} \quad IZ = \sqrt{(IR)^2 + (IX_L)^2}.$$

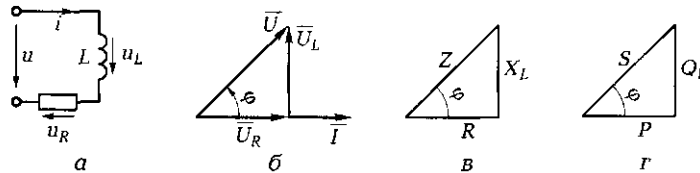


Рис. 2.13. Электрическая цепь с реальной катушкой индуктивности: а — схема ЭЦ; б — треугольник напряжений; в — треугольник сопротивлений; г — треугольник мощностей

Отсюда выражение для треугольника сопротивлений (рис. 2.13, в) принимает вид

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

где  $Z$ ,  $R$ ,  $X_L$  — соответственно полное, активное, индуктивное сопротивления, измеряемые в омах.

Из треугольника сопротивлений следует, что угол  $\varphi$  зависит только от параметров цепи  $R$  и  $X_L$ . Значение угла откладывается от направления вектора тока  $\vec{I}$ .

Умножив выражение для треугольника сопротивлений на квадрат силы тока, получим выражение для треугольника мощностей (рис. 2.13, г):

$$S = \sqrt{P^2 + Q_L^2},$$

где  $S$  — полная (кажущаяся) мощность, измеряемая в вольт-амперах (В·А);  $P$  — активная мощность, измеряемая в ваттах (Вт);  $Q_L$  — реактивная мощность индуктивного характера, измеряемая в вольт-амперах реактивных (вар).

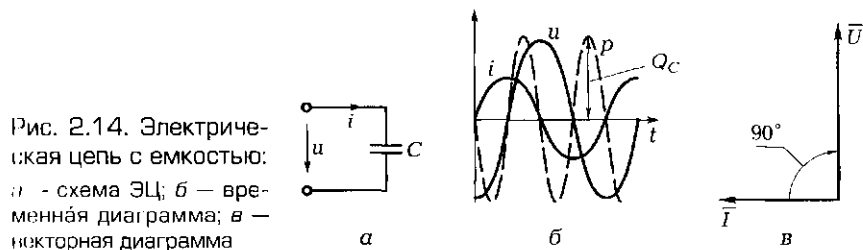
Исходя из треугольника мощностей можно записать

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi.$$

☛ Отношение активной мощности к полной  $P/S = \cos \varphi$  называется *коэффициентом мощности*, который показывает, какая часть полной мощности может совершать полезную работу.

## 2.2.4. Цепь с емкостью

Если на зажимах ЭЦ с конденсатором (рис. 2.14, а) напряжение изменяется по синусоидальному закону, т.е.  $u = U_m \sin \omega t$ , то ток в цепи с конденсатором, как было показано ранее, также изменяется по синусоидальному закону и опережает напряжение на  $90^\circ$  (рис. 2.14, б). Векторная диаграмма цепи с емкостью принимает вид, показанный на рис. 2.14, в.





Мгновенная мощность в цепи с емкостью

$$p = ui = U_m \sin \omega t I_m \cos \omega t = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t,$$

т. е. мгновенная мощность, как и в ЭЦ с индуктивностью, изменяется с двойной частотой. Средняя мощность за период равна нулю, активная мощность  $P$  также равна нулю.

Таким образом, в цепи с емкостью, как и в цепи с идеальной катушкой индуктивности, энергия, получаемая от сети, не расходуется, а происходит периодический обмен ею между источником и емкостью (конденсатором).

Максимальное значение мощности в цепи с емкостью принято называть реактивной мощностью

$$Q_C = U_C I = \frac{I^2}{\omega C} = U_C^2 \omega C.$$

Единица измерения реактивной мощности — вольт-ампер реактивный (вар).

### 2.2.5. Цепь с емкостью и активным сопротивлением

Процессы в цепи с емкостью и активным сопротивлением (рис. 2.15, а) могут быть проанализированы по аналогии с цепью, содержащей индуктивность и активное сопротивление.

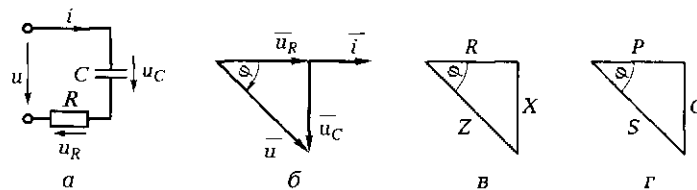


Рис. 2.15. Электрическая цепь с емкостью и активным сопротивлением: а — схема ЭЦ; б — треугольник напряжений; в — треугольник сопротивлений; г — треугольник мощностей

Отметим только, что напряжение цепи отстает от тока на угол  $\varphi$  (рис. 2.15, б). При этом полное сопротивление  $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$  можно найти из треугольника сопротивлений (рис. 2.15, в), а полную мощность  $S = \sqrt{P^2 + Q_C^2}$  — из треугольника мощностей (рис. 2.15, г).

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. При включении дросселя пускорегулирующей аппаратуры для люминесцентных ламп на постоянное напряжение 21 В амперметр показал значение тока 0,7 А. При включении этого же дросселя на переменное напряжение 220 В частотой 50 Гц показание амперметра равнялось 0,5 А. Вычислите активное сопротивление дросселя и его индуктивность.

*Решение.* При постоянном токе частота  $\omega = 0$  и, следовательно,  $X_L = \omega L = 0$ . Поэтому активное сопротивление дросселя определяем в соответствии с законом Ома:  $R_{\text{дп}} = U/I = 21/0,7 = 30$  Ом.

При переменном токе частотой 50 Гц  $\omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$  рад/с и, следовательно,  $X_L = \omega L = 314L$ . Полное сопротивление дросселя  $Z_{\text{дп}} = \sqrt{R_{\text{дп}}^2 + X_L^2} = 220/0,5 = 440$  Ом.

Отсюда  $X_L = \sqrt{Z_{\text{дп}}^2 - R_{\text{дп}}^2} = \sqrt{440^2 - 30^2} = 439$  Ом, а  $L = X_L/314 = 439/314 = 1,4$  Гн.

*Ответ.* Активное сопротивление дросселя равно 30 Ом, индуктивность — 1,4 Гн.

2. Лампу накаливания  $L$  мощностью  $P = 40$  Вт, рассчитанную на рабочее напряжение  $U_{\text{раб}} = 36$  В, необходимо включить в сеть напряжением  $U = 220$  В, частотой 50 Гц. В качестве гасящего сопротивления используется резистор (рис. 2.16). Определите сопротивление и рассеиваемую мощность резистора.

*Решение.* Вычисляем рабочий ток, протекающий через лампу, учитывая ее чисто активный характер:  $I = P/U_{\text{раб}} = 40/36 = 1,1$  А.

Находим полное сопротивление ЭЦ, состоящей из последовательно включенных лампы и резистора:  $Z = U/I = 220/1,1 = 200$  Ом.

Вычисляем сопротивление лампы:  $R_L = U_{\text{раб}}/I = 36/1,1 = 32,7$  Ом.

Определяем сопротивление резистора, учитывая, что лампа накаливания обладает чисто активным сопротивлением:  $R = Z - R_L = 200 - 32,7 = 167,3$  Ом.

Находим рассеиваемую резистором мощность:  $P = I^2 R = 1,1^2 \cdot 167,3 = 202,4$  Вт.

*Ответ.* Чтобы лампа на напряжение 36 В могла питаться от сети напряжением 220 В, необходимо последовательно с лампой включить резистор сопротивлением 167,3 Ом, обладающий рассеиваемой мощностью 203 Вт.

Это весьма значительная мощность, сопоставимая с мощностью паяльника. Можно ли

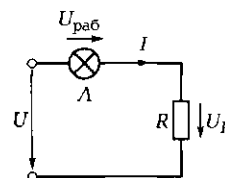


Рис. 2.16. Схема ЭЦ к задаче 2 подразд. 2.2

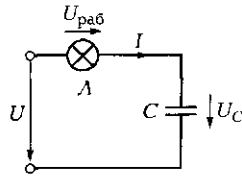


Рис. 2.17. Схема ЭЦ к задаче 3 подразд. 2.2

как-то иначе обеспечить работу лампы в сети? Можно, если вместо резистора использовать конденсатор.

3. Лампу накаливания  $L$  с параметрами  $U_{\text{раб}} = 36$  В и  $P = 40$  Вт необходимо включить в сеть напряжением  $U = 220$  В, частотой 50 Гц. В качестве гасящего сопротивления используется конденсатор (рис. 2.17). Определите емкость и рабочее напряжение конденсатора.

*Решение.* Вычисляем рабочий ток, протекающий через лампу, учитывая ее чисто активный характер:  $I = P/U_{\text{раб}} = 40/36 = 1,1$  А.

Находим полное сопротивление ЭЦ, состоящей из последовательно включенных конденсатора и лампы:  $Z = U/I = 220/1,1 = 200$  Ом.

Вычисляем сопротивление лампы:  $R_L = U_{\text{раб}}/I = 36/1,1 = 32,7$  Ом.

Из треугольника сопротивлений определяем значение емкостного сопротивления:  $X_C = \sqrt{Z^2 - R_L^2} = \sqrt{200^2 - 32,7^2} = 197$  Ом.

Из выражения  $X_C = 1/(\omega C)$  находим емкость конденсатора:  $C = 1/(\omega X_C) = 1/(2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 197) = 0,0000161$  Ф = 16,1 мкФ.

Рабочее напряжение конденсатора  $U_C = X_C I = 197 \cdot 1,1 = 216,7$  В.

*Ответ.* Чтобы лампа на напряжение 36 В могла питаться от сети напряжением 220 В, необходимо последовательно с лампой включить конденсатор емкостью 16 мкФ, рассчитанный на рабочее напряжение 250 В. Это небольшой бумажный конденсатор, к тому же совершенно не рассеивающий теплоту.

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

4. В электрической цепи, схема которой показана на рис. 2.18, а, сопротивления резисторов  $R_1 = 400$  Ом,  $R_2 = 300$  Ом. Напряжение питания  $U = 210$  В, частота 50 Гц. Вычислите падение напряжения на каждом резисторе.

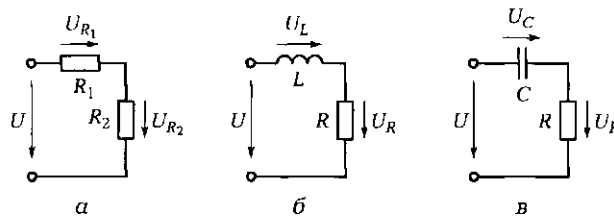
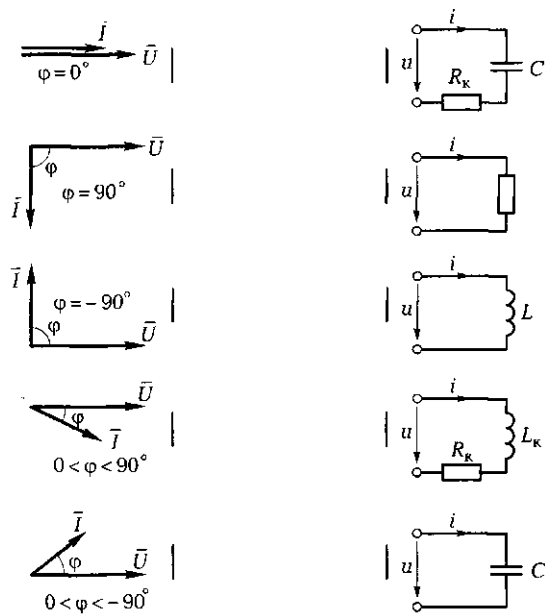


Рис. 2.18. Схемы ЭЦ к задачам 4 (а), 5 (б) и 6 (в) подразд. 2.2

Рис. 2.19. Связи между схемами ЭЦ и векторными диаграммами (к задаче 8 подразд. 2.2)



5. Электрическая цепь (рис. 2.18, б) получает питание от промышленной сети напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Индуктивность  $L$  катушки равна 0,95 Гн, а сопротивление резистора  $R$  — 400 Ом. Определите падение напряжения на каждом элементе ЭЦ.

6. К выводам ЭЦ с последовательным включением конденсатора и резистора (рис. 2.18, в) подводится напряжение питания 36 В частотой 50 Гц. На резисторе сопротивлением  $R = 100$  Ом падение напряжения составляет  $U_R = 25,5$  В. Определите падение напряжения на конденсаторе и емкость конденсатора.

7. Обмотка электромагнита индуктивностью 0,2 Гн включена в сеть напряжением 220 В, частотой 50 Гц. Определите амплитудное значение тока, протекающего по обмотке (активным сопротивлением обмотки пренебречь).

8. Слева на рис. 2.19 показаны векторные диаграммы, справа — схемы ЭЦ. От каждой схемы проведите прямую линию к диаграмме, соответствующей данной схеме.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Чему равен сдвиг фаз между током и напряжением в цепи с активным сопротивлением:
  - а) 0;

- б)  $90^\circ$ ;
  - в)  $-90^\circ$ ;
  - г)  $120^\circ$ ?
2. Чему равен сдвиг фаз между током и напряжением в цепи с индуктивностью:
- а) 0;
  - б)  $90^\circ$ ;
  - в)  $-90^\circ$ ;
  - г)  $120^\circ$ ?
3. Чему равен сдвиг фаз между током и напряжением в цепи с емкостью:
- а) 0;
  - б)  $90^\circ$ ;
  - в)  $-90^\circ$ ;
  - г)  $120^\circ$ ?
4. Укажите единицу измерения активной мощности:
- а) вар;
  - б) В·А;
  - в) Вт;
  - г) Дж.
5. Укажите единицу измерения реактивной мощности:
- а) Вт;
  - б) В·А;
  - в) Дж;
  - г) вар.
6. Укажите единицу измерения полной мощности:
- а) Вт;
  - б) вар;
  - в) Дж;
  - г) В·А.
7. Какая мощность определяет полезную работу, совершаемую ЭЦ:
- а) полная;
  - б) активная;
  - в) реактивная;
  - г) все перечисленные мощности?
8. Что определяют треугольники напряжений, сопротивлений, проводимостей, токов, мощностей для ЭЦ на переменном токе:
- а) соотношение между активной и реактивной составляющими ЭЦ;
  - б) полное напряжение, сопротивление, проводимость, ток, мощность в ЭЦ;

- в) коэффициент мощности;
  - г) все перечисленные показатели?
9. Какое из приведенных выражений для коэффициента мощности неверно:
- а)  $\cos\varphi = P/S$ ;
  - б)  $\sin\varphi = Q/S$ ;
  - в)  $\sin\varphi = Q/P$ ;
  - г)  $\cos\varphi = R/Z$ ?

## 2.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ КОНДЕНСАТОРА И КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

---

### ТЕОРИЯ

#### 2.3.1. Колебательный контур

Совместное включение катушки индуктивности и конденсатора позволяет получить ЭЦ, в которой при определенных условиях может возникнуть колебательный процесс. Определяется он способностью конденсатора разряжаться на катушку индуктивности с преобразованием электрической энергии в магнитную и способностью магнитного поля катушки перезаряжать конденсатор, возвращая ему электрическую энергию. Такая цепь получила название *колебательный контур*. В нем возникают гармонические колебания собственной частоты. Если эти колебания совпадают с вынужденными колебаниями, создаваемыми источником питания, то они могут стать незатухающими. Колебательный контур может быть создан как при последовательном включении катушки индуктивности и конденсатора, так и при параллельном.

*Характеристическое сопротивление контура*, измеряемое в омах, определяется по формуле  $\rho = \sqrt{L/C}$ , где  $L$  — индуктивность катушки;  $C$  — емкость конденсатора.

*Добротность контура*  $Q = U_L/U_R = \rho/R$ , где  $U_L$ ,  $U_R$  — соответственно индуктивная и активная составляющие напряжения на катушке индуктивности;  $R$  — активное сопротивление катушки.

### 2.3.2. Последовательное включение катушки индуктивности и конденсатора

Для неразветвленной ЭЦ, содержащей катушку индуктивности с активным сопротивлением  $R$  и индуктивностью  $L$  и конденсатор с емкостью  $C$  (рис. 2.20, а), полное сопротивление

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

Характер нагрузки зависит от величины и знака угла  $\varphi$ , определяемого соотношением индуктивного  $X_L$  и емкостного  $X_C$  сопротивлений. В общем случае угол  $\varphi$  может изменяться от  $-\pi/2$  до  $+\pi/2$ .

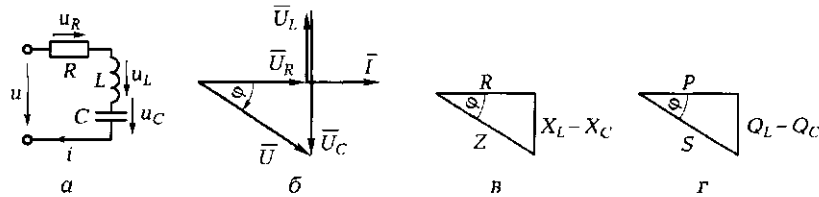


Рис. 2.20. Электрическая цепь с реальной катушкой индуктивности и конденсатором:

а — схема ЭЦ; б — треугольник напряжений; в — треугольник сопротивлений; г — треугольник мощностей

Если  $X_L < X_C$ , то ЭЦ носит емкостной характер и угол  $\varphi < 0$ . Если  $X_L > X_C$ , то ЭЦ носит индуктивный характер и угол  $\varphi > 0$ .

В соответствии со вторым законом Кирхгофа для мгновенных значений напряжений справедливо выражение  $u = u_R + u_C + u_L$ , для векторов —  $\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_C + \vec{U}_L$ . Векторная диаграмма напряжений построена относительно общего для всех элементов ЭЦ тока  $I$  (рис. 2.20, б). Треугольник сопротивлений принимает вид, показанный на рис. 2.20, в, а треугольник мощностей — на рис. 2.20, г.

### 2.3.3. Резонанс напряжений

Практический интерес представляет случай, когда  $\varphi = 0$ . Это может иметь место, если  $X_L = X_C$ . В данном случае собственные колебания, возникающие в ЭЦ, совпадают с вынужденными колебаниями, создаваемыми источником питания. При этом  $U = IR$ , т. е. сдвиг фаз между током и напряжением отсутствует. Ток  $I = U/R$  максимален, так как минимально полное сопротивление цепи ( $Z = R$ ). В связи с этим напряжения на катушке индуктивности и конденсаторе

равны ( $U_L = IX_L = U_C = IX_C$ ), максимальны и могут значительно превышать напряжение питания, если  $X_L = X_C \gg R$ .

☛ В технике явление увеличения напряжения на отдельных элементах ЭЦ по отношению к напряжению источника питания получило название *резонанс напряжений*.

Резонансная частота в электрической цепи с катушкой индуктивности и конденсатором, называемой в радиотехнике *LC-контуром*, равна частоте напряжения, подводимого к цепи.

Из условия  $X_L = X_C$ , или  $2\pi fL = 1/2\pi fC$ , может быть получено выражение для резонансной частоты:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Для промышленной частоты  $f = 50$  Гц можно записать приближенное выражение, связывающее между собой значения резонансной емкости и индуктивности:

$$C_{\text{рез}} = \frac{10}{L}, \text{ мкФ}.$$

Поскольку при резонансе напряжений ток в цепи определяется только лишь активной составляющей сопротивления цепи, обмен реактивной мощностью между цепью и источником отсутствует. Реактивная мощность циркулирует внутри контура от катушки индуктивности к конденсатору и обратно. При этом энергия электрического поля конденсатора переходит в энергию магнитного поля катушки индуктивности, и наоборот. Коэффициент мощности  $\cos \varphi = P/S = 1$ .

При рассмотрении колебательного контура используют также такие понятия, как характеристическое сопротивление контура  $\rho = \sqrt{L/C}$ , Ом, и добротность контура  $Q = U_L/U_R = \rho/R$ . При резонансе  $\rho = X_L = X_C = X$  и  $Q = X/R$ , т. е. чем больше реактивное сопротивление  $X$  по отношению к активному  $R$ , тем выше добротность контура.

☛ Таким образом, условием резонанса напряжений является равенство реактивных сопротивлений конденсатора и катушки индуктивности:  $X_L = X_C$ .

Следствием же резонанса являются:

- минимальное значение полного сопротивления ЭЦ ( $Z = R$ );
- максимальное значение тока в ЭЦ ( $I = U/R$ );
- потребление ЭЦ чисто активного тока ( $\varphi = 0$ ,  $\cos \varphi = P/S = 1$ );
- равенство напряжений на реактивных элементах ( $U_L = U_C$ ) и возможность значительного превышения ими напряжения источника питания.



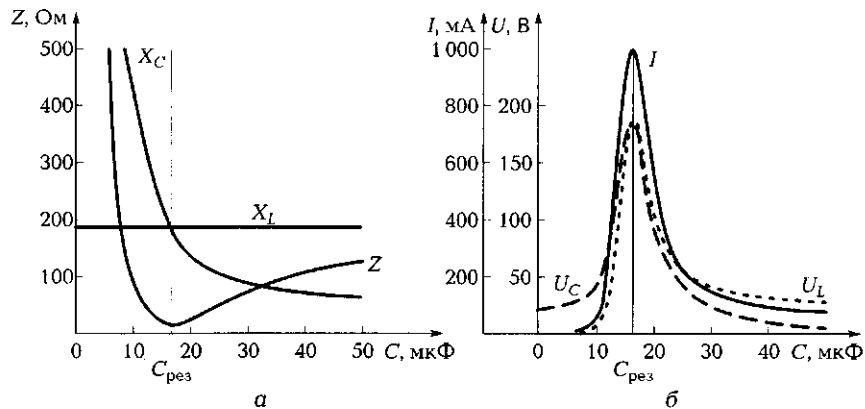


Рис. 2.21. Графики изменения сопротивлений (а), тока и напряжений (б) на элементах ЭЦ

Получение резонанса напряжений возможно либо за счет изменения частоты источника питания, либо за счет изменения собственной частоты контура путем изменения индуктивности  $L$  или емкости  $C$ .

На практике чаще используют конденсаторы переменной емкости, изменение которой позволяет настроить контур в резонанс. При этом индуктивное сопротивление  $X_L = 2\pi fL$  остается неизменным, а емкостное  $X_C = 1/(2\pi fC)$  изменяется по гиперболическому закону. В результате изменяется полное сопротивление ЭЦ (контура)  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$  (рис. 2.21, а), что ведет к изменению потребляемого ЭЦ тока  $I = U/Z$  и напряжений на элементах цепи  $U_L = IX_L$  и  $U_C = IX_C$  (рис. 2.21, б).

⚡ Резонанс напряжений — явление опасное и вредное, поскольку возможен пробой изоляции проводов и конденсаторов. В то же время в радиотехнике это явление нашло широкое применение для построения резонансных контуров в приемопередающих устройствах.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. В ЭЦ, схема которой показана на рис. 2.22, напряжение  $U = 20$  В при промышленной частоте  $f = 50$  Гц, емкость  $C$  конденсатора изменяется от 10 до 30 мкФ, катушка индуктивности имеет активное сопротивление  $R_k = 10$  Ом и индуктивность  $L_k = 0,5$  Гн. Вычислите ожидаемое значение емкости при резонансе ( $C_{рез}$ ), а также

значения тока и напряжений на элементах ЭЦ. Постройте на рис. 2.23, а графики изменения сопротивлений, тока и напряжений на элементах ЭЦ при изменении емкости  $C$  от 10 до 30 мкФ. Постройте на рис. 2.23, б векторную диаграмму напряжений при емкости  $C = 15$  мкФ. Определите при этом, какой характер носит ЭЦ.

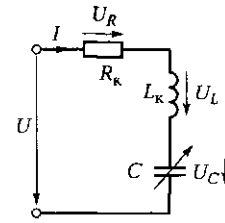


Рис. 2.22. Схема ЭЦ к задаче 1 подразд. 2.3

**Решение.** Пользуясь приближенной формулой, вычисляем ожидаемое значение емкости при резонансе:  $C_{рез} = 10/L = 10/0,5 = 20$  мкФ.

По формулам  $X_L = 2\pi fL_k$ ,  $X_C = 1/(2\pi fC)$ ;  $Z = \sqrt{R_k^2 + (X_L - X_C)^2}$ ;  $I = U/Z$ ,  $U_L = IX_L$  и  $U_C = IX_C$  вычисляем значения реактивных сопротивлений элементов, полного сопротивления ЭЦ, тока и напряжений на элементах. Полученные значения заносим в строку табл. 2.1 со значением  $C_{рез} = 20$  мкФ.

Аналогично вычисляем значения указанных параметров при емкости  $C$ , равной 10, 15, 25, 30 мкФ, и заносим их в соответствующие графы табл. 2.1.

По данным табл. 2.1 строим на рис. 2.23, а в выбранных масштабах графики изменения сопротивлений, тока и напряжений в зависимости от емкости  $C$ .

Для  $C = 15$  мкФ строим на рис. 2.23, б векторную диаграмму напряжений. Выбираем масштаб напряжений  $m_U = 20$  В/см. Направления векторов напряжений откладываем относительно вектора тока  $\vec{I}$ , приняв направление последнего горизонтальным. Направление

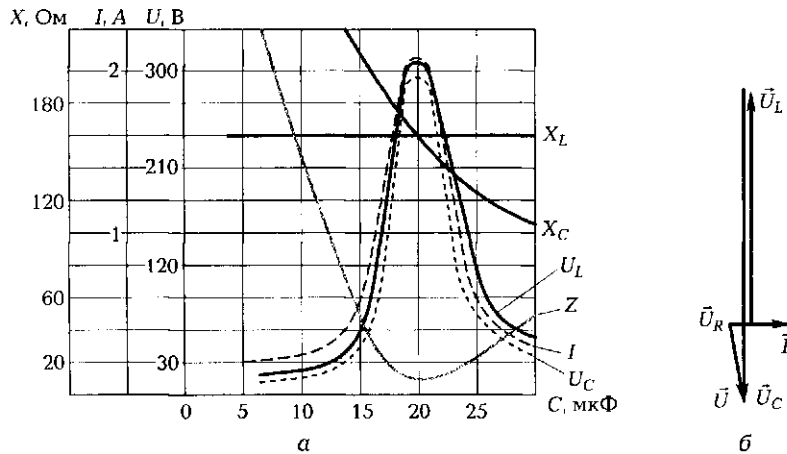


Рис. 2.23. Графики изменения сопротивлений, тока и напряжений на элементах ЭЦ (а) и векторная диаграмма напряжений (б)

Таблица 2.1

$C$ , мкФ	$X_L$ , Ом	$X_C$ , Ом	$Z$ , Ом	$I$ , А	$U_L$ , В	$U_C$ , В
10	157	318	161	0,124	20	39
15	157	212	56	0,357	56	75
$C_{рез} = 20$	157	159	10,2	1,96	307	311
25	157	127	32	0,625	98	79
30	157	106	52	0,385	60	41

ние вектора напряжения на активном сопротивлении  $\vec{U}_R$  совпадает с направлением вектора тока. Вектор напряжения на индуктивности  $\vec{U}_L$  опережает вектор тока на  $90^\circ$ . Проводим его из конца вектора  $\vec{U}_R$ . Вектор напряжения на емкости  $\vec{U}_C$  отстает от вектора тока на  $90^\circ$ . Проводим его из конца вектора  $\vec{U}_L$ . Соединив конец вектора  $\vec{U}_C$  с началом вектора  $\vec{U}_R$ , получаем вектор приложенного напряжения  $\vec{U}$ , который с учетом выбранного масштаба должен соответствовать напряжению  $U = IZ = 0,357 \cdot 56 = 20$  В. Длина полученного нами вектора  $\vec{U}$  составляет 1 см, что при масштабе  $m_U = 20$  В/см соответствует значению 20 В. Таким образом, векторная диаграмма напряжений построена правильно.

Анализ графиков на рис. 2.23, а показывает, что действительно при резонансе ( $C = 20$  мкФ) реактивные сопротивления одинаковы, полное сопротивление минимально и равно активному сопротивлению катушки индуктивности, ток максимален, а напряжения на реактивных элементах одинаковы, максимальны и примерно в 15 раз превышают напряжение питания.

*Ответ.* Значение емкости при резонансе равно 20 мкФ, ток при резонансе составляет около 2 А, напряжение на реактивных элементах — около 300 В. При  $C = 15$  мкФ ЭЦ носит емкостный характер.

2. Какое из приведенных выражений является условием резонанса напряжений в ЭЦ:

а)  $I = I_{\max}$ ; б)  $X_L = X_C$ ; в)  $Z = R$ ; г)  $U_L = U_C$ ; д)  $\varphi = 0$ ; е)  $I = I_{\min}$ ; ж)  $P = S$ ;  
з)  $\cos \varphi = 1$ ?

*Ответ.* Выражение б). Лишь при равенстве реактивных сопротивлений полное сопротивление равно активному ( $Z = R$ ), ток в цепи достигает максимальной величины ( $I = I_{\max}$ ), напряжения на элементах равны и максимальны ( $U_L = U_C$ ), угол сдвига фаз между током и напряжением равен нулю ( $\varphi = 0$ ), соответственно коэффициент мощности максимален ( $\cos \varphi = 1$ ) и активная мощность равна полной ( $P = S$ ).

Таким образом, выражения а), в), г), д), ж) и з) справедливы для резонанса напряжений, но все это — следствия такого резонанса.

Выражение е) имеет отношение не к резонансу напряжений, а к резонансу токов, о котором речь пойдет далее (см. подразд. 2.4.2).

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

3. Определите резонансную частоту последовательного колебательного контура с параметрами  $L = 10$  мГн,  $C = 100$  мкФ.

4. Резонанс напряжений в электрической цепи на промышленной частоте наступил при  $C_{рез} = 15$  мкФ. Вычислите значение индуктивности при резонансе  $L_{рез}$ .

5. Определите частоту, период свободных колебаний и характеристическое сопротивление идеального колебательного контура с параметрами  $L = 100$  мГн,  $C = 50$  мкФ.

6. Определите падение напряжения на элементах последовательного колебательного контура с параметрами  $R = 10$  Ом,  $C = 50$  мкФ,  $L = 202,9$  мГн, если к цепи приложено напряжение  $U = 220$  В,  $f = 50$  Гц.

7. Определите добротность и частоту свободных колебаний контура с параметрами  $L = 10$  мГн,  $C = 100$  пФ,  $R = 5$  Ом.

8. На какое рабочее напряжение необходимо выбрать конденсатор для ЭЦ, работающей при резонансе, если напряжение питания 21 В, активное сопротивление катушки индуктивности 30 Ом, индуктивность 0,64 Гн?

### КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Укажите верное выражение для полного сопротивления ЭЦ с последовательным включением элементов  $R$ ,  $L$  и  $C$ :
  - а)  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ ;
  - б)  $Z = R^2 + (X_L - X_C)^2$ ;
  - в)  $Z = R + X_L + X_C$ ;
  - г)  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L + X_C)^2}$ .
2. К чему стремится ток в ЭЦ с последовательным включением конденсатора и катушки индуктивности при резонансе:
  - а) к минимальному значению;
  - б) номинальному значению;
  - в) максимальному значению;
  - г) ни к чему не стремится — остается неизменным?

3. К чему стремится полное сопротивление ЭЦ с последовательным включением конденсатора и катушки индуктивности при резонансе:
  - а) к минимальному значению;
  - б) номинальному значению;
  - в) максимальному значению;
  - г) ни к чему не стремится — остается неизменным?
4. К чему стремится напряжение на катушке индуктивности при резонансе напряжений:
  - а) к минимальному значению;
  - б) номинальному значению;
  - в) максимальному значению;
  - г) ни к чему не стремится — остается неизменным?
5. Укажите правильное соотношение напряжений на конденсаторе и катушке индуктивности в ЭЦ с их последовательным включением при резонансе:
  - а)  $U_L > U_C$ ;
  - б)  $U_L < U_C$ ;
  - в)  $U_L = U_C$ ;
  - г) зависит от приложенного напряжения.

## 2.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ КОНДЕНСАТОРА И КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ. РЕЗОНАНС ТОКОВ. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

### ТЕОРИЯ

#### 2.4.1. Понятие проводимостей на переменном токе

По аналогии с постоянным током при параллельном соединении элементов ЭЦ переменного тока анализ проще вести, пользуясь понятием проводимостей. В цепях переменного тока различают проводимости трех видов — полную ( $y$ ), активную ( $g$ ) и реактивную ( $b$ ).

Пусть для ЭЦ, схема которой показана на рис. 2.24, а, известны параметры  $U$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $L$  и  $C$ . Для определения токов в ветвях и по-

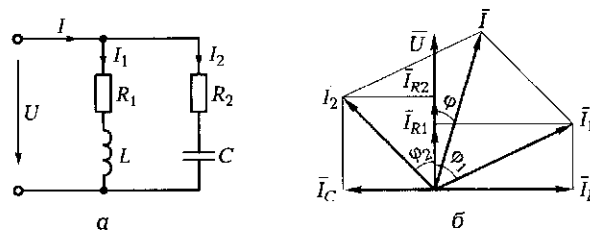


Рис. 2.24. Схема ЭЦ с параллельным включением катушки индуктивности и конденсатора с резистором (а) и векторная диаграмма (б)

строения векторной диаграммы воспользуемся следующими выражениями:

$$I_1 = U/Z_1; I_2 = U/Z_2;$$

$$\cos \varphi_1 = R_1/Z_1; \cos \varphi_2 = R_2/Z_2; \sin \varphi_1 = X_L/Z_1; \sin \varphi_2 = X_C/Z_2.$$

В этом случае активные и реактивные составляющие токов

$$I_{R1} = I_1 \cos \varphi_1 = UR_1/Z_1^2 = Uq_1; I_{R2} = Uq_2;$$

$$I_L = I_1 \sin \varphi_1 = UX_L/Z_1^2 = Ub_L; I_C = Ub_C,$$

где  $q_1 = R_1/Z_1^2$  и  $q_2 = R_2/Z_2^2$  — активные составляющие проводимостей;  $b_L = X_L/Z_1^2$  и  $b_C = X_C/Z_2^2$  — реактивные составляющие (соответственно индуктивная и емкостная) проводимостей;  $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_L^2}$  и  $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_C^2}$  — полные сопротивления параллельных ветвей.

Полная проводимость — это величина, обратная полному сопротивлению:  $y = 1/Z$ .

Построение векторной диаграммы (рис. 2.24, б) удобно начать с вектора напряжения  $U$ , так как напряжение является общим для двух параллельных ветвей.

Векторы составляющих токов откладываем под соответствующими углами: для активных составляющих  $\varphi = 0$ , для реактивных  $\varphi_1 = 90^\circ$  (индуктивная составляющая) и  $\varphi_2 = -90^\circ$  (емкостная составляющая).

Получив векторы активных и реактивных составляющих токов, строим векторы токов в ветвях  $I_1$  и  $I_2$ . Далее по правилу параллелограмма находим вектор общего тока  $I$ , потребляемого цепью, и угол сдвига фаз между током и напряжением  $\varphi$ .

## 2.4.2. Резонанс токов

☛ При параллельном соединении элементов  $L$  и  $C$  колебательного контура (см. рис. 2.24, а) может иметь место явление резонанса токов.

В общем случае угол  $\varphi$  между векторами общего тока цепи и напряжения может изменяться от  $-\pi/2$  до  $+\pi/2$ . Значение угла  $\varphi$  зависит от соотношения реактивных проводимостей ветвей с индуктивностью и емкостью.

Практический интерес представляет равенство реактивных проводимостей ( $b_L = b_C$ ) — условие возникновения резонанса токов. В этом случае  $\varphi = 0$ , общий ток  $I$  совпадает по фазе с напряжением источника  $U$ . При этом ток  $I$  имеет только активную составляющую и определяется лишь активной проводимостью  $g = R/Z^2$ .

В идеальном случае при  $R_1 = R_2 = 0$  активная проводимость  $g$  равна нулю и общий потребляемый ток  $I = Uq$  также равен нулю. Однако реактивные токи в ветвях  $I_L$  и  $I_C$  отличаются от нуля, равны по величине и противоположны по фазе. При  $b_L = b_C \gg g$  реактивный ток может достигать весьма больших значений, т. е. имеет место резонанс токов.

Энергетические процессы при резонансе токов аналогичны процессам при резонансе напряжений. Полная мощность равна активной мощности ( $S = P$ ), реактивная мощность от источника не потребляется ( $Q = 0$ ), коэффициент мощности равен единице ( $\cos \varphi = 1$ ).

Явление резонанса токов широко используется в технике, например в технике связи и автоматике. В энергетических устройствах резонанс токов в отличие от резонанса напряжений — явление безопасное, так как совпадение частоты питания с собственной частотой контура не приводит к нежелательным последствиям.

### 2.4.3. Пути повышения коэффициента мощности

Большинство промышленных потребителей переменного тока имеют активно-индуктивный характер и, следовательно, потребляют значительную реактивную мощность. К ним в первую очередь относятся асинхронные двигатели (приводные двигатели металлорежущих станков), установки электросварки, высокочастотной закалки.

Потребление реактивной мощности ведет к снижению коэффициента мощности  $\cos \varphi = P/S$ , что обуславливает недоиспользование мощности генераторов, линий передачи и трансформаторов. Они бесполезно загружаются реактивным током индуктивного характера. Кроме того, низкий коэффициент мощности требует большей площади поперечного сечения подводящих проводов.

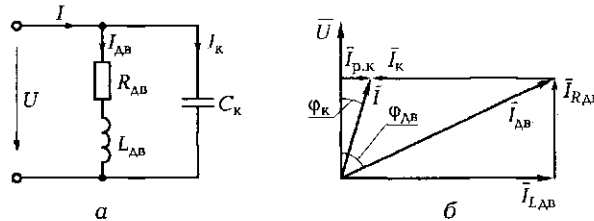


Рис. 2.25. Схема ЭЦ с обмоткой двигателя и параллельно включенной батареей конденсаторов (а) и векторная диаграмма (б)

Например, если для совершения работы требуется мощность  $P = 100$  кВт при напряжении  $U = 10$  кВ, то при  $\cos \varphi = 0,5$  потребляемый ток  $I = P / (U \cos \varphi) = 100 / (10 \cdot 0,5) = 20$  А. Повышение  $\cos \varphi$  до 0,9 позволяет снизить потребляемый ток до  $100 / (10 \cdot 0,9) = 11$  А и тем самым уменьшить площадь сечения проводов почти вдвое.

Использование резонанса токов дает возможность избавить источники энергии и передающие устройства от бесполезных колебаний энергии, замкнув их в контуре, образуемом катушкой индуктивности и конденсатором.

Так, подключение параллельно обмотке двигателя батареи конденсаторов  $C_K$  (рис. 2.25, а) позволяет уменьшить реактивную составляющую тока, а следовательно, снизить реактивную мощность  $Q = Q_L - Q_C$ , потребляемую из сети, и тем самым повысить коэффициент мощности  $\cos \varphi$ . На показанной на рис. 2.25, б векторной диаграмме  $I_{LAB}$  — реактивный ток до компенсации;  $I_{p,k}$  — реактивный ток после компенсации;  $I_K$  — реактивный ток в ветви с конденсатором;  $\varphi_{LAB}$  — угол сдвига фаз между током и напряжением до компенсации;  $\varphi_K$  — угол сдвига фаз между током и напряжением после компенсации.

Предприятиям устанавливают вполне определенное значение  $\cos \varphi$  (от 0,95 до 0,98). За более низкий  $\cos \varphi$  предприятия штрафуют, поэтому главные энергетики борются за повышение коэффициента мощности даже на сотые доли.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. Люминесцентные лампы включаются в сеть с помощью пускорегулирующей аппаратуры (ПРА). Основу ее составляет дроссель  $Dp$ , включаемый последовательно с лампой  $L$  и имеющий большое



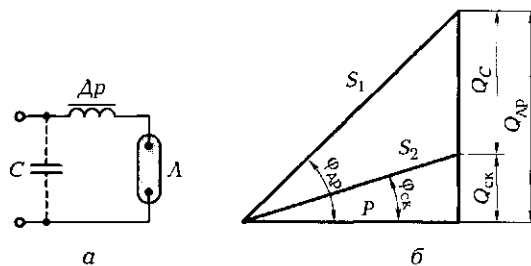


Рис. 2.26. Схема ЭЦ (а) и треугольник мощностей (б) к задаче 1 подразд. 2.4;

$Dp$  — дроссель;  $C$  — конденсатор;  $L$  — лампа;  $Q_{др}$  — реактивная мощность, потребляемая дросселем;  $Q_C$  — реактивная мощность, потребляемая конденсатором;  $Q_{ск}$  — скомпенсированная реактивная мощность;  $S_1$  и  $S_2$  — полная мощность до и после компенсации;  $P$  — активная мощность;  $\varphi_{др}$  и  $\varphi_{ск}$  — углы сдвига фаз между током и напряжением до и после компенсации

индуктивное сопротивление (рис. 2.26, а). Поэтому индуктивная составляющая тока значительна и коэффициент мощности  $\cos \varphi$  невелик. Для повышения коэффициента мощности в состав ПРА введен конденсатор  $C$ .

Вычислите емкость конденсатора, обеспечивающую повышение  $\cos \varphi$  до 0,95, если дроссель L13.813H для компактных люминесцентных ламп мощностью  $P = 40$  Вт имеет  $\cos \varphi = 0,42$ .

*Решение.* Расчет выполняем, используя треугольник мощностей (рис. 2.26, б). Из него следует, что

$$\begin{aligned} Q_C &= Q_{AP} - Q_{CK} = P(\operatorname{tg} \varphi_{AP} - \operatorname{tg} \varphi_{CK}) = \\ &= P \left( \frac{\sin \varphi_{AP}}{\cos \varphi_{AP}} - \frac{\sin \varphi_{CK}}{\cos \varphi_{CK}} \right) = P \left( \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{AP}}}{\cos \varphi_{AP}} - \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{CK}}}{\cos \varphi_{CK}} \right) = \\ &= 40(2,16 - 0,32) = 73,6 \text{ вар.} \end{aligned}$$

Таким образом, конденсатор должен потреблять из сети реактивную мощность  $Q_C = 73,6$  вар.

Вычисляем емкость конденсатора при рабочем напряжении  $U = 220$  В частотой 50 Гц, пользуясь выражением

$$Q_C = \frac{U^2}{X_C} = \frac{U^2}{1/(\omega C)} = U^2 \omega C.$$

Из него следует, что

$$C = \frac{Q_C}{U^2 \omega} = \frac{73,6}{220^2 \cdot 314} = 0,0000048 \text{ Ф} = 4,8 \text{ мкФ.}$$

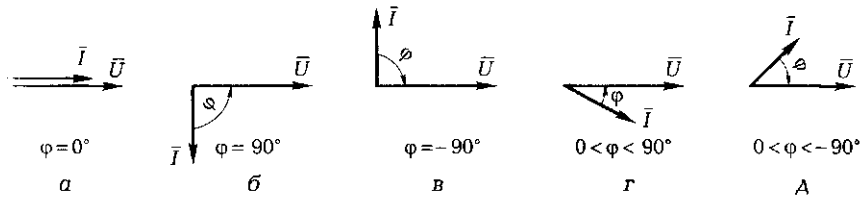


Рис. 2.27. Векторные диаграммы (а—д) к задаче 2 подразд. 2.4

*Ответ.* Для увеличения коэффициента мощности пускорегулирующей аппаратуры параллельно источнику питания необходимо установить конденсатор емкостью 4,8 мкФ на 250 В.

2. Как ведет себя вектор тока по отношению к вектору напряжения в ЭЦ:

- а) с резистором;
- б) с катушкой индуктивности;
- с) с конденсатором?

*Ответ.* В ЭЦ с резистором (активным сопротивлением) вектор тока совпадает по направлению с вектором напряжения (рис. 2.27, а), с катушкой индуктивности — отстает на  $90^\circ$  (рис. 2.27, б), с конденсатором — опережает вектор напряжения на  $90^\circ$  (рис. 2.27, в). В цепи с катушкой индуктивности и резистором вектор тока отстает от вектора напряжения на угол в диапазоне от 0 до  $90^\circ$  (рис. 2.27, г), а в цепи с конденсатором и резистором — опережает вектор напряжения на угол, изменяющийся в таком же диапазоне (рис. 2.27, д).

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

3. Параллельный колебательный контур имеет следующие параметры: сопротивление катушки индуктивности  $R_k = 11$  Ом, ее индуктивность  $L_k = 53,2$  мГн, подводимое напряжение  $U = 220$  В частотой  $f = 50$  Гц. Определите емкость конденсатора С при настройке контура в резонанс.

4. Каким будет показание амперметра переменного тока, включенного в общую ветвь ЭЦ, схема которой показана на рис. 2.28, если мгновенные значения токов в ветвях  $i_1 = 0,6 \sin \omega t$ ;  $i_2 = 0,8 \sin(\omega t - 60^\circ)$ ;  $i_3 = 0,4 \sin(\omega t + 30^\circ)$ ?

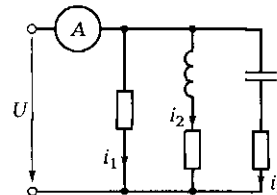


Рис. 2.28. Схема ЭЦ к задаче 4 подразд. 2.4

Мощность:		
– полная	Q	Вт
– реактивная	P	В·А
– активная	S	вар

Рис. 2.29. Соответствие между видами мощностей в ЭЦ переменного тока, их обозначениями и единицами измерения (к задаче 6 подразд. 2.4)

Проводимость:		
– активная	b	Гн
– реактивная	y	См
– полная	g	Ом

Рис. 2.30. Соответствие между видами проводимостей в ЭЦ переменного тока, их обозначениями и единицами измерения (к задаче 7 подразд. 2.4)

щего при напряжении 220 В, параллельно его обмоткам устанавливается конденсатор, обеспечивающий реактивную мощность емкостного характера 200 вар. Вычислите емкость конденсатора.

6. На рис. 2.29 проведите линии, показывающие соответствие между видами мощностей в ЭЦ переменного тока, их обозначениями и единицами измерения.

7. На рис. 2.30 проведите линии, показывающие соответствие между видами проводимостей в ЭЦ переменного тока, их обозначениями и единицами измерения.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

- Укажите верное выражение для полной проводимости ЭЦ с параллельным включением конденсатора и катушки индуктивности:
  - $y = \sqrt{q^2 + (b_L - b_C)^2}$ ;
  - $y = q^2 + (b_L - b_C)^2$ ;
  - $y = q + b_L + b_C$ ;
  - $y = \sqrt{q^2 + (b_L + b_C)^2}$ .
- При каком соединении катушки индуктивности и конденсатора возможен резонанс токов:
  - при последовательном;
  - смешанном;
  - любом;
  - параллельном?

3. К чему стремится ток в ЭЦ при параллельном включении конденсатора и катушки индуктивности при резонансе:
- а) к минимальному значению;
  - б) номинальному значению;
  - в) максимальному значению;
  - г) ни к чему не стремится — остается неизменным?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### Исследование электрической цепи с последовательным соединением катушки индуктивности и конденсатора при синусоидальных напряжениях

#### 1. Цель работы

1.1. Выявить влияние изменения емкости конденсатора на значения тока в электрической цепи, напряжения на ее элементах и мощности.

1.2. Изучить явление *резонанса напряжений*.

1.3. Познакомиться с методами анализа ЭЦ с применением векторных диаграмм.

#### 2. Объект и средства испытаний

Объектом испытаний является ЭЦ, содержащая конденсатор емкостью 1 мкФ и катушку индуктивности с активным сопротивлением  $R_k = 60$  Ом и индуктивностью  $L_k = 33$  мГн. Все элементы ЭЦ монтируются на наборном поле и могут быть включены в схему с помощью контактных гнезд и проводов со штекерами. Изменение емкости конденсатора осуществляется подключением параллельно к уже имеющемуся конденсатору с емкостью  $C_1$  конденсаторов с емкостями  $C_2, C_3, C_4$  или заменой конденсатора  $C_1$ .

Источником питания ЭЦ служит генератор синусоидальных колебаний с изменяющейся частотой и напряжением  $U = 0 \dots 12$  В.

Схема ЭЦ с включенными в нее измерительными приборами показана на рис. А5.1. В качестве измерительных приборов используются мультиметры, работающие в режимах амперметра (для измерения полного тока ЭЦ) и вольтметра (для измерения напряжения питания и напряжений на элементах ЭЦ). Для измерения потребляемой ЭЦ активной мощности используется электронный ваттметр.

### 3. Порядок выполнения работы

3.1. Собрать ЭЦ в соответствии с рис. А5.1, используя конденсатор емкостью 1 мкФ. Установить регулятор частоты в положение «1 000 Гц» и регулятор напряжения в положение  $U = 12$  В.

3.2. После проверки собранной ЭЦ преподавателем установить автоматы и выключатель УЗО в положение «Вкл.». Подать с помощью выключателя «Сеть» напряжение на ЭЦ, мультиметры и ваттметр. При этом должны загореться соответствующие сигнальные лампы.

Изменяя частоту генератора синусоидальных колебаний в большую или меньшую сторону от 1 000 Гц, добиться резонанса напряжений, на который укажет максимум тока. Занести показания всех приборов в соответствующую графу табл. А5.1 ( $C_{рез} = 1$  мкФ). Проверить, выполняется ли условие  $P = UI$  при резонансе. Изменяя емкость в большую и меньшую стороны от  $C_{рез} = 1$  мкФ, снять показания всех приборов еще при шести ее значениях, указанных в табл. А5.1. Данные занести в соответствующие графы табл. А5.1.

3.3. Заполнить табл. А5.2, занеся в нее основные характеристики измерительных приборов, используемых в процессе выполнения работы.

3.4. После согласования протокола испытаний с преподавателем ЭЦ обесточить и разобрать, проводники и мини-блоки убрать на место, рабочее место привести в порядок.

3.5. На основании полученных экспериментальных данных построить на рис. А5.2 зависимости  $I(C)$ ,  $U_k(C)$ ,  $U_C(C)$ ,  $P(C)$ .

### 4. Протокол испытаний и отчет о работе № 5

#### *Исследование электрической цепи с последовательным соединением катушки индуктивности и конденсатора при синусоидальных напряжениях*

4.1. Цель работы \_\_\_\_\_

---

---

---

---

4.2. Формулы и предварительные расчеты.

Условие резонанса напряжений: \_\_\_\_\_

Ток при резонансе  $I_{\text{рез}} =$  \_\_\_\_\_

Напряжения на элементах при резонансе:

$U_R =$  \_\_\_\_\_ ;  $U_L =$  \_\_\_\_\_ ;  $U_C =$  \_\_\_\_\_ .

4.3. Схема электрической цепи и таблицы.

$R_K =$  \_\_\_\_\_

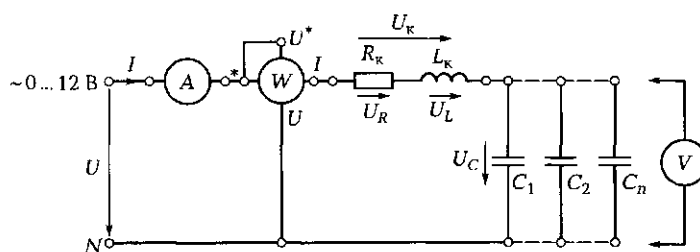


Рис. Л5.1. Схема ЭЦ для изучения резонанса напряжений

Таблица Л5.1					
$C$ , мкФ	$U$ , В	$I$ , мА	$U_K$ , В	$U_C$ , В	$P$ , мВт
0,22					
0,47					
0,69					
$C_{\text{рез}} = 1,0$					
1,22					
1,47					
1,69					

Таблица Л5.2			
Наименование прибора	Тип прибора	Класс точности	Номинальная величина

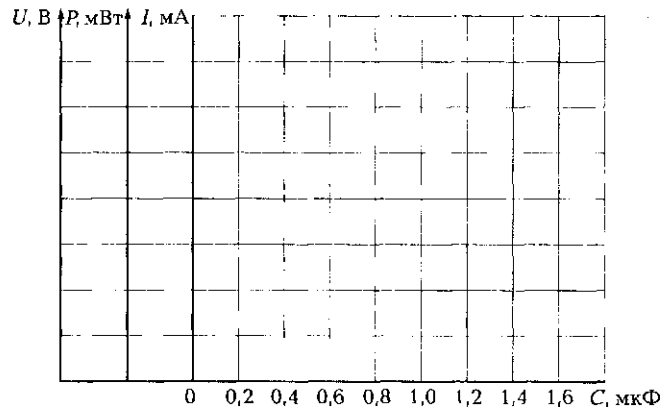


Рис. Л5.2. Графики изменения тока, напряжений и мощности в зависимости от емкости конденсатора

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_  
 Преподаватель \_\_\_\_\_

Таблица Л5.3					
C, мкФ	Z, Ом	Z <sub>к</sub> , Ом	X <sub>C</sub> , Ом	X <sub>L</sub> , Ом	cos φ
0,22					
0,47					
0,69					
C <sub>рез</sub> = 1,0					
1,22					
1,47					
1,69					

#### 4.4. Расчетно-графическая часть.

Формулы, используемые для обработки экспериментальных данных:

закон Ома:  $I = U/Z$ ;  $U_C = IX_C$ ;  $U_R = IZ_R$ ;

второй закон Кирхгофа:  $\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C$ ;

треугольник сопротивлений:  $Z = \sqrt{R_k^2 + (X_L - X_C)^2}$ ;  $Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_L^2}$ ;

$X_L = \omega L_k = 2\pi f L_k$ ;  $X_C = 1/(\omega C) = 1/(2\pi f C)$ ;  $\cos \varphi = R_k/Z$ ;  $P = UI \cos \varphi$ .

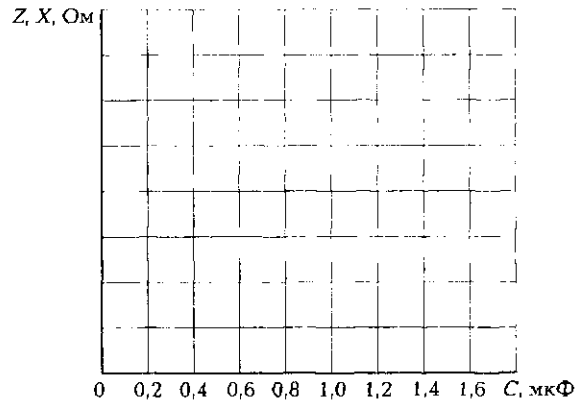


Рис. П5.3. Графики изменения сопротивлений в зависимости от емкости конденсатора

Векторная диаграмма  $m_U =$  \_\_\_\_\_ В/мм,  $m_I =$  \_\_\_\_\_ мА/мм.

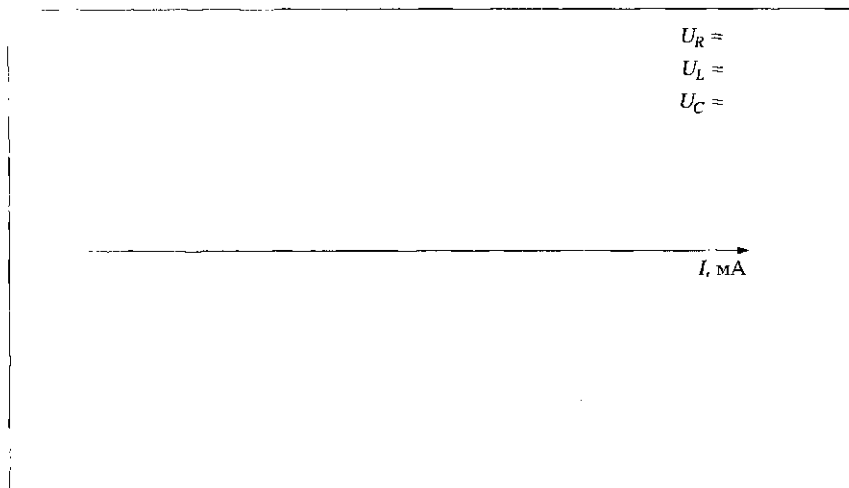


Рис. П5.4. Векторная диаграмма напряжений в ЭЦ с последовательным включением катушки индуктивности и конденсатора

4.5. Краткие выводы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_



## 5. Требования к расчетно-графической части отчета

5.1. На основании экспериментальных данных, занесенных в табл. Л5.1, вычислить для каждого значения  $C$  значения сопротивлений  $Z$ ,  $Z_k$ ,  $X_C$ . Результаты вычислений занести в табл. Л5.3. При резонансе определить активное сопротивление катушки  $R_k = Z = U/I$ , данные занести в протокол испытаний.

5.2. Используя результаты вычислений, построить в одной системе координат на рис. Л5.3 зависимости  $Z(C)$ ,  $Z_k(C)$  или  $X_L(C)$ ,  $X_C(C)$ .

5.3. Для одного из значений  $C$  в табл. Л5.3, отмеченного в протоколе преподавателем, построить на рис. Л5.4 векторные диаграммы напряжений и токов в соответствующем масштабе.

5.4. Сделать краткие выводы по работе.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Какие элементы и параметры ЭЦ оказывают влияние на резонанс напряжений?
2. Запишите условие возникновения резонанса напряжений.
3. Запишите следствия резонанса напряжений.
4. Укажите связь между полным, активным и реактивными сопротивлениями.
5. Изобразите с помощью векторной диаграммы момент резонанса напряжений.
6. Каков характер потребляемого цепью тока, если  $X_L$  больше (меньше)  $X_C$ ?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

---

### Исследования электрической цепи с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора при синусоидальных напряжениях

#### 1. Цель работы

1.1. Выявить влияние изменения емкости конденсатора на значения токов и мощности в электрической цепи.

1.2. Изучить явление *резонанса токов*.

1.3. Познакомиться с методами анализа ЭЦ с применением векторных диаграмм.

## 2. Объект и средства испытаний

Объектом испытаний является ЭЦ, содержащая конденсатор емкостью 1 мкФ и катушку индуктивности с активным сопротивлением  $R_k = 60$  Ом и индуктивностью  $L_k = 33$  мГн. Все элементы ЭЦ монтируются на наборном поле и могут быть включены в схему с помощью контактных гнезд и проводов со штекерами. Изменение емкости конденсатора осуществляется подключением параллельно к уже имеющемуся конденсатору с емкостью  $C_1$  конденсаторов с емкостями  $C_2, C_3, C_4$  или заменой конденсатора  $C_1$ .

Источником питания ЭЦ служит генератор синусоидальных колебаний с изменяющейся частотой и напряжением  $U = 0 \dots 12$  В.

Схема ЭЦ с включенными в нее измерительными приборами показана на рис. А6.1. В качестве измерительных приборов используются мультиметры, работающие в режимах амперметра (для измерения тока) и вольтметра (для измерения напряжения питания). Для измерения потребляемой ЭЦ активной мощности используется электронный ваттметр.

## 3. Порядок выполнения работы

3.1. Собрать ЭЦ в соответствии с рис. А6.1. Установить регулятор частоты в положение «1 000 Гц» и регулятор напряжения в положение  $U = 12$  В».

3.2. После проверки собранной ЭЦ преподавателем установить автоматы и выключатель УЗО в положение «Вкл.». Подать с помощью выключателя «Сеть» напряжение на ЭЦ, мультиметры и ваттметр. При этом должны загореться соответствующие сигнальные лампы.

Изменяя частоту генератора синусоидальных колебаний в большую или меньшую сторону от 1 000 Гц, добиться резонанса токов, на который укажет минимум тока. Занести показания всех приборов в соответствующую графу табл. А6.1 ( $C_{рез} = 1$  мкФ). Проверить, выполняется ли условие  $P = UI$  при резонансе. Изменяя емкость в большую и меньшую стороны от  $C_{рез} = 1$  мкФ, снять показания всех приборов еще при шести ее значениях, указанных в табл. А6.1. Данные занести в соответствующие графы табл. А6.1.

3.3. Заполнить табл. А6.2, занеся в нее основные характеристики измерительных приборов, используемых в процессе выполнения работы.

3.4. После согласования протокола испытаний с преподавателем ЭЦ обесточить и разобрать, проводники и мини-блоки убрать на место, рабочее место привести в порядок.

3.5. На основании полученных экспериментальных данных построить на рис. А6.2 зависимости  $I(C), I_L(C), I_C(C), P(C)$ .

#### 4. Протокол испытаний и отчет о работе № 6

##### Исследование электрической цепи с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора при синусоидальных напряжениях

4.1. Цель работы \_\_\_\_\_

---



---

4.2. Формулы и предварительные расчеты.

Условие резонанса токов: \_\_\_\_\_

Ток при резонансе  $I_{рез} = Uy = Ug =$  \_\_\_\_\_

Токи в ветвях при резонансе:  $I_L = Ub_L =$  \_\_\_\_\_ ;  $I_C = Ub_C =$  \_\_\_\_\_

4.3. Схема электрической цепи и таблицы.

$R_k =$  \_\_\_\_\_ Ом.

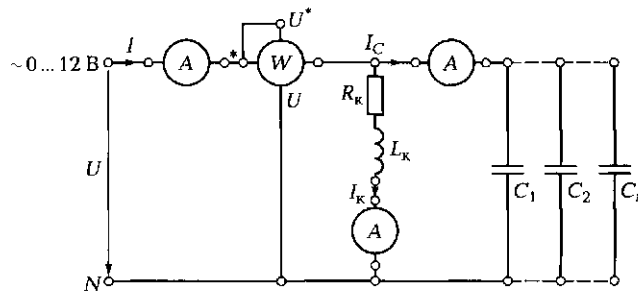


Рис. ЛБ.1. Схема ЭЦ для изучения резонанса токов

Таблица ЛБ.1				
$C$ , мкФ	$I$ , мА	$I_k$ , мА	$I_C$ , мА	$P$ , мВт
0,22				
0,47				
0,69				
$C_{рез} = 1,0$				
1,22				
1,47				
1,69				

Таблица ЛБ.2			
Наименование прибора	Тип прибора	Класс точности	Номинальная величина

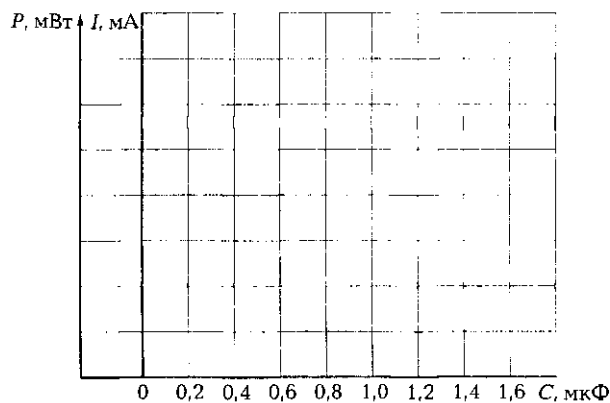


Рис. ЛБ.2. Графики изменения токов и мощности в зависимости от емкости конденсатора

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_  
 Преподаватель \_\_\_\_\_

#### 4.4. Расчетно-графическая часть.

Формулы, используемые для обработки экспериментальных данных:

закон Ома:  $I = Uy$ ,  $I_k = Uy_k \approx Ub_L \approx U/X_L$ ;  $I_C = Ub_C = U/X_C$ ;

первый закон Кирхгофа:  $\bar{I} = \bar{I}_k + \bar{I}_C$ ;

треугольник проводимостей:

$$y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}; y_k = \sqrt{g^2 + b_L^2};$$

$$X_L = 2\pi fL_k; X_C = 1/(2\pi fC); g = R_k/Z_k^2;$$

$$b_L = X_L/Z_k^2 \approx 1/X_L; b_C = 1/X_C;$$

$$Z = \sqrt{R_k^2 + (X_L - X_C)^2}; Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_L^2}; b_L = \sqrt{y_k^2 - g^2}.$$

Таблица ЛБ.3				
C, мкФ	y, См	b <sub>C</sub> , См	bL <sub>p</sub> , См	cos φ
0,22				
0,47				
0,69				
C <sub>рез</sub> = 1,0				
1,22				
1,47				
1,69				

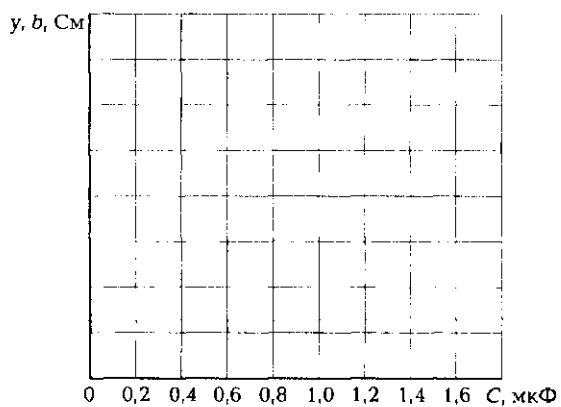


Рис. ЛБ.3. Графики изменения проводимостей в зависимости от емкости конденсатора

Векторная диаграмма  $m_U = \underline{\hspace{2cm}}$  В/мм,  $m_I = \underline{\hspace{2cm}}$  мА/мм.

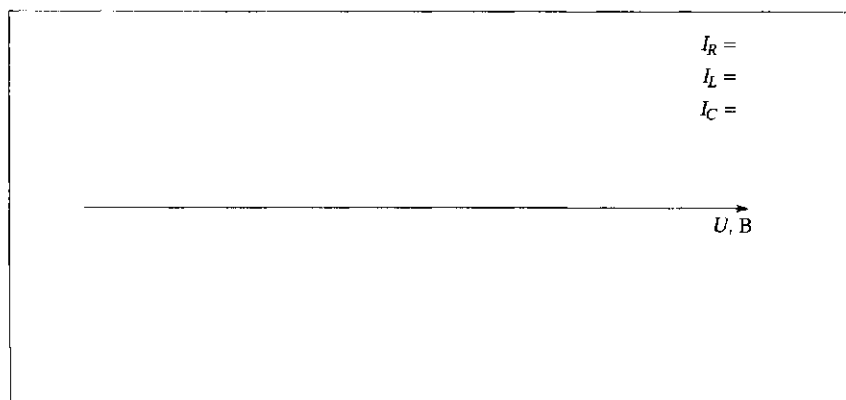


Рис. ЛБ.4. Векторная диаграмма токов в ЭЦ с параллельным включением катушки индуктивности и конденсатора

4.5. Краткие выводы \_\_\_\_\_

---

---

---

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

### 5. Требования к расчетно-графической части отчета

5.1. На основании экспериментальных данных, занесенных в табл. Лб.1, вычислить для каждого значения  $C$  значения проводимостей  $y$ ,  $b_L$ ,  $b_C$ . Результаты вычислений занести в табл. Лб.3. При резонансе определить активное сопротивление катушки  $R_x = Z = U/I$ , данные занести в протокол испытаний.

5.2. Используя результаты вычислений, построить в одной системе координат на рис. Лб.3 зависимости  $y(C)$ ,  $b_L(C)$ ,  $b_C(C)$ .

5.3. Для одного из значений  $C$  в табл. Лб.1, отмеченного в протоколе преподавателем, построить на рис. Лб.4 векторные диаграммы напряжений и токов в соответствующем масштабе.

5.4. Сделать краткие выводы по работе.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимается под резонансом токов?
2. Запишите условие возникновения и следствия резонанса токов.
3. Укажите связь между полной, активной и реактивной проводимостями.
4. Изобразите с помощью векторной диаграммы момент резонанса токов.
5. Каков характер потребляемой цепью мощности при резонансе?
6. Что такое коэффициент мощности?
7. Где используется явление резонанса токов?

# ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

## 3.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ. СПОСОБЫ СОЕДИНЕНИЯ ФАЗ ИСТОЧНИКОВ И ПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

### ТЕОРИЯ

#### 3.1.1. Основные понятия и определения

▶ Наибольшее распространение в современной электроэнергетике получили трехфазные цепи благодаря следующим преимуществам:

- высокий КПД и экономичность производства и передачи электроэнергии;
- возможность получения двух эксплуатационных напряжений — фазного и линейного;
- простота конструкции трехфазного асинхронного двигателя — основного приводного двигателя в промышленности.

▶ *Трехфазные цепи* — это такие цепи, в ветвях которых действуют три одинаковые по амплитуде и частоте синусоидальные ЭДС, сдвинутые по фазе друг относительно друга на угол  $120^\circ$ .

Каждую из однофазных цепей, входящих в трехфазную систему, принято называть *фазой* (это элемент трехфазной системы в отличие от угла сдвига векторов). Как и однофазная цепь, трехфазная состоит из генератора (трехфазного), линии передачи (трехфазной) и приемников (как трехфазных, так и однофазных).

Ранее было показано, что для получения однофазного синусоидального напряжения используется вращение рамки в магнитном поле. Если вращать постоянный магнит с угловой скоростью  $\omega$ , а вокруг него расположить обмотку, то в ней в соответствии с законом

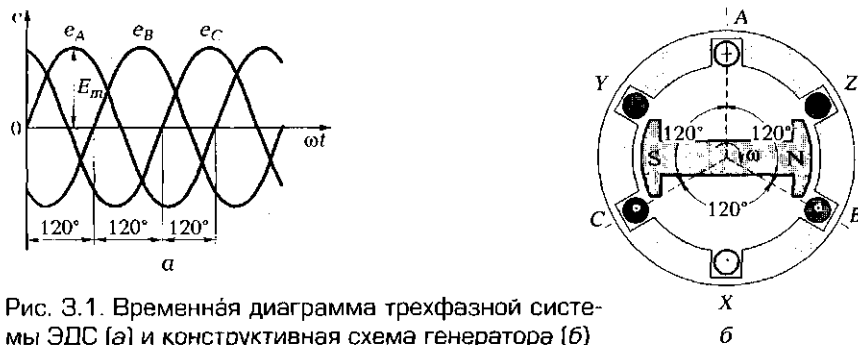


Рис. 3.1. Временная диаграмма трехфазной системы ЭДС (а) и конструктивная схема генератора (б)

электромагнитной индукции также будет наводиться синусоидальная ЭДС. Если три обмотки расположить под углом  $120^\circ$  друг относительно друга, то в них будут индуцироваться три синусоидальных ЭДС, сдвинутые на угол  $120^\circ$  (рис. 3.1, а). Поместив обмотки в пазы на внутренней поверхности полого стального цилиндра (статора — рис. 3.1, б), получим простейшую трехфазную машину переменного тока (в данном случае — генератор).

Начала фаз источника обозначают  $A, B, C$ , концы фаз —  $X, Y, Z$ . У приемников энергии начала фаз обозначают  $a, b, c$ , концы —  $x, y, z$ .

### 3.1.2. Способы соединения фаз источника

Трехфазный источник, как правило, включают по схеме *звезда*. При этом концы фаз  $X, Y, Z$  соединяют вместе, образуя нейтральную точку  $N$ , а начала фаз  $A, B, C$  подключают к проводам, идущим к нагрузке (рис. 3.2).

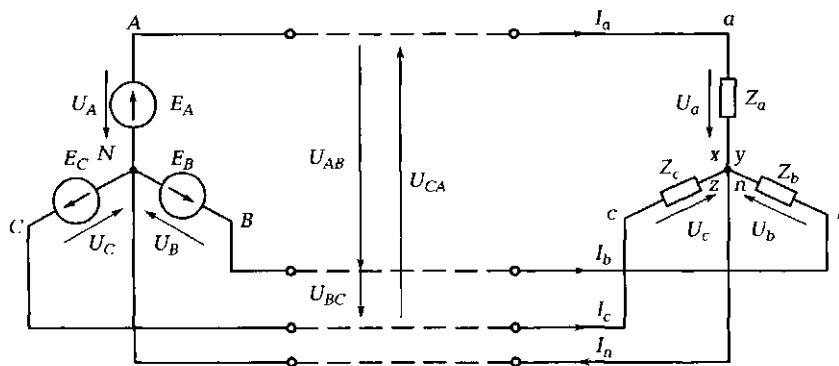


Рис. 3.2. Схема соединения звездой трехфазных источника и приемника



Эти провода называются линейными, а цепь — трехпроводной. Если нейтральная точка источника  $N$  соединена с нейтральной точкой приемника  $n$ , то цепь становится четырехпроводной, а четвертый провод носит название нейтрального.

Если ЭДС каждой фазы равны и сдвинуты друг относительно друга на угол  $120^\circ$ , система называется *симметричной*.

Приняв начальную фазу  $\psi$  фазы  $A$  равной нулю (см. рис. 3.1, *a*), можно выразить мгновенные значения ЭДС в фазах следующим образом:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ). \end{aligned}$$

Направление ЭДС в фазах принимается от конца к началу (от  $X$  к  $A$ ), а напряжения — от начала к концу (рис. 3.3, *a*). Векторная диаграмма трехфазной системы ЭДС имеет вид, показанный на рис. 3.3, *б*. Из нее следует, что для симметричной трехфазной системы геометрическая сумма векторов ЭДС всех фаз равна нулю:

$$\vec{E}_A + \vec{E}_B + \vec{E}_C = 0.$$

Соответственно равна нулю в любой момент времени и алгебраическая сумма мгновенных значений ЭДС генератора:

$$e_A + e_B + e_C = 0.$$

В трехфазной цепи при соединении звездой следует различать:

- $E_A, E_B, E_C$  — фазные ЭДС источника;
- $U_A, U_B, U_C$  — фазные напряжения источника;
- $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  — линейные напряжения источника;
- $I_A, I_B, I_C$  — фазные и линейные токи источника;
- $U_a, U_b, U_c$  — фазные напряжения нагрузки;
- $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  — линейные напряжения нагрузки;

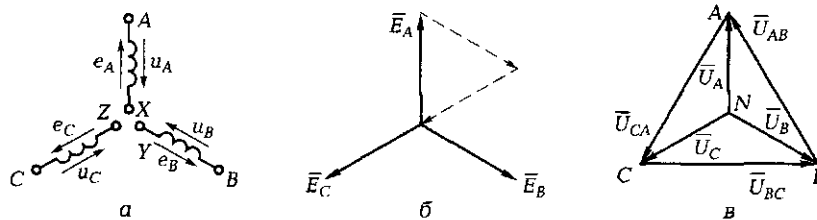


Рис. 3.3. Три фазы генератора (*a*); векторная диаграмма ЭДС (*б*); векторная диаграмма фазных и линейных напряжений (*в*)

$I_a, I_b, I_c$  — фазные и линейные токи нагрузки;  
 $I_n$  — ток в нейтральном проводе;  
 $U_{nN}$  — напряжение смещения нейтрали.

Для схемы ЭЦ, показанной на рис. 3.2, в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать:

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A - \bar{U}_B;$$

$$\bar{U}_{BC} = \bar{U}_B - \bar{U}_C;$$

$$\bar{U}_{CA} = \bar{U}_C - \bar{U}_A.$$

Трехфазный источник всегда представляет собой симметричную систему независимо от величины и характера нагрузки, так как внутреннее сопротивление его ничтожно мало. Векторная диаграмма напряжений источника показана на рис. 3.3, в. Из диаграммы следует, что линейные и фазные напряжения связаны зависимостью

$$U_\lambda = \sqrt{3} U_\phi.$$

Государственным стандартом предусмотрены номинальные значения линейных  $U_\lambda$  (в том числе 660, 380, 220 В) и фазных  $U_\phi$  (380, 220, 127 В) напряжений. Можно убедиться, что для них выполняется указанная зависимость:  $660/380 = 380/220 = 220/127 = \sqrt{3}$ .

➡ При соединении фаз генератора *треугольником* начало одной фазы подключают к концу другой, в результате чего образуется последовательное соединение фаз источника (рис. 3.4, а).

Это не короткое замыкание, так как сумма мгновенных значений ЭДС, сдвинутых друг относительно друга на  $120^\circ$ , в любой момент времени равна нулю. При соединении треугольником векторы фазных и линейных напряжений источника совпадают (рис. 3.4, б):  $U_A = U_{AB}$ ,  $U_B = U_{BC}$ ,  $U_C = U_{CA}$ .

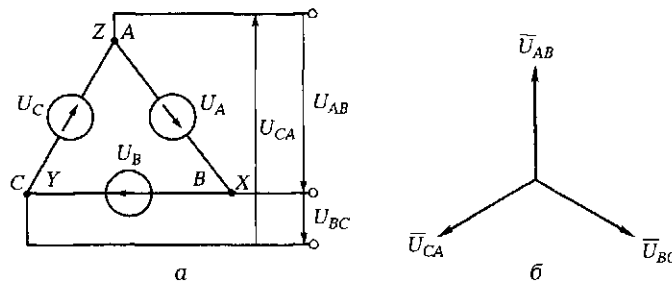


Рис. 3.4. Соединение фаз источника треугольником:  
а — схема; б — векторная диаграмма

Последовательность в обозначении фаз  $A, B, C$  не случайна, так как она определяет последовательность изменений фазных ЭДС, а значит, как мы это увидим далее, и направление вращения трехфазных электродвигателей.

### 3.1.3. Виды нагрузок. Соединение фаз нагрузки треугольником

В трехфазных цепях нагрузка может быть:

- *симметричной*, когда полные сопротивления в фазах равны ( $Z_a = Z_b = Z_c$ ) и характер их одинаков ( $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$ ). Примером могут служить трехфазные асинхронные или синхронные двигатели, обмотки статора которых имеют одинаковые значения как активных, так и индуктивных сопротивлений;
- *равномерной*, когда полные сопротивления в фазах равны ( $Z_a = Z_b = Z_c$ ), но характер их различен ( $\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$ ). Например, в одну фазу включена активная нагрузка, в другую — индуктивная, в третью — емкостная, равные друг другу по модулю;
- *однородной*, когда характер нагрузки в фазах одинаков ( $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$ ), но полные сопротивления различны ( $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$ ). Примером такой нагрузки может служить осветительная сеть промышленных и бытовых зданий, когда во всех фазах включены осветительные лампы, но число их различно.

Равномерная и однородная нагрузки относятся к *несимметричной* нагрузке.

При соединении нагрузки *треугольником* в случае пренебрежимо малого сопротивления проводов напряжения приемника становятся равными напряжениям источника. При этом фазные напряжения равны линейным, а в ЭЦ текут токи двух видов: фазные  $I_\phi$  ( $I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}$ ) и линейные  $I_\lambda$  ( $I_a, I_b, I_c$ ) (рис. 3.5, а).

Соотношение между  $I_\phi$  и  $I_\lambda$  найдем с помощью векторной диаграммы (рис. 3.5, б), записав в соответствии с первым законом Кирхгофа для ЭЦ (см. рис. 3.5, а):

$$\bar{I}_a = \bar{I}_{ab} - \bar{I}_{ca};$$

$$\bar{I}_b = \bar{I}_{bc} - \bar{I}_{ab};$$

$$\bar{I}_c = \bar{I}_{ca} - \bar{I}_{bc}.$$

Для симметричной нагрузки на основе показанной векторной диаграммы может быть сделан вывод, что векторы фазных токов сдвинуты друг относительно друга на  $120^\circ$ . Векторы линейных то-

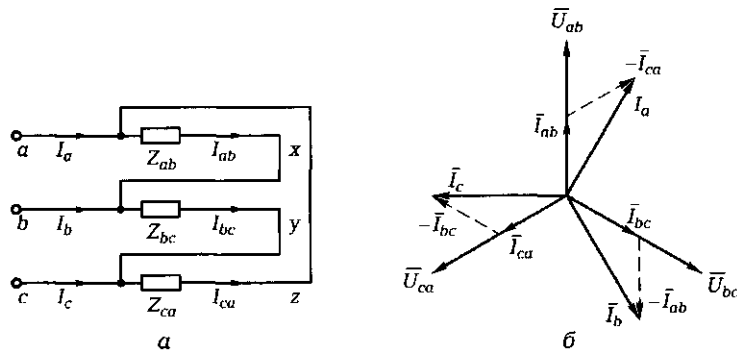


Рис. 3.5. Соединение фаз нагрузки треугольником:  
 а — схема ЭЦ; б — векторная диаграмма

ков также сдвинуты между собой на угол  $120^\circ$ , а относительно векторов фазных токов — на угол  $30^\circ$ .

Линейные и фазные токи связаны соотношением

$$I_\lambda = \sqrt{3} I_\phi.$$

Для известных  $U_\phi$  и  $I_\phi$  могут быть определены активная, реактивная и полная мощности, потребляемые каждой фазой:

$$P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi; Q_\phi = U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi; S_\phi = U_\phi I_\phi.$$

Мощности, потребляемые симметричной трехфазной нагрузкой:

$$P_{\text{ЭЦ}} = 3P_\phi; Q_{\text{ЭЦ}} = 3Q_\phi; S_{\text{ЭЦ}} = 3S_\phi.$$

Для линейных напряжений и токов

$$P_{\text{ЭЦ}} = \sqrt{3} U_\lambda I_\lambda \cos \varphi_\phi; Q_{\text{ЭЦ}} = \sqrt{3} U_\lambda I_\lambda \sin \varphi_\phi; S_{\text{ЭЦ}} = \sqrt{3} U_\lambda I_\lambda.$$

Если сопротивления фаз не равны между собой (нагрузка несимметрична), то расчет трехфазной ЭЦ должен вестись для каждой фазы, поскольку фазные токи, фазные мощности, углы сдвига фаз в общем случае различны.

☛ Значения фазных и линейных токов, а также мощностей при известных значениях фазных или линейных напряжений и фазных сопротивлений могут быть найдены с помощью векторной диаграммы.

Указанные параметры определяют в такой последовательности.

1. Строят звезду фазных напряжений в масштабе  $m_U$  (В/мм).
2. Определяют углы сдвига фаз между фазными напряжениями и токами:  $\cos \varphi_\phi = R_\phi / Z_\phi$ , т. е.  $\cos \varphi_{ab} = R_{ab} / Z_{ab}$  и т. д.
3. Находят действующие значения фазных токов:  $I_\phi = U_\phi / Z_\phi$ .

4. Под соответствующими углами  $\varphi_{ab}$ ,  $\varphi_{bc}$ ,  $\varphi_{ca}$  к векторам фазных напряжений  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  строят в масштабе  $m_I$  (А/мм) векторы фазных токов  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$ ,  $I_{ca}$ .

5. Соединив концы векторов фазных токов, определяют действующие значения линейных токов  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ .

6. Находят активные, реактивные и полные мощности каждой фазы. Суммарная активная мощность трехфазной ЭЦ  $P_{ЭЦ} = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}$ ; реактивная  $Q_{ЭЦ} = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca}$ ; полная  $S_{ЭЦ} = S_{ab} + S_{bc} + S_{ca}$ . При этом следует помнить, что реактивная мощность цепи с индуктивной нагрузкой положительна, а с емкостной — отрицательна.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. Мгновенное значение напряжения генератора в фазе А равно  $u_A = 311 \sin(\omega t + 30^\circ)$ . Напишите выражения для мгновенных значений напряжений в фазах В и С и определите действующие значения фазных и линейных напряжений на нагрузке в трехфазной симметричной системе при соединении нагрузки звездой и треугольником. Изобразите векторную диаграмму напряжений.

*Решение.* В фазах В и С углы сдвига фаз по отношению к фазе А составят:

$$\varphi_B = (30 - 120) = -90^\circ; \varphi_C = (30 - 240) = -210^\circ.$$

Мгновенные значения напряжений в фазах В и С:

$$u_B = 311 \sin(\omega t - 90^\circ); u_C = 311 \sin(\omega t - 210^\circ).$$

Действующие значения напряжений при соединении звездой:

$$U_\phi = U_{\phi \max} / \sqrt{2} = 311 / \sqrt{2} = 220 \text{ В}; U_\lambda = \sqrt{3} U_\phi = \sqrt{3} \cdot 220 \approx 380 \text{ В}.$$

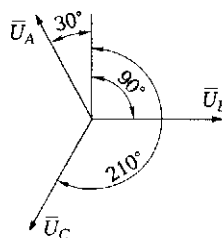


Рис. 3.6. Векторная диаграмма напряжений к задаче 1 подразд 3.1

При соединении нагрузки треугольником линейное напряжение источника становится равным фазному напряжению на нагрузке:  $U_\lambda = U_\phi = 380 \text{ В}$ .

Векторную диаграмму строим относительно вертикальной оси, выбрав масштаб напряжения  $m_U = 10 \text{ В/мм}$  (рис. 3.6). В этом случае длина каждого вектора напряжения равна 22 мм.

*Ответ.* Мгновенные значения напряжений в фазах В и С:

$$u_B = 311 \sin(\omega t - 90^\circ); u_C = 311 \sin(\omega t - 210^\circ).$$

Действующее значение линейного напряжения равно 380 В, фазного напряжения при соединении звездой — 220 В, при соединении треугольником — 380 В.

2. Нарисуйте схему включения трех ламп в трехфазную сеть треугольником.

*Решение.* При включении треугольником конец одной фазы (x) соединяют с началом второй (b), конец второй (y) — с началом третьей (c), конец третьей (z) — с началом первой (a). Начала фаз (a, b, c) подключают к линейным проводам (A, B, C). Схема показана на рис. 3.7.

3. Трехфазный генератор работает на симметричную нагрузку. Коэффициент мощности генератора — 0,8, полное сопротивление нагрузки каждой фазы — 10 Ом, фазный ток — 10 А. Определите активную мощность, потребляемую нагрузкой.

*Решение.* Активная мощность, потребляемая каждой фазой,  $P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = I_{\phi}^2 Z_{\phi} \cos \varphi_{\phi}$ . Для полной симметричной нагрузки потребляемая тремя фазами активная мощность

$$P_{\text{н}} = 3P_{\phi} = 3I_{\phi}^2 Z_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = 3 \cdot 10^2 \cdot 10 \cdot 0,8 = 2400 \text{ Вт.}$$

*Ответ:* активная мощность, потребляемая нагрузкой, равна 2400 Вт.

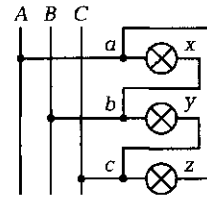


Рис. 3.7. Схема включения ламп в трехфазную сеть треугольником (к задаче 2 подразд. 3.1)

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

4. Обмотки генератора соединены звездой. Пользуясь векторной диаграммой, показанной на рис. 3.8, напишите выражение для мгновенного значения линейного напряжения  $u_{CA}$ , если мгновенное значение фазного напряжения  $u_A = 311 \sin(\omega t + 30^\circ)$ .

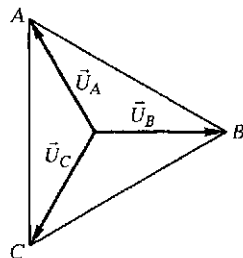


Рис. 3.8. Векторная диаграмма к задаче 4 подразд. 3.1

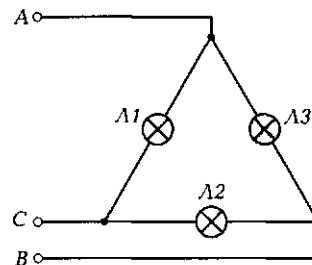


Рис. 3.9. Схема соединения ламп к задачам 6 и 7 подразд. 3.1

5. Три лампы мощностью по 100 Вт включены треугольником в трехфазную сеть напряжением 220 В. Определите линейные токи в ЭЦ.

6. Из трех ламп мощностью по 100 Вт, включенных треугольником в трехфазную сеть напряжением 220 В, одна сгорела (например, Л3 на рис. 3.9). Как изменятся линейные токи в ЭЦ?

7. Из трех ламп мощностью по 100 Вт, включенных треугольником в трехфазную сеть напряжением 220 В, одна сгорела (например, Л3 на рис. 3.9) и была заменена лампой мощностью 200 Вт. Как изменятся линейные токи в ЭЦ?

8. Потребляемая трехфазной нагрузкой полная мощность  $S = 1000 \text{ В} \cdot \text{А}$ , реактивная мощность  $Q = 600 \text{ вар}$ . Чему равен коэффициент мощности?

### КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Зачем понадобилось создавать трехфазную электрическую цепь:
  - а) для подключения трехфазного трансформатора;
  - б) получения вращающегося магнитного поля;
  - в) чтобы можно было соединять обмотки звездой и треугольником;
  - г) для повышения надежности ЭЦ?
2. Какой из токов больше в трехфазной симметричной ЭЦ, соединенной треугольником: линейный или фазный:
  - а) линейный;
  - б) фазный;
  - в) токи одинаковы;
  - г) трудно сказать?
3. Какое напряжение больше в трехфазной симметричной ЭЦ, соединенной треугольником: линейное или фазное:
  - а) линейное;
  - б) фазное;
  - в) напряжения одинаковы;
  - г) трудно сказать?
4. Напряжения и между линейными проводами, и между началами двух фаз, и между концами двух фаз одинаковы: По какой схеме включена нагрузка:
  - а) звезда с нейтральным проводом;
  - б) звезда без нейтрального провода;
  - в) треугольник;
  - г) треугольник с нейтральным проводом?

5. Обмотки трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при пуске для снижения пусковых токов часто включают звездой, а после разгона переключают на соединение треугольником: Зачем это делается:

- а) для повышения надежности;
- б) удобства обслуживания;
- в) увеличения развиваемой мощности;
- г) чтобы убрать нейтральный провод?

## 3.2. СОЕДИНЕНИЕ ФАЗ НАГРУЗКИ ЗВЕЗДОЙ. МОЩНОСТЬ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

### ТЕОРИЯ

#### 3.2.1. Симметричная нагрузка, включенная звездой

При соединении фаз приемника звездой для четырехпроводной трехфазной системы с нейтральным проводом (рис. 3.10, а)

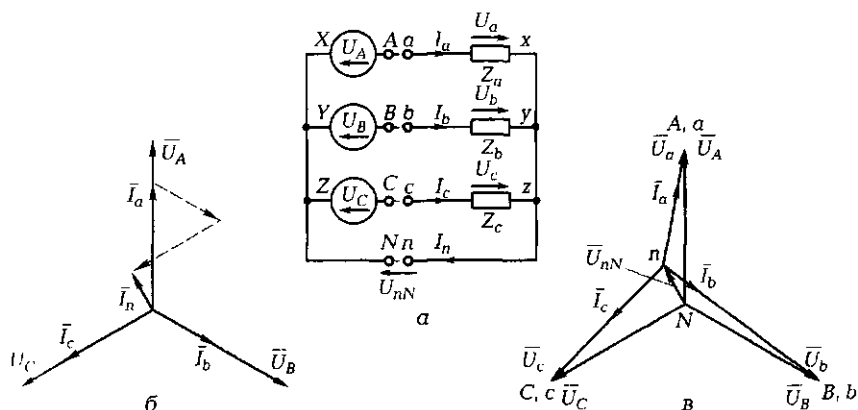


Рис. 3.10. Соединение фаз нагрузки звездой:

а — схема ЭЦ; б — векторная диаграмма напряжений и токов для четырехпроводной ЭЦ с активной нагрузкой; в — векторная диаграмма напряжений и токов для трехпроводной ЭЦ



$$U_{\phi} = U_{\lambda} / \sqrt{3} \text{ и } I_{\phi} = I_{\lambda}.$$

Ток в нейтральном проводе в соответствии с первым законом Кирхгофа определяется как геометрическая сумма векторов

$$\vec{I}_n = \vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c.$$

Поскольку при симметричной нагрузке  $I_a = I_b = I_c$ , то  $I_n = 0$ , т. е. нейтральный провод не нужен. Следовательно, обрыв нейтрального провода не приведет к каким-либо изменениям в ЭЦ.

Активная, реактивная и полная мощности цепи определяются выражениями

$$P_{\text{ЭЦ}} = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3}U_{\lambda}I_{\lambda} \cos \varphi_{\phi};$$

$$Q_{\text{ЭЦ}} = 3U_{\phi}I_{\phi} \sin \varphi_{\phi} = \sqrt{3}U_{\lambda}I_{\lambda} \sin \varphi_{\phi};$$

$$S_{\text{ЭЦ}} = 3U_{\phi}I_{\phi} = \sqrt{3}U_{\lambda}I_{\lambda}.$$

### 3.2.2. Несимметричная нагрузка, включенная звездой. Роль нейтрального провода

☛ При наличии *нейтрального провода* фазные напряжения приемника равны фазным напряжениям источника:

$$U_a = U_A; U_b = U_B; U_c = U_C.$$

Таким образом, фазные напряжения приемника равны между собой и не зависят от величины нагрузки в фазах. При этом остается справедливым соотношение  $U_{\phi} = U_{\lambda} / \sqrt{3}$ .

Фазные токи определяются величиной нагрузки в фазах и в общем случае не равны между собой:

$$I_a = U_a / Z_a; I_b = U_b / Z_b; I_c = U_c / Z_c.$$

При построении векторной диаграммы векторы фазных токов откладывают под соответствующими углами  $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$  ( $\cos \varphi_{\phi} = R_{\phi} / Z_{\phi}$ ) относительно векторов фазных напряжений. Как видно из показанной на рис. 3.10, б диаграммы для четырехпроводной ЭЦ с активной нагрузкой ( $\varphi_{\phi} = 0$ , т. е. направления векторов тока и напряжения в каждой фазе совпадают), при несимметричной нагрузке в нейтральном проводе появляется ток  $I_n$ , который может быть определен с помощью векторной диаграммы.

☛ Обрыв нейтрального провода приводит к появлению напряжения смещения нейтрали  $U_{nN}$ , что в свою очередь ведет к нарушению равенства фазных напряжений — «перекосу» фаз (рис. 3.10, в).

В соответствии со вторым законом Кирхгофа для контура  $\Lambda XN\lambda x a$  (см. рис. 3.10, а)  $\bar{U}_a = \bar{U}_A - \bar{U}_{nN}$ ; для контура  $BYN\lambda y b$   $\bar{U}_b = \bar{U}_B - \bar{U}_{nN}$ ; для контура  $CZN\lambda z c$   $\bar{U}_c = \bar{U}_C - \bar{U}_{nN}$ .

Мощность (активная, реактивная или полная) цепи при несимметричной нагрузке определяется как сумма соответствующих мощностей каждой фазы:

$$P_{ЭЦ} = P_a + P_b + P_c;$$

$$Q_{ЭЦ} = Q_a + Q_b + Q_c;$$

$$S_{ЭЦ} = S_a + S_b + S_c.$$

➤ Применение трехпроводной ЭЦ с несимметричной нагрузкой, включенной звездой, недопустимо, поскольку «перекос» фаз в нагрузке ведет к изменению режимов работы оборудования и может вывести его из строя.

Использование нейтрального провода при соединении приемников звездой позволяет отсимметризовать фазные напряжения и не допускать их изменения при изменении нагрузки в фазах.

### 3.2.3. Мощность трехфазной электрической цепи и методы ее измерения

Для симметричной четырехпроводной системы мощность, потребляемая трехфазным приемником, равна утроенной мощности, потребляемой каждой фазой. Таким образом, для измерения мощности трехфазной четырехпроводной ЭЦ достаточно определить мощность одной фазы (рис. 3.11, а), а затем показания ваттметра умножить на три. Вращающий момент подвижной части ваттметра пропорционален активной мощности системы:  $M_{вр} = kUI \cos \varphi$ . Ваттметр включают таким образом, чтобы по его токовой катушке про-

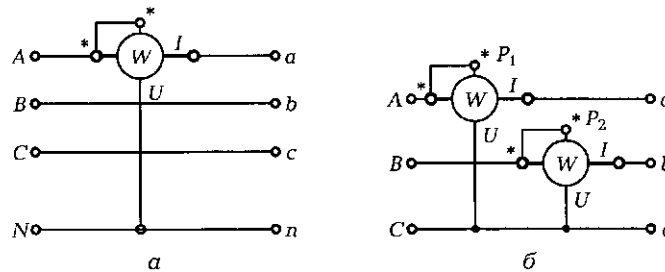


Рис. 3.11. Измерение мощности в симметричной четырехпроводной (а) и несимметричной трехпроводной (б) трехфазных ЭЦ

текал фазный ток, а катушка напряжения была подключена параллельно фазной нагрузке. При этом зажимы прибора, обозначенные знаком \*, должны быть соединены.

Мощность несимметричной четырехпроводной системы измеряют с помощью трех ваттметров, включаемых каждый в свою фазу. В этом случае полная активная мощность, потребляемая ЭЦ, равна сумме показаний всех ваттметров.

Для несимметричной трехпроводной системы измерение мощности может быть выполнено способом двух ваттметров (рис. 3.11, б). При этом ваттметры включают так, чтобы по их токовым катушкам протекал линейный ток, а к катушкам напряжения были подведены линейные напряжения.

В данном случае мгновенная мощность может быть определена как сумма двух мощностей, равных произведению линейных напряжений на линейные токи. Если от мгновенной мощности перейти к активной и выразить мгновенные значения через действующие  $U$  и  $I$ , то  $P_{\text{ЭЦ}} = P_1 + P_2$ .

Промышленность выпускает трехфазные ваттметры, предназначенные для измерения мощности в трех- или четырехпроводной системе (по способу двух или трех ваттметров).

### 3.2.4. Методы расчета трехфазных электрических цепей

Когда трехфазная нагрузка *симметрична*, расчет системы выполняют для одной фазы. При этом задаются значениями линейного напряжения  $U_{\Lambda}$  и нагрузки в фазах  $Z_{\Phi} = \sqrt{R_{\Phi}^2 + (X_{L\Phi} - X_{C\Phi})^2}$ .

Если приемники с нагрузкой  $Z_{\Phi}$  соединены звездой и включены на линейное напряжение  $U_{\Lambda}$ , то

$$U_{\Phi} = \frac{U_{\Lambda}}{\sqrt{3}}; \quad I_{\Lambda} = I_{\Phi}; \quad I_{\Phi} = \frac{U_{\Phi}}{Z_{\Phi}} = \frac{U_{\Lambda}}{\sqrt{3}Z_{\Phi}}; \quad \cos\varphi_{\Phi} = \frac{R_{\Phi}}{Z_{\Phi}}.$$

Полная мощность, потребляемая ЭЦ:

$$S_{\text{ЭЦ}}^{\Lambda} = 3S_{\Phi} = 3\frac{U_{\Phi}^2}{Z_{\Phi}} = \frac{U_{\Lambda}^2}{Z_{\Phi}}.$$

Если нагрузка соединена треугольником и включена на то же линейное напряжение  $U_{\Lambda}$ , то

$$U_{\Lambda} = U_{\Phi}; \quad I_{\Lambda} = \sqrt{3}I_{\Phi}; \quad I_{\Phi} = \frac{U_{\Phi}}{Z_{\Phi}} = \frac{U_{\Lambda}}{Z_{\Phi}}; \quad \cos\varphi_{\Phi} = \frac{R_{\Phi}}{Z_{\Phi}}.$$

Полная мощность

$$S_{\text{ЭЦ}}^{\Lambda} = 3S_{\Phi} = 3 \frac{U_{\Phi}^2}{Z_{\Phi}} = 3 \frac{U_{\Lambda}^2}{Z_{\Phi}}$$

Активная и реактивная мощности при этом

$$P_{\text{ЭЦ}} = S_{\text{ЭЦ}} \cos \varphi_{\Phi};$$

$$Q_{\text{ЭЦ}} = S_{\text{ЭЦ}} \sin \varphi_{\Phi}.$$

☛ При одном и том же линейном напряжении мощность, потребляемая нагрузкой (например, электродвигателем), фазы которой соединены треугольником, в 3 раза больше, чем при соединении фаз звездой. Соответственно в 3 раза больше и развиваемая мощность.

Если нагрузка *несимметрична* и приемники соединены звездой с нейтральным проводом, расчет ведут для каждой фазы отдельно в такой последовательности:

- вычисляют фазные токи ( $I_a = U_a / Z_a$  и т. д.);
- вычисляют фазные углы сдвига векторов ( $\cos \varphi_a = R_a / Z_a$  и т. д.);
- строят векторную диаграмму фазных напряжений и токов;
- по векторной диаграмме определяют ток в нейтральном проводе  $I_n$ ;
- вычисляют потребляемую ЭЦ мощность как сумму фазных мощностей.

Если нагрузка несимметрична и приемники соединены треугольником, расчет выполняют аналогично для каждой фазы. Линейные токи определяют графически по векторной диаграмме.

В качестве примера рассмотрим алгоритмы расчета трехфазной трехпроводной ЭЦ с несимметричной нагрузкой, включенной звездой.

**Первый вариант.** По заданным линейному напряжению  $U_{\Lambda}$  и нагрузке в фазах (как правило, активной:  $R_a, R_b, R_c$ ) методом последовательных приближений с помощью векторной диаграммы напряжений и токов (учитывая, что  $\vec{I}_n = \vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c = 0$ ) определяем напряжение смещения нейтрали  $U_{nN}$  и ожидаемые фазные напряжения на нагрузке  $U_a, U_b, U_c$ . При этом следует помнить, что нейтральная точка  $n$  смещается в область, ограниченную векторами фазных напряжений тех фаз, где сопротивления наименьшие.

Пусть дана трехпроводная ЭЦ с различной ламповой нагрузкой в фазах (рис. 3.12, а). Необходимо определить фазные напряжения на нагрузке.

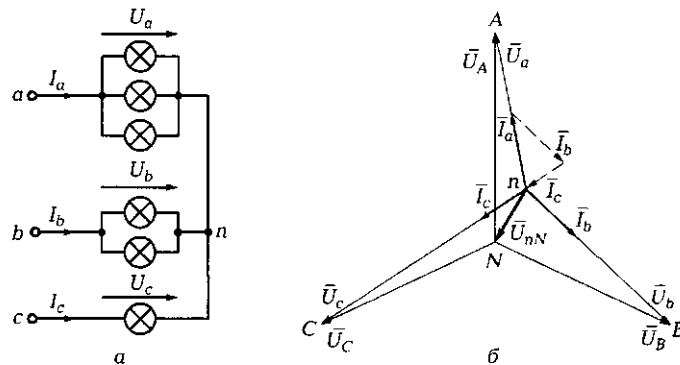


Рис. 3.12. Трехпроводная трехфазная ЭЦ с несимметричной нагрузкой: а — схема ЭЦ; б — векторная диаграмма напряжений и токов

Расчет выполняем в такой последовательности:

- строим в масштабе  $m_U$  звезду фазных напряжений генератора  $U_A = U_B = U_C = U_\lambda / \sqrt{3}$  (рис. 3.12, б);
- выбираем с учетом изложенных ранее рекомендаций положение точки  $n$  и, соединив ее с точками  $A, B, C$ , находим предварительные значения фазных напряжений на нагрузке  $U_a, U_b, U_c$ ;
- вычисляем фазные токи  $I_a = U_a / R_a$ ;  $I_b = U_b / R_b$ ;  $I_c = U_c / R_c$  и строим в масштабе  $m_I$  векторную диаграмму токов;
- проверяем, выполняется ли равенство  $\vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c = 0$ . Если оно не выполняется, переносим точку  $n$  в другое место и вновь повторяем описанные действия. После того как равенство будет выполнено, соединяем точку  $n$  с  $N$  и определяем напряжение смещения нейтрали  $U_{nN}$ , а также фазные напряжения на нагрузке  $U_a, U_b, U_c$ .

**Второй вариант.** По полученным экспериментально фазным напряжениям  $U_a, U_b, U_c$ , фазным токам  $I_a, I_b, I_c$  и линейному напряжению  $U_\lambda$  строим векторные диаграммы для несимметричной активной нагрузки в фазах в такой последовательности:

- из точки  $N$  в масштабе  $m_U$  строим звезду фазных напряжений генератора  $U_A, U_B, U_C$ ;
- для *трехпроводной* линии из точек  $A, B, C$ , делая засечки циркулем, откладываем в том же масштабе значения фазных напряжений приемника  $U_a, U_b, U_c$  и находим положение нейтральной точки приемника  $n$ . Соединив точки  $n$  и  $N$ , получаем вектор напряжения смещения нейтрали  $\vec{U}_{nN}$ ;
- в масштабе  $m_I$  из точки  $n$  строим векторную диаграмму фазных токов  $I_a, I_b, I_c$ . Их геометрическая сумма должна быть равна нулю

(при активной нагрузке вектор фазного тока совпадает по направлению с вектором фазного напряжения).

Для четырехпроводной линии  $\vec{U}_{nN} = 0$ , т.е. точка  $n$  совпадает с точкой  $N$ . Поэтому векторную диаграмму токов в масштабе  $m_I$  строим из точки  $N$ . Геометрическая сумма токов в этом случае определяет значение тока в нейтральном проводе  $I_n$ . При симметричной нагрузке эта сумма равна нулю, а при несимметричной ток в нейтральном проводе не равен нулю и может быть найден по векторной диаграмме.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. Определите линейный ток, потребляемый трехфазным асинхронным электродвигателем с номинальной мощностью 50 кВт, линейным напряжением 6 кВ и коэффициентом мощности 0,8.

*Решение.* Трехфазный асинхронный электродвигатель представляет собой симметричную нагрузку, поэтому для расчета можно воспользоваться выражением  $P_{\text{эл}} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi_{\text{п}}$ , откуда  $I_{\text{л}} = P_{\text{эл}} / (\sqrt{3} U_{\text{л}} \cos \varphi_{\text{п}}) = 50 / (\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,8) = 6 \text{ А}$ .

*Ответ.* Линейный ток, потребляемый электродвигателем, равен 6 А.

2. В трехпроводной ЭЦ с симметричной нагрузкой, соединенной звездой, закоротилась одна из фаз, например  $C$  (рис. 3.13, а). Что произойдет в двух оставшихся фазах?

*Ответ.* Фазное напряжение возрастет до линейного. Действительно, при закорачивании одной из фаз нейтральная точка  $n$  переместится в начало закороченной фазы (в точку  $c$ ), которая станет точкой  $n_1$ . А это значит, что фазные напряжения  $U_a$  и  $U_b$  станут равными линейным  $U_{ca}$  и  $U_{bc}$  (рис. 3.13, б).

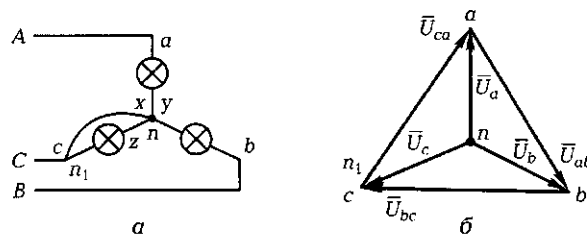


Рис. 3.13. Схема ЭЦ (а) и векторная диаграмма напряжений (б) к задаче 2 подразд. 3.2

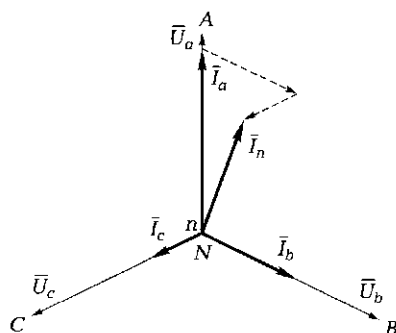


Рис. 3.14. Векторная диаграмма фазных напряжений и токов к задаче 3 подразд. 3.2

3. Трехэтажный загородный дом получает электроэнергию от трехфазного трансформатора с линейным напряжением  $U_\lambda = 380$  В. Всю нагрузку (осветительные приборы, электроплиты, нагревательные приборы, видео- и радиоаппаратура, другую электроаппаратуру «умного дома») можно считать чисто активной.

Первый этаж подключен к фазе *A* и потребляет мощность  $P_a = 8,8$  кВт; второй этаж — к фазе *B* ( $P_b = 4,4$  кВт), третий — к фазе *C* ( $P_c = 2,2$  кВт).

Определите ток в нейтральном проводе  $I_{nN}$  и укажите, что произойдет при обрыве нейтрального провода.

*Решение.* Вычисляем фазные напряжения:  $U_\phi = U_\lambda / \sqrt{3} = 220$  В.

Находим фазные токи, учитывая чисто активный характер нагрузки ( $\cos \varphi = 0$ ):  $I_a = P_a / U_\phi = 8\,800 / 220 = 40$  А;  $I_b = P_b / U_\phi = 4\,400 / 220 = 20$  А;  $I_c = P_c / U_\phi = 2\,200 / 220 = 10$  А.

Строим векторную диаграмму фазных напряжений и токов, приняв масштаб токов  $m_I = 1,0$  А/мм (рис. 3.14).

В соответствии с первым законом Кирхгофа для точки *n* строим топографическую диаграмму токов и определяем ток в нейтральном проводе:  $I_n = m_I \cdot 23 \text{ мм} = 23$  А.

*Ответ.* В нейтральном проводе течет ток  $I_n = 23$  А. При обрыве нейтрального провода произойдет «перекос» фаз и нейтральная точка приемника *n* сместится на диаграмме в направлении вектора тока  $I_n$ . Это приведет к тому, что напряжение на фазе *A* уменьшится и лампы будут светить слабо, а напряжение на фазе *C* резко возрастет и лампы, скорее всего, перегорят.

Электропроводка дома выполнена неверно. Необходимо было спроектировать ее так, чтобы нагрузки трех фаз были одинаковыми.

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

4. К выводам четырехпроводной трехфазной цепи приложено линейное напряжение 380 В. Сопротивления фаз равны 10, 10 и 20 Ом. Определите ток в нейтральном проводе.

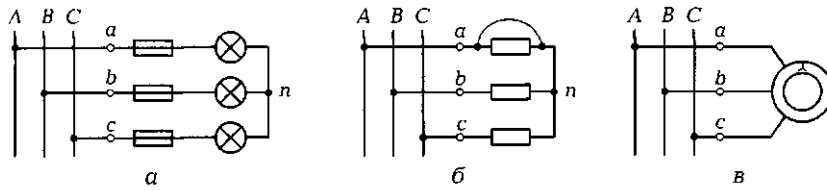


Рис. 3.15. Схемы ЭЦ к задачам 6 (а), 7 (б), 8 (в) подразд. 3.2

5. Три одинаковые лампы мощностью по 100 Вт включены в каждую фазу четырехпроводной сети с линейным напряжением 380 В. Чему будет равен ток в нейтральном проводе, если перегорит одна из ламп?

6. В трехпроводной ЭЦ с симметричной нагрузкой, соединенной звездой (рис. 3.15, а), и линейным напряжением 220 В перегорел предохранитель фазы с. Чему будут равны напряжения на фазах а и б?

7. В трехпроводной ЭЦ с симметричной нагрузкой (сопротивление каждой фазы 100 Ом), соединенной звездой, и фазным напряжением 220 В закоротилась нагрузка в фазе а (рис. 3.15, б). Чему будут равны токи в фазах б и с?

8. Обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя включены в трехпроводную ЭЦ звездой (рис. 3.15, в). В процессе работы одна из обмоток двигателя закоротилась. Какие токи будут протекать в двух обмотках, если  $U_{\phi} = 220$  В,  $f = 50$  Гц,  $R_{\phi} = 10$  Ом,  $L_{\phi} = 0,156$  Гн?

9. Три лампы мощностью 40, 60 и 75 Вт включены в три фазы трехфазной четырехпроводной системы с фазным напряжением 220 В. Определите ток в нейтральном проводе.

10. На рис. 3.16 покажите с помощью прямых линий соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами для соедине-

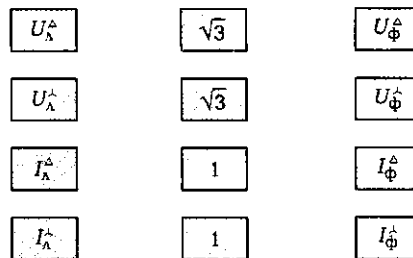


Рис. 3.16. Соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами к задаче 10 подразд. 3.2



ний звездой и треугольником (например, если линейное напряжение больше фазного в  $\sqrt{3}$  раз, от прямоугольников с символами этих напряжений линии следует провести к прямоугольнику с изображением  $\sqrt{3}$ , если линейное и фазное напряжения равны — к прямоугольнику с изображением 1).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. В схеме ЭЦ с симметричной нагрузкой, соединенной звездой с нейтральным проводом, перегорел предохранитель одной из фаз: Как изменятся токи в двух оставшихся фазах:
  - а) увеличатся в  $\sqrt{2}$  раз;
  - б) не изменятся;
  - в) станут равными нулю;
  - г) изменятся непредсказуемо?
2. В схеме ЭЦ с симметричной нагрузкой, соединенной звездой с нейтральным проводом, перегорели предохранители двух фаз: Как изменится ток в оставшейся фазе:
  - а) увеличится в  $\sqrt{3}$  раз;
  - б) не изменится;
  - в) станет равным нулю;
  - г) изменится непредсказуемо?
3. Какое значение тока покажет амперметр, включенный в нейтральный провод четырехпроводной симметричной ЭЦ напряжением 380 В с фазными сопротивлениями 100 Ом:
  - а) 3,8 А;
  - б) 0;
  - в) 2,2 А;
  - г) амперметр сторит?
4. Каково соотношение между линейным или фазным токами в трехфазной симметричной ЭЦ, соединенной звездой:
  - а) линейный ток равен фазному;
  - б) линейный ток в  $\sqrt{3}$  раз больше фазного;
  - в) фазный ток в  $\sqrt{3}$  раз больше линейного;
  - г) линейный ток в  $\sqrt{2}$  раз больше фазного?
5. Каково соотношение между линейным и фазным напряжениями в трехфазной симметричной ЭЦ, соединенной звездой:
  - а) линейное напряжение равно фазному;
  - б) линейное напряжение в  $\sqrt{3}$  раз больше фазного;
  - в) фазное напряжение в  $\sqrt{3}$  раз больше линейного;
  - г) линейное напряжение в  $\sqrt{2}$  раз больше фазного?

6. Какое напряжение покажет вольтметр, подключенный к розетке:
- а) линейное;
  - б) фазное;
  - в) в зависимости от схемы включения прибора;
  - г) непредсказуемо?
7. К каким точкам надо подключить вольтметр, чтобы измерить фазное напряжение в четырехпроводной ЭЦ:
- а) между линейными проводами;
  - б) между концами двух фаз;
  - в) между началами двух фаз;
  - г) между линейным проводом и нейтральной точкой?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### Исследование трехфазной электрической цепи при активной нагрузке однофазных приемников, соединенных звездой

#### 1. Цель работы

1.1. Проверить экспериментальным путем соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями для однофазных приемников, соединенных звездой.

1.2. Оценить роль нейтрального провода в трехфазных ЭЦ с нагрузкой, соединенной звездой.

1.3. Познакомиться с методами анализа трехфазных ЭЦ с активной нагрузкой, соединенной звездой, с применением векторных диаграмм.

#### 2. Объект и средства испытаний

Объектом испытаний являются три однофазных приемника с активным характером нагрузки — постоянные резисторы, подключаемые к источнику регулируемого трехфазного синусоидального напряжения с фазным напряжением  $U_{\phi} = 0 \dots 8$  В.

Все элементы ЭЦ монтируются на наборном поле стенда и могут быть включены в схему с помощью контактных гребней и проводов со штекерами. В качестве измерительных приборов используются мультиметры, работающие в режиме амперметров и вольтметров переменного тока. Амперметр включается в цепь с помощью мини-блоков «А».

### 3. Задание к лабораторной работе

#### *Выполняется при подготовке к работе*

3.1. Ознакомиться с порядком выполнения лабораторной работы, теоретическими сведениями по данной теме. Подготовить в рабочей тетради протокол испытаний.

3.2. Выполнить предварительные расчеты ЭЦ для симметричной нагрузки с  $R_{\phi} = 330 \text{ Ом}$  и  $U_{\lambda} = 11,4 \text{ В}$ . По результатам расчета в выбранном масштабе изобразить на рис. А7.1 векторную диаграмму напряжений и токов. Определить ток в нейтральном проводе (нейтрале).

#### *Выполняется в лаборатории*

3.3. Собрать ЭЦ в соответствии со схемой, показанной на рис. А7.2. В каждую фазу включить одинаковые резисторы (симметричная нагрузка) сопротивлением по 1 кОм. Подключить ЭЦ к трехфазному источнику питания.

3.4. После проверки собранной ЭЦ преподавателем установить автоматы и выключатель УЗО в положение «Вкл.». Подать с помощью выключателя «Сеть» напряжение на ЭЦ и мультиметры. При этом должны загореться соответствующие сигнальные лампы.

Установить на выходе источника трехфазного питания максимальное значение фазного напряжения. Измерить линейное напряжение  $U_{\lambda}$ , которое должно лежать в диапазоне 12,0... 14,6 В. Измерить фазные напряжения  $U_a, U_b, U_c$  на приемниках, линейные токи  $I_a, I_b, I_c$ , ток в нейтрали  $I_n$ . Результаты занести в первую строку табл. А7.1.

Отключить нейтральный провод от источника питания (зажим  $N$ ) и вновь измерить фазные напряжения и токи, а также напряжение смещения нейтрали  $U_{nN}$  между точками  $n$  и  $N$ . Результаты занести во вторую строку табл. А7.1.

3.5. Отключить питание ЭЦ. Изменить нагрузку в фазах, сделав ее *несимметричной*, для чего в фазу  $b$  вместо резистора сопротивлением 1 кОм установить резистор сопротивлением 330 Ом, а в фазу  $c$  — 470 Ом. Подключить нейтральный провод. Подать напряжение на ЭЦ и измерить фазные напряжения, линейные токи и ток в нейтрали. Данные занести в первую строку табл. А7.2.

*Отключить нейтральный провод* от источника питания и измерить фазные напряжения и токи, а также напряжение смещения нейтрали  $U_{nN}$  между точками  $n$  и  $N$ . Результаты занести во вторую строку табл. А7.2.

3.6. После согласования протокола испытаний с преподавателем ЭЦ обесточить и разобрать, проводники и мини-блоки убрать на место, рабочее место привести в порядок.

#### 4. Протокол испытаний и отчет о работе № 7

##### Исследование трехфазной электрической цепи при активной нагрузке однофазных приемников, соединенных звездой

4.1. Цель работы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

4.2. Формулы и предварительные расчеты.

$$U_\lambda = \sqrt{3} U_\phi; I_\lambda = I_\phi; Z_\phi = U_\phi / I_\phi; \varphi = \arctg X/R; P = 3 U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3} U_\lambda I_\lambda \cos \varphi.$$

Дано:  $U_\lambda =$  \_\_\_\_\_ В;  $R_\phi = R_a = R_b = R_c =$  \_\_\_\_\_ Ом;

$$U_\phi = U_\lambda / \sqrt{3} = \text{---} \text{ В}; I_\phi = U_\phi / R_\phi = \text{---} \text{ мА}; I_\lambda = \text{---} \text{ мА}; P = \text{---} \text{ мВт}.$$

$$m_U = 0,18 \text{ В/мм}, m_I = 1 \text{ мА/мм}$$

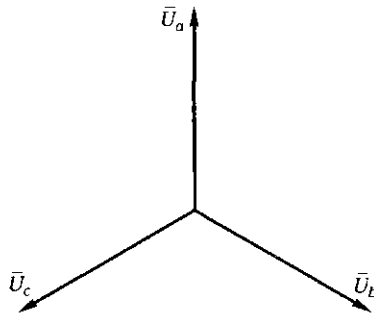


Рис. П7.1. Векторная диаграмма напряжений и токов трехфазной ЭЦ с активной нагрузкой однофазных приемников, соединенных звездой (строится при подготовке к работе)

4.3. Схема электрической цепи и таблицы.

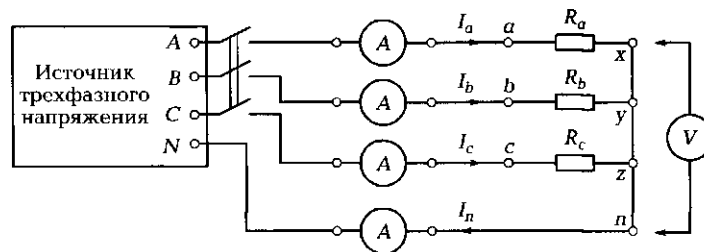


Рис. П7.2. Схема ЭЦ с активной нагрузкой однофазных приемников, соединенных звездой

Симметричная нагрузка ( $R_a = R_b = R_c$ ).

Таблица Л7.1								
Схема соединения	$U_a, В$	$U_b, В$	$U_c, В$	$I_a, мА$	$I_b, мА$	$I_c, мА$	$I_n, мА$	$U_{nN}, В$
С нейтральным проводом								—
Без нейтрального провода							—	

Несимметричная нагрузка ( $R_a \neq R_b \neq R_c$ ).

Таблица Л7.2								
Схема соединения	$U_a, В$	$U_b, В$	$U_c, В$	$I_a, мА$	$I_b, мА$	$I_c, мА$	$I_n, мА$	$U_{nN}, В$
С нейтральным проводом								—
Без нейтрального провода							—	

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_  
 Преподаватель \_\_\_\_\_

#### 4.4. Расчетно-графическая часть.

Формулы, используемые для обработки экспериментальных данных, занесенных в табл. Л7.1 и Л7.2:

$$Z_\phi = \frac{U_\phi}{I_\phi}; \quad \phi = \arctg \frac{X}{R}.$$

Таблица Л7.3									
Нагрузка	Схема соединения	$Z_a, Ом$	$Z_b, Ом$	$Z_c, Ом$	$\phi_a, град.$	$\phi_b, град.$	$\phi_c, град.$	$I_n, мА$	$U_{nN}, В$
Симметричная ( $R_a = R_b = R_c$ )	С нейтралью								—
	Без нейтрали							—	
Несимметричная ( $R_a \neq R_b \neq R_c$ )	С нейтралью								—
	Без нейтрали							—	

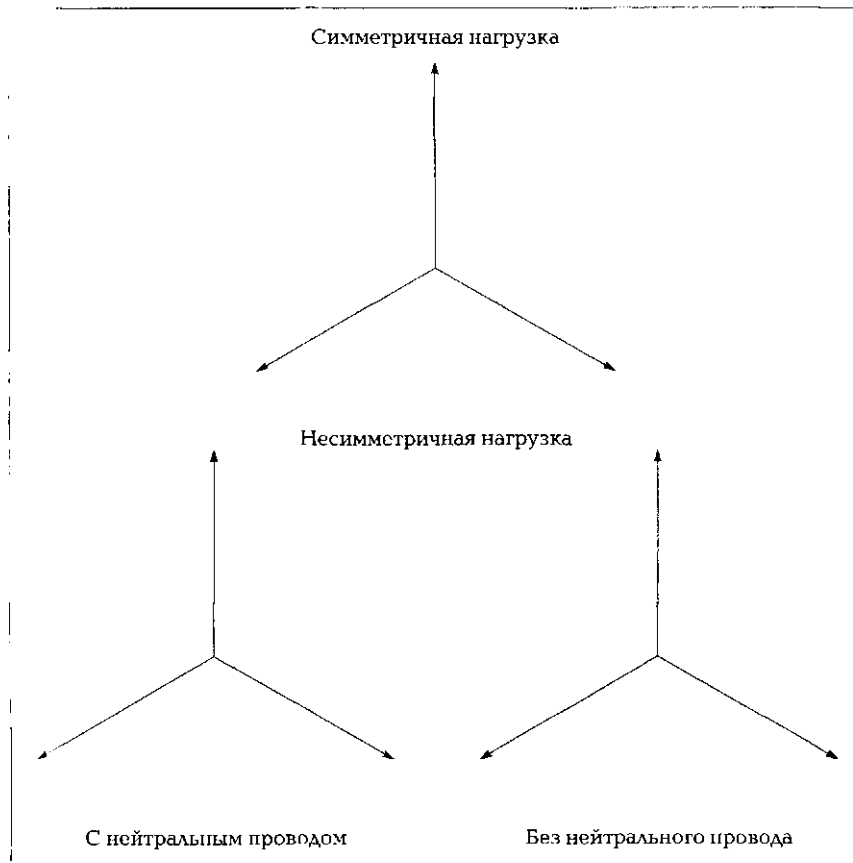


Рис. Л7.3. Векторные диаграммы напряжений и токов в трехфазной ЭЦ с активной нагрузкой однофазных приемников, соединенных звездой (строятся по результатам испытаний)

4.5. Краткие выводы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

### 5. Требования к расчетно-графической части отчета

5.1. На основании данных табл. Л7.1 и Л7.2 вычислить значения фазных сопротивлений  $Z_{a1}$ ,  $Z_{b1}$ ,  $Z_{c1}$  и углы сдвига фаз  $\varphi_{a1}$ ,  $\varphi_{b1}$ ,  $\varphi_{c1}$ . Результаты расчетов занести в табл. Л7.3.

5.2. Пользуясь данными табл. А7.1, А7.2 и А7.3, построить в соответствующих масштабах  $m_U$  и  $m_I$  на рис. А7.3 векторные диаграммы напряжений и токов для симметричной и несимметричной нагрузок с нейтральным проводом и без него. С помощью векторных диаграмм определить ток в нейтральном проводе  $I_n$  и напряжение смещения нейтрали  $U_{nN}$ , полученные значения занести в табл. А7.3.

5.3. Сравнить значения тока в нейтральном проводе и напряжения смещения нейтрали, полученные экспериментальным и расчетным путями.

5.4. Сделать краткие выводы по работе.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

---

1. В чем отличие трехпроводной линии связи от четырехпроводной?
2. Какова роль нейтрального провода?
3. Как включить однофазную нагрузку звездой?
4. Какие напряжения (токи) называются линейными и фазными?
5. В каких случаях возникает напряжение смещения нейтрали?
6. Как проще вычислить ток в нейтральном проводе и напряжение смещения нейтрали, если известны фазные напряжения и сопротивления?
7. Нужен ли нейтральный провод в осветительной сети?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8**

---

### **Исследование трехфазной электрической цепи при активно-реактивной нагрузке однофазных приемников, соединенных звездой**

#### **1. Цель работы**

1.1. Исследовать работу трехфазной ЭЦ с активно-реактивной нагрузкой, определить ток в нейтральном проводе и напряжение смещения нейтрали для однофазных приемников, соединенных звездой.

1.2. Оценить роль нейтрального провода в трехфазных ЭЦ с активно-реактивной нагрузкой, соединенной звездой.

1.3. Познакомиться с методами анализа трехфазных ЭЦ с активно-реактивной нагрузкой, соединенной звездой, с применением векторных диаграмм.

## 2. Объект и средства испытаний

Объектом испытаний являются три однофазных приемника с активным (фаза  $a-x$ ), индуктивным (фаза  $b-y$ ) и емкостным (фаза  $c-z$ ) характеристиками нагрузки, подключаемые к источнику регулируемого трехфазного синусоидального напряжения с фазным напряжением  $U_{\phi} = 0 \dots 8$  В частотой 50 Гц.

Все элементы ЭЦ монтируются на наборном поле стенда и могут быть включены в схему с помощью контактных гнезд и проводов со штекерами. В качестве измерительных приборов используются мультиметры, работающие в режиме амперметров и вольтметров переменного тока. Амперметр включается в цепь с помощью миниблоков «А».

## 3. Задание к лабораторной работе

### *Выполняется при подготовке к работе*

3.1. Ознакомиться с порядком выполнения лабораторной работы, теоретическими сведениями по данной теме. Подготовить в рабочей тетради протокол испытаний.

3.2. Выполнить предварительные расчеты ЭЦ для равномерной нагрузки с параметрами  $R_a = 320$  Ом,  $L_b = 1$  Гн,  $C_c = 10$  мкФ и  $U_{\lambda} = 11,1$  В. По результатам расчета в выбранном масштабе изобразить на рис. А8.1 векторную диаграмму напряжений и токов. (Определить ток в нейтральном проводе (нейтрали).

### *Выполняется в лаборатории*

3.3. Собрать ЭЦ в соответствии со схемой, показанной на рис. А8.2. В фазу  $a-x$  включить резистор сопротивлением 330 Ом, в фазу  $b-y$  — катушку индуктивности (число витков  $w = 900$ ) с собранным ферромагнитным сердечником, в фазу  $c-z$  — конденсатор емкостью  $C = 10$  мкФ (равномерная нагрузка). Подключить ЭЦ к трехфазному источнику питания.

3.4. После проверки схемы преподавателем установить автоматы и выключатель УЗО в положение «Вкл.». Подать с помощью выключателя «Сеть» напряжение на ЭЦ и мультиметры. При этом должны загореться соответствующие сигнальные лампы.

Установить на выходе источника трехфазного питания максимальное значение фазного напряжения. Измерить линейное напряжение  $U_{\lambda}$ , которое должно лежать в диапазоне 12,0... 14,6 В. Измерить фазные напряжения  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  на приемниках, линейные токи  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ , ток в нейтрали  $I_n$ . Результаты занести в первую строку табл. А8.1.



Отключить нейтральный провод от источника питания (зажим  $N$ ) и вновь измерить фазные напряжения, линейные токи, а также напряжение смещения нейтрали  $U_{nN}$  между точками  $n$  и  $N$ . Результаты занести во вторую строку табл. Л8.1.

3.5. Отключить питание ЭЦ. Поменять местами нагрузку в фазах  $b—y$  и  $c—z$ , установив конденсатор в фазу  $b—y$ , а катушку индуктивности в фазу  $c—z$ . Подключить нейтральный провод, подать питание и измерить фазные напряжения, линейные токи и ток в нейтрали. Данные занести в первую строку табл. Л8.2.

Отключить нейтральный провод от источника питания и измерить фазные напряжения и токи, а также напряжение смещения нейтрали  $U_{nN}$  между точками  $n$  и  $N$ . Результаты занести во вторую строку табл. Л8.2.

3.6. После согласования протокола испытаний с преподавателем ЭЦ обесточить и разобрать, проводники и мини-блоки убрать на место, рабочее место привести в порядок.

#### 4. Протокол испытаний и отчет о работе № 8

##### *Исследование трехфазной электрической цепи при активно-реактивной нагрузке однофазных приемников, соединенных звездой*

4.1. Цель работы \_\_\_\_\_

4.2. Формулы и предварительные расчеты.

$$U_\lambda = \sqrt{3} U_\phi; I_\lambda = I_\phi; Z_\phi = U_\phi / I_\phi; \varphi = \arctg X/R; P = P_a + P_b + P_c.$$

Дано:  $U_\lambda = 11,1$  В;  $Z_\phi = R_a = X_b = X_c = 320$  Ом;

$$U_\phi = U_\lambda / \sqrt{3} = \text{___} \text{ В}; I_\phi = U_\phi / Z_\phi = \text{___} \text{ мА}; I_\lambda = \text{___} \text{ мА}; P = \text{___} \text{ мВт}.$$

$$m_U = 0,18 \text{ В/мм}, m_I = 1 \text{ мА/мм}$$

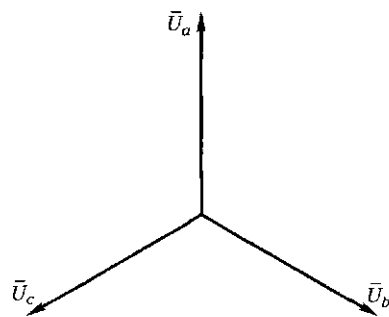


Рис. Л8.1. Векторная диаграмма напряжений и токов трехфазной ЭЦ с активно-реактивной нагрузкой однофазных приемников, соединенных звездой [строится при подготовке к работе]

4.3. Схема электрической цепи и таблицы.

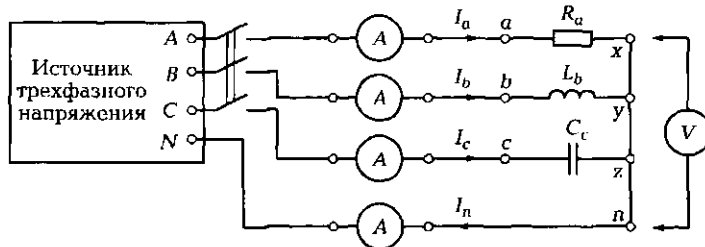


Рис. Л8.2. Схема ЭЦ с активно-реактивной нагрузкой однофазных приемников, соединенных звездой

Нагрузка в фазе:  $a-x$  активная,  $b-y$  — индуктивная,  $c-z$  — емкостная.

Таблица Л8.1								
Схема соединения	$U_a, В$	$U_b, В$	$U_c, В$	$I_a, мА$	$I_b, мА$	$I_c, мА$	$I_n, мА$	$U_{RN}, В$
С нейтральным проводом								—
Без нейтрального провода							—	

Нагрузка в фазе:  $a-x$  активная,  $b-y$  — емкостная,  $c-z$  — индуктивная.

Таблица Л8.2								
Схема соединения	$U_a, В$	$U_b, В$	$U_c, В$	$I_a, мА$	$I_b, мА$	$I_c, мА$	$I_n, мА$	$U_{RN}, В$
С нейтральным проводом								—
Без нейтрального провода							—	

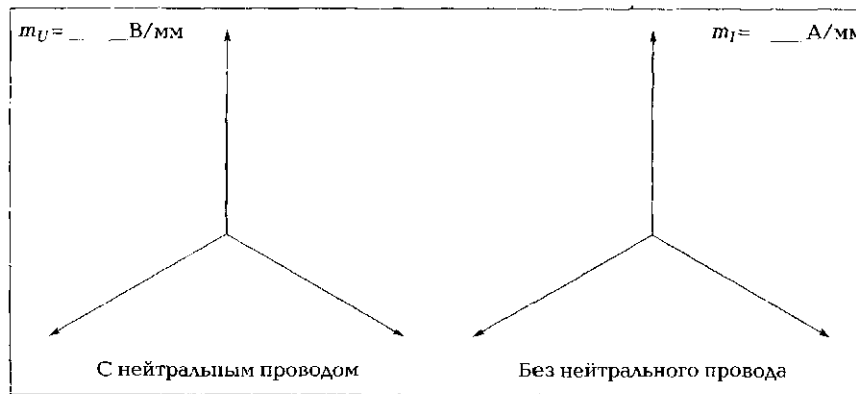
Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_  
 Преподаватель \_\_\_\_\_

4.4. Расчетно-графическая часть.

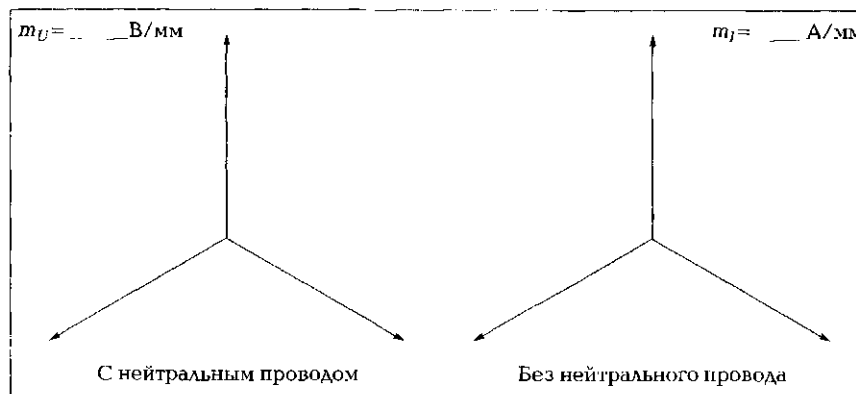
Формулы, используемые для обработки экспериментальных данных, занесенных в табл. Л8.1 и Л8.2:

$$Z_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{I_{\phi}}; \quad \varphi = \arctg \frac{X}{R}$$

Таблица ЛВ.3										
Нагрузка	Схема соединений	$Z_{a'}$ Ом	$Z_{b'}$ Ом	$Z_{c'}$ Ом	$\varphi_{a'}$ град.	$\varphi_{b'}$ град.	$\varphi_{c'}$ град.	$I_{a'}$ мА	$U_{fN'}$ В	
$R - X_L - X_C$	С нейтралью								—	
	Без нейтрали							—		
$R - X_C - X_L$	С нейтралью								—	
	Без нейтрали							—		



а



б

Рис. ЛВ.3. Векторные диаграммы напряжений и токов трехфазной ЭЦ с активно-реактивной нагрузкой однофазных приемников, соединенных звездой (строятся по результатам испытаний):

а — нагрузка в фазе: а—х активная, б—у — индуктивная, с—z — емкостная; б — нагрузка в фазе: а—х активная, б—у — емкостная, с—z — индуктивная

4.5. Краткие выводы \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

### 5. Требования к расчетно-графической части отчета

5.1. На основании данных табл. А8.1 и А8.2 вычислить значения фазных сопротивлений  $Z_a, Z_b, Z_c$  и углы сдвига фаз  $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ . Результаты расчетов занести в табл. А8.3.

5.2. Пользуясь данными в табл. А8.1, А8.2 и А8.3, построить в соответствующих масштабах  $m_U$  и  $m_I$  на рис. А8.3 векторные диаграммы напряжений и токов для активно-реактивной нагрузки с нейтральным проводом и без него. С помощью векторных диаграмм определить ток в нейтральном проводе  $I_n$  и напряжение смещения нейтрали  $U_{nN}$ , полученные значения занести в табл. А8.3.

5.3. Сравнить значения тока в нейтральном проводе и напряжения смещения нейтрали, полученные экспериментальным и расчетным путями для обоих вариантов включения нагрузки в фазах.

5.4. Сделать краткие выводы по работе.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая нагрузка называется равномерной?
2. Какая нагрузка называется однородной?
3. В каких случаях возникает напряжение смещения нейтрали?
4. Почему после перемены местами нагрузок в фазах  $b-u$  и  $c-u$  изменился ток в нейтральном проводе?
5. Можно ли включить на параллельную работу два генератора с различным порядком чередования фаз?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

### Исследование трехфазной электрической цепи при активной нагрузке однофазных приемников, соединенных треугольником

#### 1. Цель работы

1.1. Проверить экспериментальным путем соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями для однофазных приемников, соединенных треугольником.

1.2. Освоить методы измерения и расчета мощности в трехфазных цепях.

1.3. Познакомиться с методами анализа трехфазных ЭЦ с нагрузкой, соединенной треугольником, с применением векторных диаграмм.

## 2. Объект и средства испытаний

Объектом испытаний являются три однофазных приемника с активным характером нагрузки — постоянные резисторы, подключаемые к источнику регулируемого трехфазного синусоидального напряжения с фазным напряжением  $U_{\phi} = 0 \dots 8 \text{ В}$ .

Все элементы ЭЦ монтируются на наборном поле стенда и могут быть включены в схему с помощью контактных гнезд и проводов со штекерами.

В качестве измерительных приборов используются мультиметры, работающие в режиме амперметров и вольтметров переменного тока, а также электронный ваттметр. Амперметр и токовая цепь ваттметра включаются с помощью мини-блоков «А».

## 3. Задание к лабораторной работе

### *Выполняется при подготовке к работе*

3.1. Ознакомиться с порядком выполнения лабораторной работы, теоретическими сведениями по данной теме. Подготовить в рабочей тетради протокол испытаний.

3.2. Выполнить предварительные расчеты ЭЦ для симметричной нагрузки с  $R_{\phi} = 330 \text{ Ом}$  и  $U_{\phi} = 6,6 \text{ В}$ . По результатам расчета в выбранном масштабе изобразить на рис. А9.1 векторную диаграмму напряжений и фазных токов. Построить на диаграмме векторы линейных токов.

### *Выполняется в лаборатории*

3.3. Собрать ЭЦ в соответствии со схемой, показанной на рис. А9.2. В каждую фазу включить одинаковые резисторы (симметричная нагрузка) сопротивлением по 1 кОм. Подключить ЭЦ к трехфазному источнику питания.

3.4. После проверки собранной ЭЦ преподавателем установить автоматы и выключатель УЗО в положение «Вкл.». Подать с помощью выключателя «Сеть» напряжение на ЭЦ, мультиметры и ваттметр. При этом должны загореться соответствующие сигнальные лампы.

Установить на выходе источника трехфазного питания максимальное значение фазного напряжения. Измерить линейное напряжение  $U_\lambda$ , которое должно лежать в диапазоне 12,0...14,6 В. Измерить фазные напряжения  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$ , линейные токи  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ , фазные токи  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$ ,  $I_{ca}$ . Результаты занести в первую строку табл. А9.1.

3.5. Измерить методом двух ваттметров мощность, потребляемую ЭЦ. Для этого свободный вывод «U» ваттметра соединить с линейным проводом С, токовую цепь ваттметра с помощью кабеля с коаксиальным разъемом подключить сначала к линейному проводу А и снять показание  $P_1$ , затем — к линейному проводу В и снять показание  $P_2$ . Результаты занести в первую строку табл. А9.1.

3.6. Отключить питание ЭЦ. Изменить нагрузку в фазах, сделав ее *несимметричной*, для чего в фазах  $a - b$  и  $b - c$  вместо резисторов сопротивлениями по 1 кОм установить резисторы сопротивлениями соответственно 470 и 330 Ом. Вновь измерить фазные напряжения, линейные и фазные токи, а также мощность, потребляемую ЭЦ. Данные занести во вторую строку табл. А9.1.

3.7. После согласования протокола испытаний с преподавателем ЭЦ обесточить и разобрать, проводники и мини-блоки убрать на место, рабочее место привести в порядок.

#### 4. Протокол испытаний и отчет о работе № 9

##### *Исследование трехфазной электрической цепи при активной нагрузке однофазных приемников, соединенных треугольником*

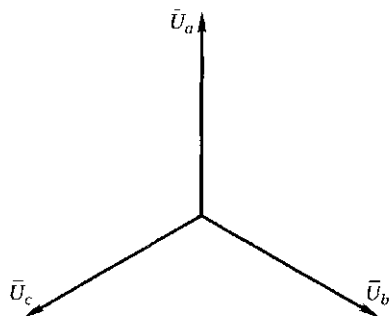
4.1. Цель работы \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

4.2. Формулы и предварительные расчеты.

$$U_\lambda = U_\phi; I_\lambda = \sqrt{3}I_\phi; P = 3U_\phi I_\phi = \sqrt{3}U_\lambda I_\lambda.$$

$$U_\lambda = \text{_____ В}; R_\phi = R_{ab} = R_{bc} = R_{ca} = \text{_____ Ом};$$

$$I_\phi = \text{_____ мА}; I_\lambda = \text{_____ мА}; P = \text{_____ мВт}.$$



$$m_U = 0,18 \text{ В/мм}, m_I = 1 \text{ мА/мм}$$

Рис. Л9.1. Векторная диаграмма напряжений и токов трехфазной ЭЦ с активной нагрузкой однофазных приемников, соединенных треугольником (строится при подготовке к работе)

#### 4.3. Схема электрической цепи и таблицы.

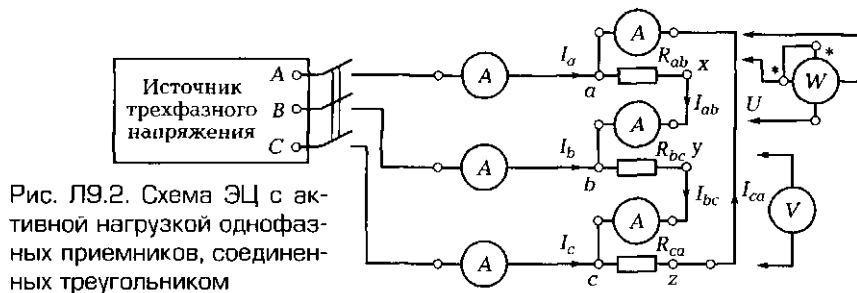


Рис. Л9.2. Схема ЭЦ с активной нагрузкой однофазных приемников, соединенных треугольником

Таблица Л9.1

Нагрузка	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	$I_{ab}$	$I_{bc}$	$I_{ca}$	$I_a$	$I_b$	$I_c$	$P_1$	$P_2$	$P_{ЭЦ}$
Симметричная ( $R_{ab} = R_{bc} = R_{ca}$ )												
Несимметричная ( $R_{ab} \neq R_{bc} \neq R_{ca}$ )												

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_  
 Преподаватель \_\_\_\_\_

#### 4.4. Расчетно-графическая часть.

Таблица Л9.2

Нагрузка	$R_{ab}$	$R_{bc}$	$R_{ca}$	$P_{ab}$	$P_{bc}$	$P_{ca}$	$I_a$	$I_b$	$I_c$	$P_{ЭЦ}$
Симметричная ( $R_{ab} = R_{bc} = R_{ca}$ )										
Несимметричная ( $R_{ab} \neq R_{bc} \neq R_{ca}$ )										

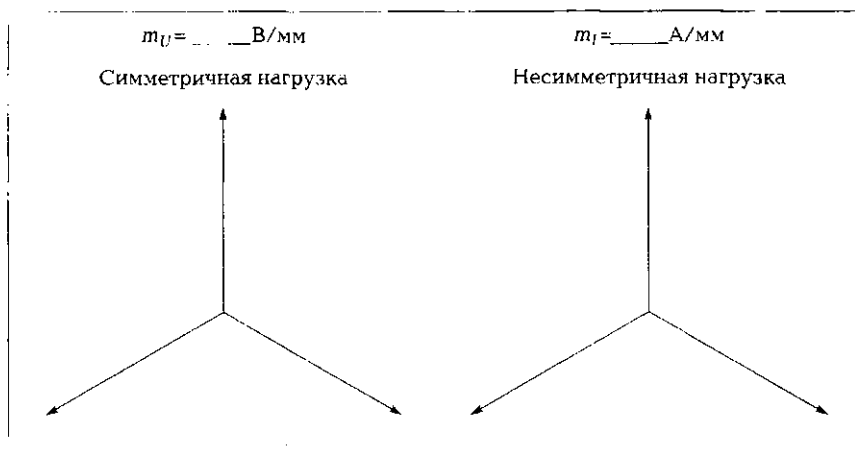


Рис. Л9.3. Векторные диаграммы напряжений и токов в трехфазной ЭЦ с активной нагрузкой однофазных приемников, соединенных треугольником (строятся по результатам испытаний)

4.5. Краткие выводы \_\_\_\_\_

---



---



---



---



---

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

### 5. Требования к расчетно-графической части отчета

5.1. По данным табл. Л9.1 построить в соответствующих масштабах  $m_U$  и  $m_I$  на рис. Л9.3 векторные диаграммы напряжений и токов для симметричной и несимметричной нагрузок. Определить значения линейных токов  $I_a, I_b, I_c$ , результаты занести в табл. Л9.2.

5.2. Используя экспериментальные данные, приведенные в табл. Л9.1, вычислить значения фазных сопротивлений  $R_{ab}, R_{bc}, R_{ca}$  и мощностей  $P_{ab}, P_{bc}, P_{ca}$ , а также мощность, потребляемую всей цепью. Результаты занести в табл. Л9.2.

5.3. Указать в табл. Л9.1 и Л9.2 единицы измерения приведенных параметров.

5.4. Сделать краткие выводы по работе.



## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

---

1. Как соединить однофазные приемники треугольником?
2. Каково соотношение между линейными и фазными напряжениями при симметричной нагрузке приемников, соединенных треугольником?
3. Каково соотношение между линейными и фазными токами при симметричной нагрузке приемников, соединенных треугольником?
4. Как измерить мощность ЭЦ методом двух ваттметров?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10**

---

### **Исследование аварийных режимов работы трехфазных электрических цепей**

#### **1. Цель работы**

Имитировать аварийные режимы работы трехфазных цепей и проверить экспериментально, как при этом изменяются параметры ЭЦ.

#### **2. Объект и средства испытаний**

Объектом испытаний являются три однофазных приемника с активным характером нагрузки — постоянные резисторы с одинаковыми сопротивлениями. Однофазные приемники соединены звездой и подключены к источнику трехфазного синусоидального напряжения.

Все элементы ЭЦ, выполненные в виде мини-блоков, монтируются на наборном поле стенда и могут быть включены в схему с помощью контактных гнезд и проводов со штекерами. Питание ЭЦ осуществляется от трехфазного источника с фазным напряжением  $U_{\phi} = 0 \dots 8$  В. В качестве измерительных приборов используются мультиметры, работающие в режиме амперметров и вольтметров переменного тока.

#### **3. Краткие теоретические сведения**

В однофазных ЭЦ аварийные режимы, возникающие при обрыве проводов или коротких замыканиях в линиях или нагрузке, ведут к потере напряжения или резкому увеличению тока. Иначе ведут себя в аварийных режимах трехфазные ЭЦ, обрыв проводов или

короткие замыкания в которых могут привести к перераспределению напряжений и токов в отдельных фазах. Остановимся на наиболее типичных примерах аварийных режимов в трехфазных ЭЦ.

**Обрыв нейтрального провода при соединении звездой.** При симметричной нагрузке ток в нейтральном проводе отсутствует, поэтому его обрыв не приводит к изменению параметров ЭЦ.

При несимметричной нагрузке в нейтральном проводе течет ток нейтрали  $I_n$ , поэтому обрыв провода приводит к изменению напряжений и токов в каждой фазе — «перекосу» фаз. Напряжения на одних фазах могут значительно превысить номинальное значение, на других — уменьшиться до значений ниже номинального.

На рис. Л10.1, а показана схема четырехпроводной ЭЦ с несимметричной нагрузкой и, следовательно, с различными фазными токами. Ток в нейтральном проводе  $I_n$  может быть определен с помощью векторной диаграммы, показанной на рис. Л10.1, б.

На рис. Л10.1, в показана схема ЭЦ, в которой произошел обрыв нейтрального провода. Нейтральная точка приемника  $n$  в этом случае перемещается на векторной диаграмме в направлении вектора тока  $I_n$  (рис. Л10.1, г). Появляется напряжение смещения нейтрали  $U_{nN}$ , что ведет в рассматриваемой ситуации к увеличению напряжения на фазе  $b$  —  $U_b$  и уменьшению напряжения на фазе  $a$  —  $U_a$ .

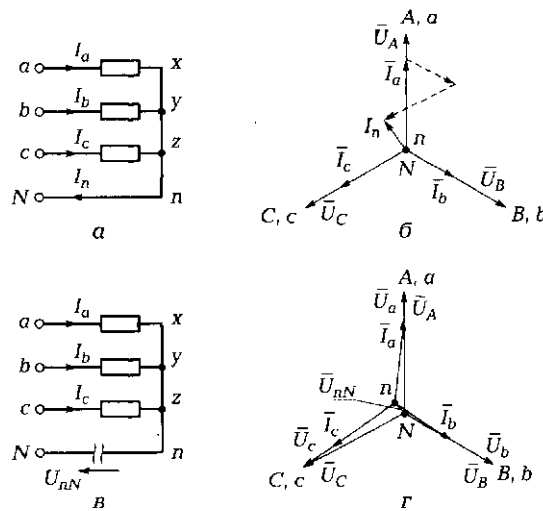


Рис. Л10.1. Обрыв нейтрального провода при соединении звездой:

а — исходная схема четырехпроводной ЭЦ; б — векторная диаграмма напряжений и токов при несимметричной нагрузке в четырехпроводной ЭЦ; в — схема трехпроводной ЭЦ (нейтральный провод оборван); г — векторная диаграмма напряжений и токов в трехпроводной ЭЦ

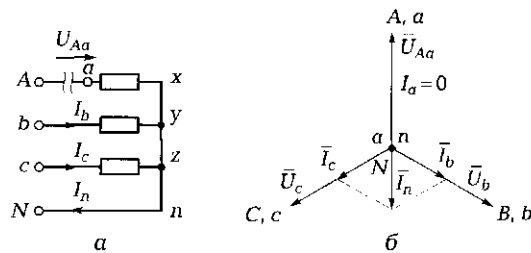


Рис. Л10.2. Обрыв линейного провода при соединении звездой в четырехпроводной ЭЦ:

*a* — схема ЭЦ, в которой произошел обрыв; *б* — векторная диаграмма напряжений и токов

**Обрыв линейного провода (фазной нагрузки) при соединении звездой.** При обрыве линейного провода в *четырёхпроводной* ЭЦ, например в фазе *a — x* (рис. Л10.2, *a*), ток в данной фазе исчезает, но в двух оставшихся фазах ни напряжения, ни токи не изменяются. В нейтральном проводе появляется ток  $I_n$  (рис. Л10.2, *б*).

В *трехпроводной* ЭЦ (без нейтрального провода) при обрыве линейного провода, например в фазе *a — x* (рис. Л10.3, *a*), нагрузка в двух оставшихся фазах оказывается включенной последовательно на линейное напряжение. При симметричной нагрузке напряжения в этих фазах одинаковы и составляют  $(\sqrt{3}/2)U_{\text{ф.ном}}$ , где  $U_{\text{ф.ном}}$  — номинальное фазное напряжение, а напряжение смещения нейтрали равно  $U_{\text{ф.ном}}/2$  (рис. Л10.3, *б*).

**Обрыв фазного провода при соединении треугольником.** При обрыве фазного провода, например в фазе *c — a* (рис. Л10.4, *a*), ток  $I_{ca}$  в ней становится равным нулю, но токи в двух оставшихся фазах ( $I_{ab}$  и  $I_{bc}$ ) не изменяются. Линейные токи  $I_a$  и  $I_c$  в этих фазах стано-

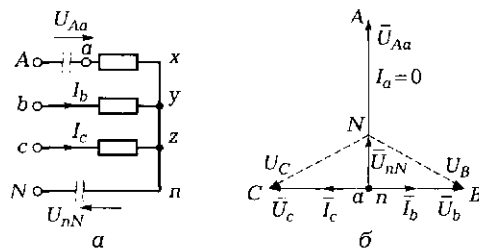


Рис. Л10.3. Обрыв линейного провода при соединении звездой в трехпроводной ЭЦ:

*a* — схема ЭЦ, в которой произошел обрыв; *б* — векторная диаграмма напряжений и токов

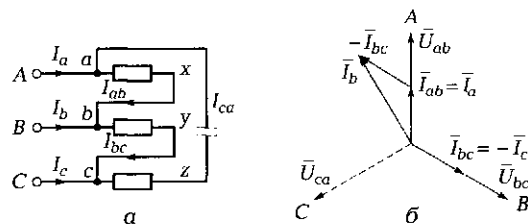


Рис. П10.4. Обрыв фазного провода при соединении треугольником:  
 а — схема ЭЦ, в которой произошел обрыв; б — векторная диаграмма напряжений и токов

вятся равными фазным, т. е. уменьшаются в  $\sqrt{3}$  раз, линейный ток  $I_b$  не изменяется (рис. Л10.4, б).

**Обрыв линейного провода при соединении треугольником.** При обрыве линейного провода, например А (рис. Л10.5, а), ЭЦ становится однофазной, включенной на линейное напряжение  $U_{bc}$  (рис. Л10.5, б). Напряжение на одной фазе (в нашем случае  $b—c$ ) равно линейному, а на двух оставшихся — половине линейного при симметричной нагрузке.

**Короткое замыкание между линейными проводами.** При соединении и звездой, и треугольником короткое замыкание между любыми линейными проводами (как и короткое замыкание между фазным и нулевым проводом в однофазной цепи) приводит к аварийному отключению нагрузки устройствами защиты.

**Короткое замыкание фазной нагрузки при соединении звездой.** При коротком замыкании фазной нагрузки в ЭЦ с *нейтральным проводом* ток в этой фазе резко возрастает, что приводит к срабатыванию устройств защиты и отключению источника питания. В ЭЦ *без нейтрального провода* защита не срабатывает, поскольку происходит перераспределение напряжений и токов между фазами. При

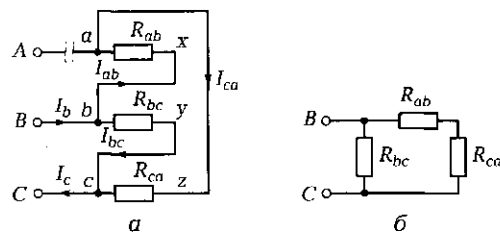


Рис. Л10.5. Обрыв линейного провода при соединении треугольником:  
 а — схема ЭЦ, в которой произошел обрыв; б — эквивалентная схема при обрыве линейного провода

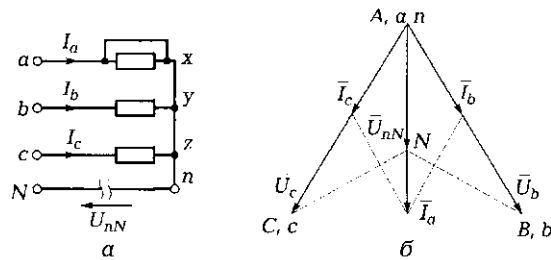


Рис. П10.6. Короткое замыкание фазной нагрузки при соединении звездой:

а — схема трехпроводной ЭЦ с короткозамкнутой фазой; б — векторная диаграмма напряжений и токов

коротком замыкании нагрузки, например в фазе  $a - x$  (рис. А10.6, а), напряжение на ней становится равным нулю и нейтральная точка  $n$  смещается на векторной диаграмме в точку  $a$  — в начало короткозамкнутой фазы (рис. А10.6, б). Напряжение смещения нейтрали становится равным фазному напряжению ( $U_{nN} = U_{\phi}$ ), а напряжение на каждой из двух оставшихся фаз — линейному напряжению (т. е. возрастает в  $\sqrt{3}$  раз). Ток в короткозамкнутой фазе равен геометрической сумме токов в оставшихся фазах:  $\vec{I}_a = \vec{I}_b + \vec{I}_c$ .

#### 4. Задание к лабораторной работе

##### Выполняется при подготовке к работе

4.1. Ознакомиться с порядком выполнения лабораторной работы, краткими теоретическими сведениями по данной теме. Подготовить в рабочей тетради протокол испытаний.

##### Выполняется в лаборатории

4.2. Для имитации аварийных режимов в трехфазных цепях, соединенных звездой, собрать ЭЦ в соответствии со схемой, показанной на рис. А10.7.

В качестве нагрузки использовать резисторы с одинаковыми сопротивлениями:  $R_a = R_b = R_c = 1 \text{ кОм}$ .

4.3. После проверки собранной ЭЦ преподавателем включить стенд и установить фазное напряжение 8 В. Снять показания приборов и занести результаты в первую строку табл. А10.1. Отключить питание стенда.

4.4. Для имитации обрыва линейного провода при соединении звездой отключить линейный провод от фазы А трехфазного источника питания. Включить питание стенда, снять показания прибо-

ров и занести результаты во вторую строку табл. Л10.1. Отключить питание стенда.

4.5. Отключить нейтральный провод (зажим *N*) от трехфазного источника питания. Включить питание стенда. Снять показания приборов и занести результаты в четвертую строку табл. Л10.1. Отключить питание стенда.

4.6. Для имитации короткого замыкания фазной нагрузки при соединении звездой подключить линейный провод к фазе *A* источника питания (нейтральный провод пока не подключать). Закоротить перемычкой нагрузку в фазе *A* ( $R_a = 0$ ). Включить питание стенда. Снять показания приборов и занести результаты в четвертую строку табл. Л10.1.

4.7. Подключить нейтральный провод к точке *N* и наблюдать, как изменятся показания приборов. Результаты отразить в пятой строке табл. Л10.1.

4.8. После согласования протокола испытаний с преподавателем ЭЦ обесточить и разобрать, проводники и мини-блоки убрать на место, рабочее место привести в порядок.

## 5. Протокол испытаний и отчет о работе № 10

### *Исследование аварийных режимов работы трехфазных электрических цепей*

5.1. Цель работы \_\_\_\_\_

---



---



---



---

5.2. Схема электрической цепи и таблицы.

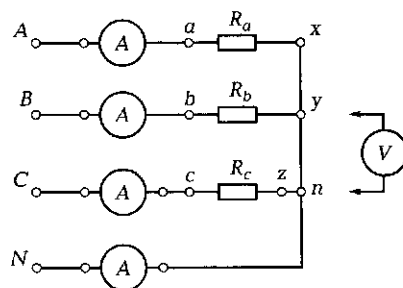


Рис. Л10.7. Схема ЭЦ для имитации аварийных режимов

Таблица Л10.1

№ п/п	Режим	$U_a$ , В	$U_b$ , В	$U_c$ , В	$U_{nn}$ , В	$I_a$ , мА	$I_b$ , мА	$I_c$ , мА	$I_{nn}$ , мА
1	$R_a = R_b = R_c = 1$ кОм (с нейтралью)								
2	$R_a = R_b = R_c = 1$ кОм (с нейтралью; обрыв линейного провода)								
3	$R_a = R_b = R_c = 1$ кОм (без нейтрали; обрыв линейного провода)								
4	$R_b = R_c = 1$ кОм; $R_a = 0$ (без нейтрали)								
5	$R_b = R_c = 1$ кОм; $R_a = 0$ (с нейтралью)								

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

5.3. Краткие выводы \_\_\_\_\_

---



---



---

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

### 6. Требования к расчетно-графической части отчета

6.1. Проанализировать результаты, полученные экспериментально, посмотреть, насколько они согласуются с приведенными ранее теоретическими сведениями.

6.2. Сделать краткие выводы по работе.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные виды аварийных режимов в трехфазных ЭЦ.
2. Какие из аварийных режимов опасны и могут привести к порче электрооборудования?
3. Какие аварийные режимы изменяют параметры ЭЦ, но не приводят к выходу из строя электрооборудования?

### МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

#### 4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАГНИТНОМ ПОЛЕ

##### ТЕОРИЯ

##### 4.1.1. Индукционное и силовое действия магнитного поля

В основу работы большинства электромеханических преобразователей — электродвигателей, генераторов, датчиков, трансформаторов, электромагнитов, реле, электромеханических измерительных приборов — положены индукционное и силовое действия магнитного поля.

☛ *Индукционное действие* основано на том, что в проводнике, движущемся в магнитном поле, индуцируется ЭДС, определяемая по формуле М. Фарадея

$$e = lBv,$$

где  $l$  — длина проводника;  $B$  — индукция магнитного поля (см. подразд. 4.1.2);  $v$  — скорость движения проводника.

На этом принципе построены электрические генераторы, трансформаторы и датчики.

☛ *Силовое действие* основано на том, что на проводники с током и детали из ферромагнитного материала, помещенные в магнитное поле, действует электромагнитная сила, определяемая по формуле А. М. Ампера

$$F_{\text{эм}} = lBI,$$

где  $I$  — сила тока в проводнике.

На этом принципе построены электродвигатели, электромагниты, реле и измерительные приборы.



Все упомянутые устройства и приборы являются электромагнитными или магнитоэлектрическими преобразователями. В их состав входят детали из ферромагнитных материалов и проводники с током.

Для получения требуемой ЭДС или электромагнитной силы необходимо создание магнитного поля с определенными характеристиками.

#### 4.1.2. Основные характеристики магнитного поля

➤ При протекании тока  $I$  по проводнику вокруг проводника образуются концентрические магнитные линии, интенсивности и направление которых определяются вектором магнитной индукции  $B$ , касательным к магнитным силовым линиям (рис. 4.1). Магнитная индукция  $B$  измеряется в теслах (Тл).

При протекании тока  $I$  по катушке с числом витков  $w$  (рис. 4.2) число магнитных силовых линий, а следовательно, и индукция  $B$  увеличиваются в  $w$  раз. Произведение силы тока на число витков получило название намагничивающей силы (н.с.) или магнитодвижущей силы (МДС)

$$F_m = Iw.$$

Эта сила измеряется в амперах (А).

Одной из важнейших характеристик магнитного поля является магнитный поток  $\Phi$ , определяемый произведением магнитной индукции и пронизываемой потоком площади:

$$\Phi = BS.$$

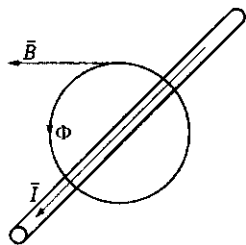


Рис. 4.1. Направление вектора магнитной индукции

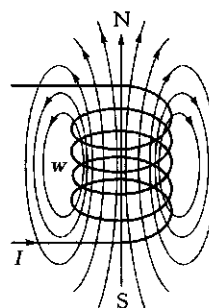


Рис. 4.2. Линии магнитного поля, возникающего при протекании тока по катушке

Магнитный поток  $\Phi$  измеряется в веберах (Вб).

Из последнего выражения следует, что магнитную индукцию  $B$  можно рассматривать как плотность магнитного потока  $\Phi$ .

При увеличении числа витков катушки растет и магнитный поток. Их произведение называют *потокосцеплением*

$$\Psi = w\Phi.$$

Магнитная индукция зависит не только от тока в проводнике, но и от среды, в которой создается магнитное поле. Степень участия среды в образовании магнитного поля характеризуется *абсолютной магнитной проницаемостью*  $\mu_a = \mu_0\mu$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума);  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость среды.

В зависимости от величины  $\mu$  различают две большие группы материалов:

- ферромагнетики —  $\mu \gg 1$  (Fe, Co, Ni и их сплавы);
- немагнитные материалы —  $\mu \approx 1$  (Cu, Ag, Al, дерево, воздух и т.д.).

Отношение магнитной индукции к абсолютной магнитной проницаемости определяет еще одну из основных характеристик магнитного поля — его *напряженность*

$$H = \frac{B}{\mu_a},$$

измеряемую в амперах на метр (А/м).

### 4.1.3. Физика ферромагнитных материалов

Если относительная магнитная проницаемость немагнитных материалов остается величиной постоянной, близкой к единице, то для ферромагнетиков  $\mu$  — величина переменная. При этом зависимость  $B = f(H)$  не только нелинейна, но и неоднозначна, т.е. зависит от направления протекающего тока. Это связано с особой структурой ферромагнитных материалов.

Любой ферромагнетик можно представить в виде отдельных микроскопических областей — *доменов*, обладающих собственным магнитным моментом  $N_0 - S_0$ . При отсутствии внешнего магнитного поля (точка 0 на рис. 4.3) материал в целом не имеет магнитного момента, поскольку все домены ориентированы хаотично. Магнитная индукция  $B$  равна нулю.

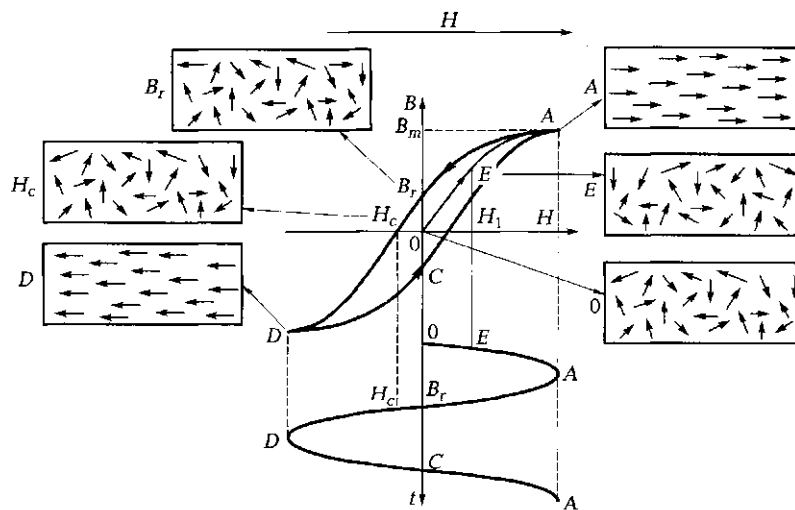


Рис. 4.3. Структура ферромагнетика в различных точках петли гистерезиса

При внесении ферромагнетика в магнитное поле напряженностью  $H$  домены начинают поворачиваться в соответствии с направлением поля. Чем сильнее поле (больше  $H$ ), тем больше угол поворота доменов, а следовательно, выше значение индукции  $B$  (точка  $E$ , соответствующая напряженности  $H_1$ ). В конце концов, все домены оказываются сориентированы по направлению поля и дальнейшее увеличение напряженности  $H$  не приводит к увеличению индукции ( $B = B_m$ ), ферромагнетик насыщается (точка  $A$ ). При уменьшении напряженности внешнего магнитного поля (напряженность  $H$  на рис. 4.3 изменяется по синусоидальному закону) домены стремятся вернуться в исходное состояние, однако даже при  $H = 0$  индукция не становится равной нулю, т. е. материал обладает остаточной намагниченностью (точка  $B_r$ ).

Чтобы снять намагниченность ( $B = 0$ ), необходимо приложить внешнее поле обратного знака. Требуемая для снятия намагниченности напряженность поля называется *коэрцитивной силой* (точка  $H_c$ ). Дальнейшее увеличение напряженности поля обратного знака вплоть до максимального значения вновь ориентирует домены по направлению поля (точка  $D$ ). Но теперь это направление обратно тому, которое имело место в точке  $A$ .

Показанная на рис. 4.3 петля  $A - B_r - H_c - D - C - A$  называется петлей гистерезиса. Подробнее о ней говорится в подразд. 4.3.2.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. Вычислите индукцию магнитного поля, обеспечивающую в контуре с числом витков  $w = 100$  и активной длиной проводника  $l = 60$  мм ЭДС, равную 4,8 В. Контур движется с линейной скоростью  $v = 1000$  мм/с. По правилу какой руки определяется направление ЭДС?

*Решение.* Для вычисления воспользуемся формулой  $E = Blwv$ , из которой можно найти значение индукции;  $B = E/(l w v) = 4,8 \text{ В} / (6 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot 100 \cdot 1 \text{ м/с}) = 0,8 \text{ Тл}$ .

*Ответ.* Значение индукции магнитного поля должно быть 0,8 Тл.

Направление ЭДС определяется по правилу правой руки. (Если наводится ЭДС, значит, это генератор — правая рука — так проще запомнить.) Правую руку надо расположить так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, а отогнутый большой палец указывал направление движения проводника. В этом случае остальные четыре пальца укажут направление ЭДС.

2. Вычислите индукцию магнитного поля, действующего на проводник длиной  $l = 60$  см, по которому течет ток  $I = 15$  А, если электромагнитная сила  $F_{\text{эм}} = 6,3$  Н. По правилу какой руки определяется направление электромагнитной силы?

*Решение.* Для вычисления воспользуемся формулой Ампера  $F_{\text{эм}} = BIl$ , из которой можно найти значение индукции:  $B = F_{\text{эм}}/(Il) = 6,3 / (15 \cdot 0,6) = 0,7 \text{ Тл}$ .

*Ответ.* Значение индукции магнитного поля должно быть 0,7 Тл.

Направление электромагнитной силы определяется по правилу левой руки. (Если проводник движется, значит, это двигатель — левая рука — так проще запомнить.) Левую руку надо расположить так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, а четыре пальца указывали направление тока. В этом случае отогнутый большой палец укажет направление электромагнитной силы.

3. В воздушном зазоре прибора магнитоэлектрической системы располагается прямоугольная рамка шириной  $D = 2$  см, длиной  $l = 2$  см, состоящая из десяти витков ( $w = 10$ ). Определите, на какой угол отклонится рамка (а значит, и стрелка прибора), если по виткам рамки течет ток 50 мА, индукция в воздушном зазоре 1 Тл, а механическая пружина, противодействующая повороту рамки, имеет жесткость  $k_a = 4 \cdot 10^{-6}$  Н·м/град.

*Решение.* В основе расчетов лежит формула Ампера  $F_{эм} = BI$ .

Поскольку рамка состоит из 10 витков, в каждом из которых два активных проводника, электромагнитный момент

$$M_{эм} = \frac{D}{2} F_{эм} = \frac{D}{2} BI2lw = \frac{2}{2} 10^{-2} \cdot 1 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 10 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При повороте рамки она преодолевает сопротивление пружины и останавливается в момент равенства вращающего и противодействующего моментов. Исходя из этого можно определить угол поворота рамки:

$$\alpha = \frac{M_{эм}}{k_{\alpha}} = \frac{2 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}}{4 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м/град}} = 50 \text{ град.}$$

*Ответ.* Рамка (а значит, и стрелка прибора) отклонится на угол  $50^\circ$ .

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

4. Какой момент действует на проводники длиной  $l = 10$  см, образующие обмотку ротора машины постоянного тока, если в пазу располагаются 10 витков, диаметр ротора 20 см, а индукция в воздушном зазоре  $B = 1$  Тл? По проводникам течет ток  $I = 10$  А.

5. Ротор машины постоянного тока приводится в действие электродвигателем с частотой вращения  $n = 600$  об/мин. Активная длина обмотки ротора  $l = 10$  см, диаметр  $D = 20$  см, в пазу ротора размещаются 20 витков, магнитная индукция в воздушном зазоре 1 Тл. Определите максимальное значение ЭДС, наводимое в обмотке.

6. На проводник длиной  $l = 10$  см с током  $I = 2$  А действует магнитное поле с индукцией  $B = 1,3$  Тл (рис. 4.4, а). Определите значение и направление силы, действующей на проводник.

7. Проводник длиной  $l = 10$  см перемещается в магнитном поле с индукцией  $B = 1,3$  Тл (рис. 4.4, б). Скорость перемещения прово-

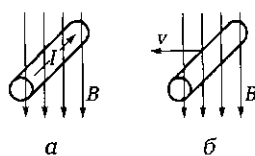


Рис. 4.4. Проводник с током в магнитном поле:  
а — к задаче 6 подразд. 4.1; б — к задаче 7 подразд. 4.1

Наименование	Обозначение	Единица измерения
Индукция	$\Phi$	А/м
Напряженность магнитного поля	$I_w$	Тл
Намагничивающая сила	$B$	Гн/м
Магнитный поток	$\mu_0$	А
Магнитная постоянная	$H$	Вб

Рис. 4.5. Соответствие между параметром магнитного поля, его буквенным обозначением и единицей измерения (к задаче 9 подразд. 4.1)

длики  $v = 100$  см/с. Определите значение и направление ЭДС в проводнике.

8. Чему равна индуктивность катушки  $L$ , если при скорости изменения тока  $\Delta I/\Delta t = 2$  А/с в ней индуцируется ЭДС самоиндукции  $E = 3$  В?

9. Покажите прямыми линиями на рис. 4.5 соответствие между параметром магнитного поля, его буквенным обозначением и единицей измерения.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

- Какие принципы положены в основу работы электромагнитных устройств:
  - суперпозиции и итерации;
  - электромагнитной индукции и электромагнитных сил;
  - замещения и объединения;
  - умножения и деления?
- Укажите верное выражение для формулы М. Фарадея:
  - $F_{эм} = IBv$ ;
  - $F_{эм} = IBI$ ;
  - $e = IBv$ ;
  - $e = IBI$ .
- Укажите верное выражение для формулы А. М. Ампера:
  - $F_{эм} = IBv$ ;
  - $F_{эм} = IBI$ ;
  - $e = IBv$ ;
  - $e = IBI$ .
- Какие материалы относятся к ферромагнитным:
  - железо, медь, кобальт;
  - железо, кобальт, никель;

- в) вольфрам, железо, никель;
  - г) золото, олово, серебро?
5. Какой структурой обладают ферромагнетики:
- а) сложной кристаллической;
  - б) простой аморфной;
  - в) доменной;
  - г) молекулярной?
6. Укажите верное соотношение для относительной магнитной проницаемости ферромагнитных материалов:
- а)  $\mu = 1$ ;
  - б)  $\mu = 0$ ;
  - в)  $\mu \ll 1$ ;
  - г)  $\mu \gg 1$ .

## 4.2. ПОНЯТИЕ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ. АНАЛОГИЯ МЕЖДУ МАГНИТНЫМИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЦЕПЯМИ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

---

### ТЕОРИЯ

#### 4.2.1. Понятие магнитной цепи. Закон полного тока

Все электромагнитные приборы и устройства могут работать как на постоянном, так и на переменном токе. Следовательно, различают магнитные цепи постоянного и переменного тока.

☛ Под *магнитной цепью* (МЦ) понимают совокупность тел и сред, представляющих собой путь, по которому замыкается магнитный поток. Тела — это ферромагнитные материалы (железо, кобальт, никель), среда — немагнитные материалы (воздух, алюминий, медь и др.).

Магнитная цепь, как и электрическая, содержит источники энергии, проводники и потребители энергии. В качестве источников обычно используются катушки, питаемые постоянным или переменным током. В магнитных цепях постоянного тока магнитное поле создается за счет постоянного тока, который протекает по обмотке, располагаемой на каркасе (рис. 4.6, а), либо за счет

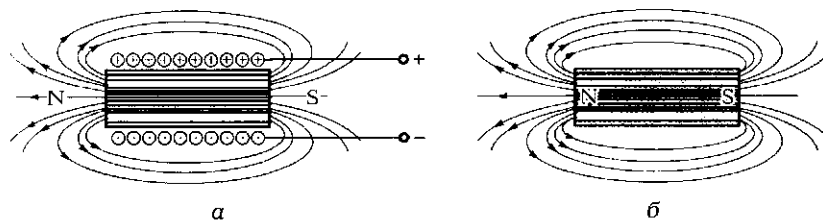


Рис. 4.6. Источники постоянного магнитного поля:

а — электромагнит; б — постоянный магнит

постоянных магнитов N—S (рис. 4.6, б). Проводниками являются магнитопроводы, выполненные из ферромагнитных материалов, обладающих наименьшим сопротивлением для магнитного потока. Приемником энергии магнитного поля обычно выступает воздушный зазор, в котором сосредотачивается максимальное значение энергии, способной совершать механическую работу.

Для расчета магнитных цепей необходимо установить связь между напряженностью магнитного поля  $H$  и намагничивающим током  $I$ . Связь эта определяется *законом полного тока*:

$$Iw = H_1l_1 + H_2l_2 + H_3l_3,$$

или

$$\sum Iw = \sum Hl,$$

где  $w$  — число витков катушки с током, создающей магнитное поле;  $H_1, H_2, H_3$  — значения напряженности магнитного поля на участках магнитной цепи длиной соответственно  $l_1, l_2, l_3$ ;  $l$  — длина магнитной цепи,  $l = l_1 + l_2 + l_3$ .

☛ В общем случае закон полного тока можно сформулировать так: в замкнутом контуре магнитной цепи алгебраическая сумма намагничивающих сил равна сумме падений магнитных напряжений.

### 4.2.2. Аналогия между магнитными и электрическими цепями

Закон полного тока для магнитных цепей аналогичен второму закону Кирхгофа для электрических цепей. Можно привести и другую аналогию между ЭЦ и МЦ (табл. 4.1). На этом основании при расчете магнитных цепей часто пользуются эквивалентными схемами замещения, аналогичными схемам электрических цепей. Такой подход упрощает порядок расчета.



Электрическая цепь		Магнитная цепь			
Наименование	Обозначение	Единица измерения	Наименование	Обозначение	Единица измерения
ЭДС	$E$	В	МДС	$F_m = Iw$	А
Падение напряжения	$U$	В	Падение магнитного напряжения	$U_m = HI$	А
Ток	$I$	А	Магнитный поток	$\Phi$	Вб
Электрическое сопротивление	$R = \rho l/S = l/(\gamma S)$	Ом	Магнитное сопротивление	$R_m = l/(\mu S)$	1/Гн
Плотность тока	$j = I/S$	А/м <sup>2</sup>	Плотность магнитного потока (индукция)	$B = \Phi/S$	Тл = Вб/м <sup>2</sup>
Первый закон Кирхгофа	$\sum I = 0$		Первый закон Кирхгофа	$\sum \Phi = 0$	
Второй закон Кирхгофа	$\sum E = \sum U = \sum RI$		Закон полного тока	$\sum Iw = \sum HI = \sum R_m \Phi$	
Закон Ома	$I = U/R$		Закон Ома	$\Phi = Iw/R_m$	

### 4.2.3. Электромагнитные устройства

В электромагнитных приборах и устройствах (например, электромагнитах, электромагнитных реле, электрических машинах) преобразование электрической энергии в механическую или наоборот происходит посредством магнитной энергии.

☛ **Электромагниты** — это электромеханические устройства, преобразующие электрическую энергию в работу, связанную с линейным или угловым перемещением.

Указанные устройства используют для включения и отключения коммутационных аппаратов (реле, контакторов, пускателей), для открытия и закрытия клапанов, заслонок, вентилялей и т. д. Они применяются в распределительных устройствах пневмо- и гидроприводов для управления потоком газа или жидкости, в электромагнитных муфтах, устройствах защиты (тепловых или токовых реле, автоматических предохранителях).

На рис. 4.7 показан внешний вид различных электромагнитов, а на рис. 4.8 показаны схемы электромагнитов, используемых для управления распределительными устройствами пневмо- и гидроприводов.

При подаче тока в катушку 1 возникает электромагнитная сила, под действием которой якорь 3 поворачивается (рис. 4.8, а, в) или линейно перемещается (рис. 4.8, б, г) в направлении сердечника 2.

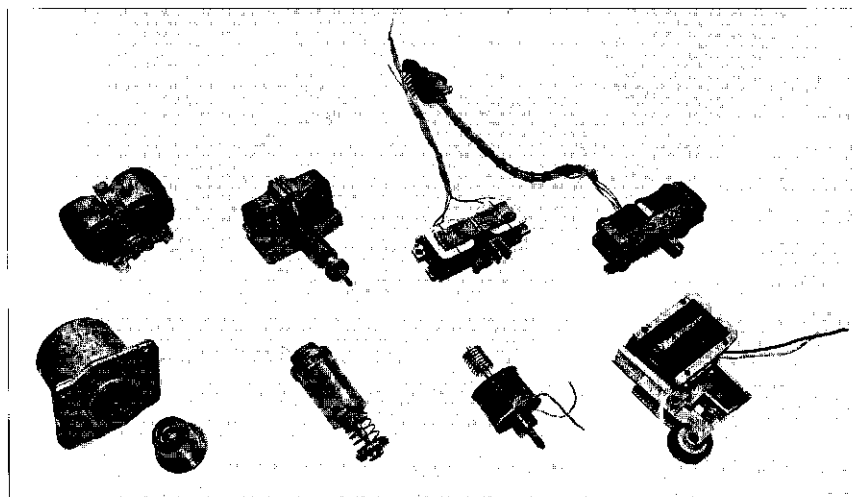


Рис. 4.7. Внешний вид электромагнитов

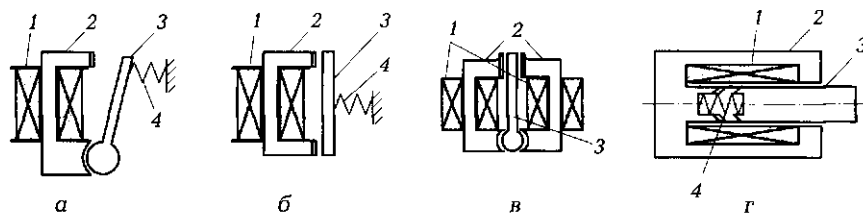


Рис. 4.8. Схемы электромагнитов:

а — поворотного; б — с линейным перемещением; в — дифференциального; г — соленоидного; 1 — катушка; 2 — сердечник; 3 — якорь; 4 — пружина

При этом преодолевается сила противодействующей пружины 4. После прекращения подачи тока якорь возвращается в исходное положение под действием пружины.

На рис. 4.8, в изображена схема дифференциального поворотного электромагнита, обеспечивающего поворот якоря по часовой стрелке или против нее при подаче тока соответственно в правую или левую катушку. На рис. 4.8, г показана схема соленоидного электромагнита с конической формой воздушного зазора.

Удерживающие электромагниты используют для закрепления деталей на станках (например, шлифовальных), в подъемных механизмах (для погрузки стальной стружки или металлолома), для закрытия дверей (в составе домофонов).

➤ Основное назначение *электромагнитных реле* — перемещение контактных пружин и замыкание (размыкание) контактов при протекании тока по обмотке.

Конструктивные исполнения реле чрезвычайно разнообразны (рис. 4.9). Они могут быть постоянного или переменного тока, иметь всего два контакта или несколько десятков. Магнитная цепь реле аналогична магнитной цепи электромагнита. Разница лишь в том, что на подвижной части реле — якоря — располагаются контакты, которые могут замыкаться или размыкаться с контактами, размещаемыми на неподвижной части — сердечнике.

➤ Под *электрическими машинами* понимают электромагнитные устройства вращательного типа, преобразующие механическую энергию в электрическую (генераторы) и электрическую энергию в механическую (электродвигатели).

Генераторы — это основной вид источников электрической энергии, электродвигатели — основной вид источников механической энергии, приводящей в действие станки, транспортные средства,

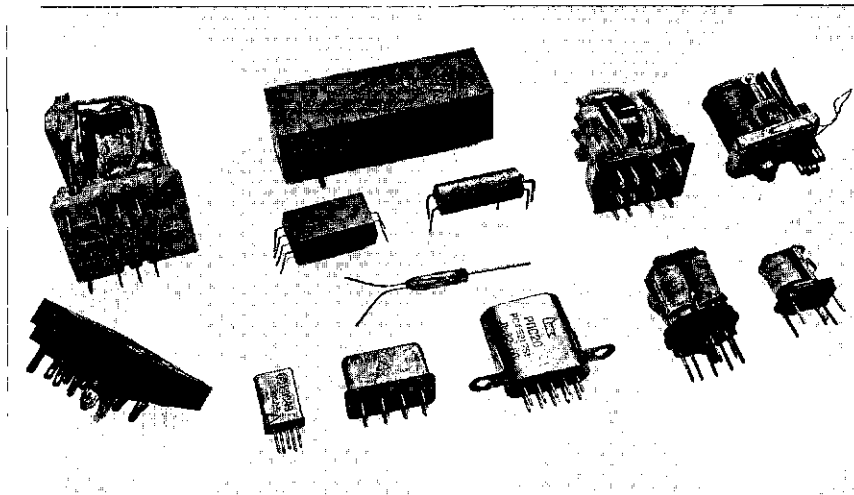


Рис. 4.9. Внешний вид электромагнитных реле

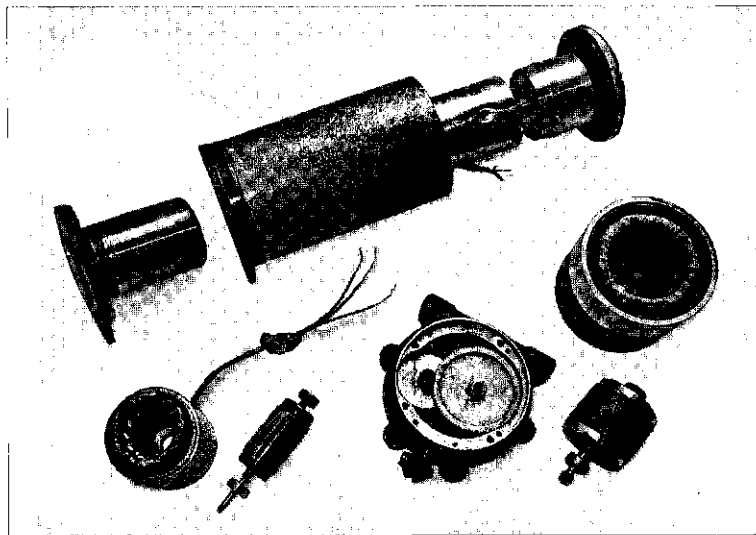


Рис. 4.10. Внешний вид статоров и роторов электрических машин

подъемные механизмы, бытовую технику и т.д. Электрические машины могут работать на постоянном и переменном токе.

Схемы и конструкция электрических машин могут быть самыми различными (см. гл. 7), но все они имеют две основные части: неподвижный статор и вращающийся ротор (рис. 4.10).

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. Нарисуйте схему замещения магнитной цепи электрического двигателя постоянного тока, конструктивная схема которого показана на рис. 4.11, а. Магнитопровод двигателя выполнен из электротехнической стали.

*Решение.* Источником магнитного поля являются две обмотки с числом витков  $w$ , расположенные на полюсах 1 и питаемые постоянным током  $I$ . Обмотки соединены последовательно и включены согласно, т. е. их намагничивающие силы складываются и создают намагничивающую силу  $2Iw$ . Вся магнитную цепь можно разделить на ряд участков, изображаемых на эквивалентной схеме замещения в виде магнитных сопротивлений. К ним относятся:

$R_{ст}$ ,  $R_{р}$ ,  $R_{п}$ ,  $R_{п.н}$  — нелинейные магнитные сопротивления стальных участков магнитопровода (соответственно статора, ротора, полюса, полюсного наконечника);

$R_{в.р}$  и  $R_{\sigma 1}$ ,  $R_{\sigma 2}$  — линейные магнитные сопротивления воздушных участков магнитопровода (соответственно рабочего зазора и рассеяния).

Намагничивающая сила  $2Iw$  создает магнитные потоки. Рабочий поток  $\Phi_p$  замыкается по статору 3 с магнитным сопротивлением  $R_{ст}$ , полюсам 1 с сопротивлением  $R_{п}$ , полюсным наконечникам 2 с сопротивлением  $R_{п.н}$ , воздушным рабочим зазорам 5 с сопротивлением  $R_{в.р}$  и ротору 4 с сопротивлением  $R_{р}$ . Помимо рабочего потока  $\Phi_p$  возникают потоки рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  и  $\Phi_{\sigma 2}$ , замыкающиеся через

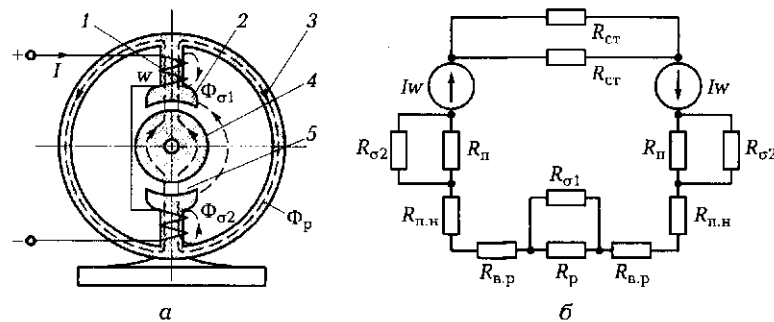


Рис. 4.11. Конструктивная схема электродвигателя (а) и эквивалентная схема замещения (б):

1 — полюс; 2 — полюсный наконечник; 3 — статор; 4 — ротор; 5 — воздушный зазор;  $\Phi_p$  — магнитный рабочий поток;  $\Phi_{\sigma 1}$  и  $\Phi_{\sigma 2}$  — магнитные потоки рассеяния

магнитные сопротивления  $R_{\sigma 1}$ ,  $R_{\sigma 2}$ . Эквивалентная схема замещения магнитной цепи электродвигателя постоянного тока показана на рис. 4.11, б.

2. Определите напряженность магнитного поля в тороидальном сердечнике из феррита, средний диаметр которого  $d = 20$  мм, число витков катушки  $w = 1\,000$ , сила тока в катушке  $I = 100$  мА

*Решение.* Для определения напряженности магнитного поля воспользуемся законом полного тока, в соответствии с которым намагничивающая сила  $Iw$  равна падению магнитного напряжения  $NI$ . Отсюда  $H = Iw/l = Iw/(\pi d) = 0,1 \cdot 1\,000 / (\pi \cdot 20 \cdot 10^{-3}) = 1\,592$  А/м.

*Ответ.* Напряженность магнитного поля в тороидальном сердечнике равна 1 592 А/м.

3. Изменится ли индуктивность катушки, если в нее ввести стальной сердечник?

*Ответ:* Изменится, а точнее — увеличится. Это связано с тем, что введение внутрь катушки стального сердечника при неизменном токе  $I$  уменьшает сопротивление магнитному потоку  $R_m = l/(\mu_a S)$ , в результате чего поток  $\Phi = Iw/R_m$  возрастает. А индуктивность — это коэффициент пропорциональности между током и потоком:  $\Phi = LI$ .

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

4. Нарисуйте схему замещения магнитной цепи электромагнита поворотного типа, конструктивная схема которого показана на рис. 4.12, а. Магнитопровод электромагнита выполнен из электротехнической стали.

5. Нарисуйте схему замещения магнитной цепи электромагнита соленоидного типа, конструктивная схема которого показана

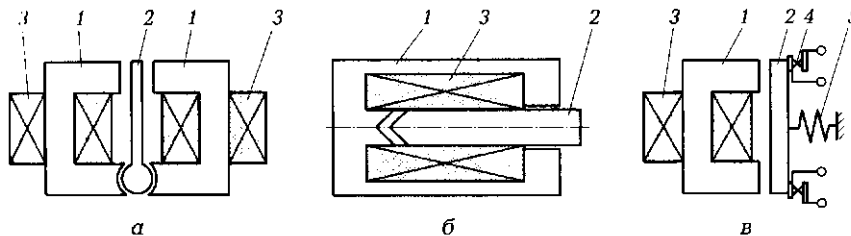


Рис. 4.12. Конструктивные схемы электромагнитных устройств к задачам 4 (а), 5 (б), 6 (в) подразд. 4.2:

1 — сердечник; 2 — ярлык; 3 — обмотка; 4 — контактная группа; 5 — пружина

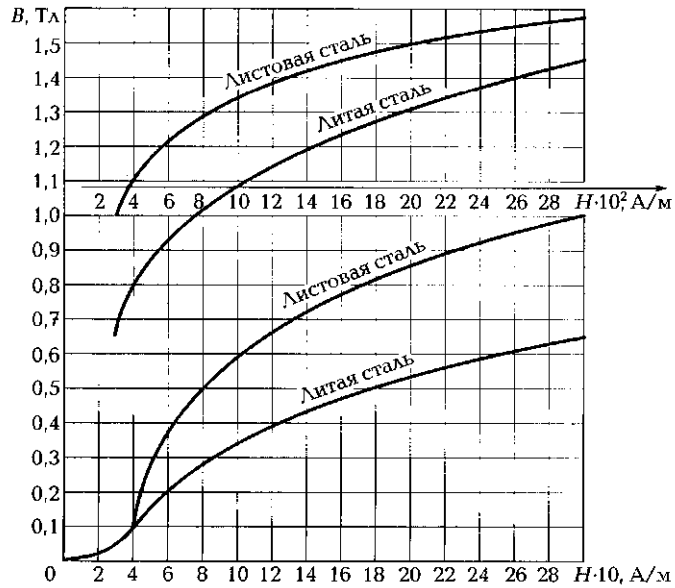


Рис. 4.13. Кривые намагничивания к задачам 7 и 8 подразд. 4.2

на рис. 4.12, б. Магнитопровод электромагнита выполнен из электротехнической стали.

6. Нарисуйте схему замещения магнитной цепи электромагнитного реле с размыканием контактов, конструктивная схема которого показана на рис. 4.12, в. Магнитопровод реле выполнен из электротехнической стали.

7. Вычислите сопротивление магнитопровода трансформатора  $R_m$ , выполненного из листовой стали, кривая намагничивания кото-

Наименование	Обозначение	Единица измерения
Индуктивность	$\Psi$	Гн
Потокосцепление	$L$	—
Магнитная проницаемость	$R_m$	1/Гн
ЭДС самоиндукции	$\mu$	В
Магнитное сопротивление	$e_L$	Вб

Рис. 4.14. Соответствие между наименованием параметра магнитной цепи, его буквенным обозначением и единицей измерения (к задаче 9 подразд. 4.2)

рой показана на рис. 4.13, если длина сердечника  $l = 24$  см, площадь его поперечного сечения  $S = 2,4$  см<sup>2</sup>, магнитный поток  $3 \cdot 10^{-4}$  Вб.

8. Определите значение магнитного потока в сердечнике дросселя, выполненном из листовой стали, кривая намагничивания которой показана на рис. 4.13, если длина средней магнитной линии в сердечнике равна 40 см, площадь поперечного сечения — 4 см<sup>2</sup>, число витков — 800, сила тока — 0,2 А.

9. Покажите прямыми линиями на рис. 4.14 соответствие между наименованием параметра магнитной цепи, его буквенным обозначением и единицей измерения.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Что такое магнитная цепь:
  - а) совокупность устройств, по которым замыкается ток;
  - б) совокупность тел и сред, по которым замыкается ток;
  - в) совокупность устройств, по которым замыкается магнитный поток;
  - г) совокупность тел и сред, по которым замыкается магнитный поток?
2. Может ли магнитный поток замыкаться через воздушный зазор:
  - а) нет, никогда;
  - б) может только при сверхнизких температурах;
  - в) может только при сверхвысоких давлениях;
  - г) может?
3. Укажите основные виды электромагнитных устройств:
  - а) электрические двигатели;
  - б) генераторы;
  - в) электромагниты и электромагнитные реле;
  - г) все перечисленные устройства.
4. Укажите основное отличие электромагнитного реле от электромагнита:
  - а) реле служит для замыкания магнитной цепи;
  - б) реле служит для перемещения подвижного элемента;
  - в) реле служит для замыкания контактов;
  - г) все перечисленное.
5. Назовите основные составные части магнитопровода электрических машин:
  - а) статор и обмотка;
  - б) статор и ротор;



- в) ротор и подшипники;  
 г) ротор и обмотка.
6. Укажите правильное выражение закона Ома для магнитных цепей:
- а)  $\Phi = Iw/R_M$ ;  
 б)  $I = U/R$ ;  
 в)  $F_M = \Phi/R_M$ ;  
 г)  $U = IR$ .
7. Укажите правильное выражение для магнитного сопротивления:
- а)  $R_M = \rho l/S$ ;  
 б)  $R_M = l/(\mu S)$ ;  
 в)  $R_M = l\mu S$ ;  
 г)  $R_M = U/I$ .
8. Укажите правильное выражение для закона полного тока:
- а)  $\sum Iw = \sum R_M \Phi$ ;  
 б)  $\sum Iw = \sum F_M/R_M$ ;  
 в)  $\sum \Phi = 0$ ;  
 г)  $\sum \Phi = \sum IwR_M$ .

### 4.3. РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

#### ТЕОРИЯ

##### 4.3.1. Расчет магнитных цепей постоянного тока

Расчет магнитных цепей сводится:

- к определению *намагничивающей силы* (н.с.), необходимой для создания заданного магнитного потока  $\Phi$  — прямая задача;
- определению *поточков*  $\Phi$  на отдельных участках цепи при заданном значении намагничивающей силы — обратная задача.

При этом известны геометрические размеры всех участков магнитопровода (площадь поперечного сечения  $S$  и длина  $l$ ) и марки материалов, а значит, их кривые намагничивания.

*Прямая задача* не вызывает особых трудностей. Для ее решения используют обычные аналитические методы с применением кривых намагничивания. Алгоритм расчета при этом следующий.

1. Весь магнитопровод разбивают на ряд однородных участков с одинаковыми площадями поперечного сечения  $S_i$ , определяют длины этих участков  $l_i$ .

2. Для заданного потока  $\Phi_0$  определяют индукцию  $B_i$  на каждом участке:

$$B_i = \frac{\Phi_0}{S_i}.$$

3. Пользуясь кривой намагничивания  $B(H)$ , приводимой в виде графика либо таблицы в справочниках, для ферромагнитных участков с полученными значениями  $B_i$  определяют напряженность  $H_i$  на каждом участке. Для воздушных участков напряженность  $H_v$  находят по формуле

$$H_v = \frac{B_v}{\mu_0} = 8 \cdot 10^5 B_v.$$

4. Зная напряженности магнитного поля  $H_i$  и длины  $l_i$  участков, по закону полного тока определяют н. с. катушки:

$$Iw = \sum H_i l_i.$$

*Обратная задача* — определение потока  $\Phi$  по заданной намагничивающей силе  $Iw$  — решается методом последовательного приближения (итерации). Задаются некоторым значением потока  $\Phi_1$  и решают прямую задачу. Если вычисленное значение  $Iw_1$  больше заданного значения  $Iw$ , то принимают значение потока  $\Phi_2 < \Phi_1$  и вновь решают прямую задачу. И так до тех пор, пока вычисленное значение н. с. не станет равно заданному.

Следует отметить, что погрешность расчета электромагнитных устройств в пределах 10...20% считается вполне удовлетворительной. Это обусловлено в первую очередь тем, что в отличие от электрического тока магнитный поток имеет возможность замыкаться и через воздушные зазоры, образуя потоки рассеяния (10...15% основного потока). Кроме того, зависимость  $B(H)$  неоднозначна, а в справочнике приводится основная кривая намагничивания. Все это снижает точность расчета магнитных цепей, поскольку требуется принятие тех или иных допущений.

Свойство электрического тока возбуждать магнитное поле и способность магнитного поля катушки запасать энергию широко используются в технике, в частности в измерительных приборах, электромагнитах, электродвигателях и т. д. Механическая работа, совершаемая при перемещении подвижных элементов электромагнитных устройств, определяется магнитной энергией, запасенной в воздушном зазоре.

Как уже отмечалось (см. подразд. 4.2.3), конструктивные схемы электромагнита могут быть самыми разнообразными, но основных

элементов у этого устройства три: сердечник, катушка и якорь (подвижный элемент). Сила, с которой сердечник притягивает якорь под действием энергии электромагнитного поля, называется электромагнитной силой  $F_{эм}$ . Она измеряется в ньютонах (Н) и может быть определена по известным значениям индукции в воздушном рабочем зазоре  $B_{в.р.}$  или магнитного потока  $\Phi$ , или намагничивающей силы в воздушном рабочем зазоре  $(Iw)_{в.р.}$  и конструктивным размерам магнитопровода (площади поперечного сечения  $S_{в.р.}$  и длине  $\delta_{в.р.}$  воздушного рабочего зазора):

$$F_{эм} = \frac{B_{в.р.}^2 S_{в.р.}}{2\mu_0} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S_{в.р.}} = 0,5 \left( \frac{(Iw)_{в.р.}}{\delta_{в.р.}} \right)^2 \mu_0 S_{в.р.}$$

### 4.3.2. Магнитные цепи переменного тока. Магнитные потери

Магнитные цепи, в которых магнитное поле возбуждается катушками, питаемыми переменным током, называются *магнитными цепями переменного тока*.

В соответствии с законом электромагнитной индукции, открытым М. Фарадеем в 1831 г., переменное магнитное поле, возбуждаемое переменным напряжением  $u$ , приложенным к катушке с числом витков  $w_1$  (рис. 4.15, а), пересекая эти витки, наводит в них так называемую ЭДС самоиндукции  $e_1 = -w_1 \Delta\Phi/\Delta t$ , которая пропорциональна числу витков  $w_1$  и скорости изменения магнитного потока  $\Delta\Phi/\Delta t$ . Поскольку  $\Phi = Li$ , выражение для ЭДС самоиндукции можно записать в виде  $e_1 = -w_1 L \Delta i/\Delta t$ .

Знак «минус» указывает на то, что наводимая ЭДС направлена навстречу приложенному переменному напряжению  $u$  и стремится

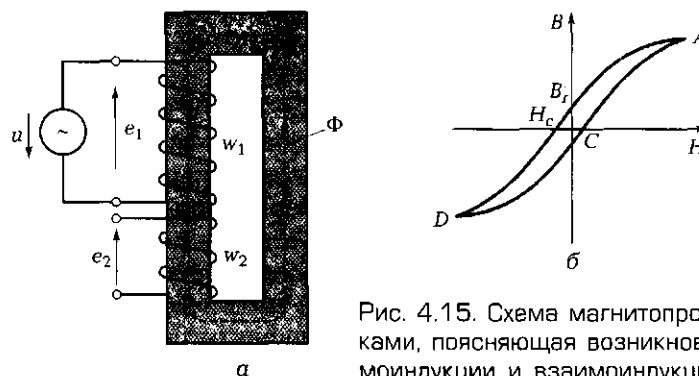


Рис. 4.15. Схема магнитопровода с обмотками, поясняющая возникновение ЭДС самоиндукции и взаимной индукции (а) и петля гистерезиса материала магнитопровода (б)

ся уменьшить его. Если переменный поток, создаваемый одной катушкой, пересекает витки второй катушки (например, в трансформаторе), то во второй катушке с числом витков  $w_2$  также наводится ЭДС. Это так называемая ЭДС взаимной индукции  $e_2 = -w_2 \Delta \Phi / \Delta t$ .

Переменный ток создает в сердечнике магнитное поле, изменение которого сопровождается циклическим перемагничиванием материала сердечника. Для катушки с ферромагнитным сердечником линейная связь между напряжением и током нарушается в отличие от катушки, помещенной в немагнитную среду. Это объясняется нелинейной зависимостью  $B(H)$ .

Данное явление называется *магнитным гистерезисом*, а петля гистерезиса (рис. 4.15, б) соответствует одному циклу перемагничивания (за один период гармонического сигнала рабочая точка перемещается от точки  $A$  через точки  $B$ , и  $H_c$  к точке  $D$  и далее через точку  $C$  снова к точке  $A$ ). О процессах, которые происходят в материале сердечника в различных точках петли гистерезиса, говорится в подразд. 4.1.3.

☛ Перемагничивание магнитного материала связано с затратой работы, а следовательно, с потерями на нагрев (потерями на гистерезис).

Потери эти пропорциональны площади петли. Вид и параметры петли гистерезиса зависят от марки материала. Узкая петля гистерезиса присуща магнитомягким материалам (электротехническая сталь, железо, сплав железа с никелем или кобальтом), для которых характерны небольшие потери на гистерезис. Значительно труднее перемагнитить магнитотвердые материалы, ширина петли гистерезиса которых во много раз (до 1 000) превышает ширину петли, например, электротехнической стали. Потери на гистерезис у магнитотвердых материалов весьма значительны.

☛ Работа электромагнитных устройств на переменном токе сопровождается также потерями на *вихревые токи*.

На рис. 4.16, а показано сечение магнитопровода, выполненного из сплошного куска электротехнической стали. Переменное магнитное поле с индукцией  $B$  пронизывает магнитопровод, и вокруг каждой силовой линии магнитного поля в соответствии с законом электромагнитной индукции наводится ЭДС, вызывающая протекание тока  $i_v$ . Этот ток называют *вихревым*. Поскольку все вихревые токи имеют одно направление (согласно правилу буравчика), замкнутая траектория суммарного тока  $i_{в\Sigma}$  будет охватывать весь магнитопровод. При этом электрическое сопротивление магнитопровода  $R = \rho l / S$  сравнительно мало, поскольку площадь сечения  $S$  велика. Следовательно, в сплошном магнитопроводе вихревые

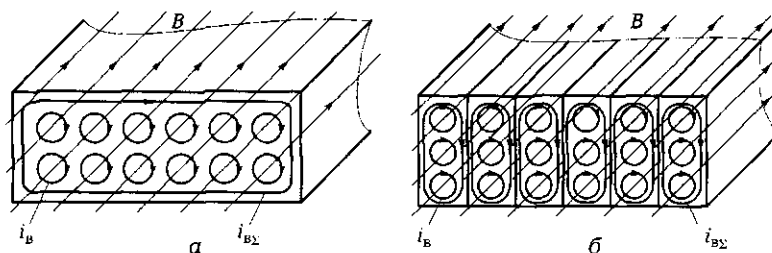


Рис. 4.16. Вихревые токи в сплошном (а) и наборном (б) магнитопроводах

токи значительны. Их протекание ведет к существенному нагреву магнитопровода.

☛ Если же магнитопровод выполнить из тонких отдельных стальных пластин, изолированных электрически друг от друга (рис. 4.16, б), то электрическое сопротивление вихревым токам будет существенно выше, а значит, сами токи — намного меньше.

Вот почему при изготовлении, например, роторов электрических машин, в которых наводится значительная ЭДС, используют наборы пластин листовой стали толщиной 0,35 или 0,5 мм, изолированных электрически друг от друга лаком. Это позволяет значительно уменьшить и вихревую ЭДС, и сечение ферромагнитного материала, повысив тем самым его сопротивление. Кроме того, в электротехническую сталь вводят 2...4% кремния, что повышает удельное электрическое сопротивление материала в 6—10 раз.

Магнитопровод трансформатора, в котором вихревые токи наводятся переменным магнитным потоком, также выполняют из отдельных пластин электротехнической стали. Это позволяет существенно снизить потери на вихревые токи и поднять КПД трансформатора.

В большинстве электромагнитных устройств вихревые токи вредны, так как снижают их КПД. В то же время в ряде устройств вихревые токи выполняют важную роль. Например, свойство вихревых токов нагревать металл — *индукционный нагрев* — широко используется в промышленности для плавки металла и закалки деталей.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. Для поворотного электромагнита, схема которого показана на рис. 4.17, а, известны конструктивные размеры отдельных

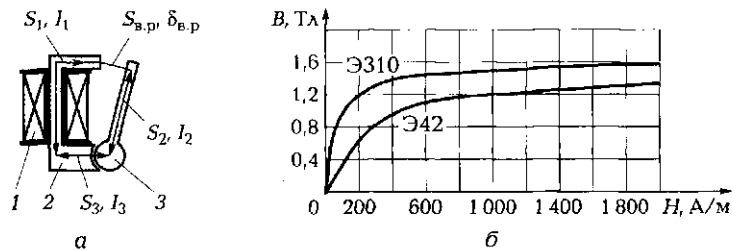


Рис. 4.17. Конструктивная схема поворотного электромагнита (а) и кривые намагничивания (б) к задачам 1, 2, 8 подразд. 4.3:

1 — обмотка; 2 — сердечник; 3 — якорь

ого участков, материал магнитопровода и магнитный поток  $\Phi = 1,6 \cdot 10^{-5}$  Вб.

Даны площадь поперечного сечения, длина и материал трех ферромагнитных участков:

$$S_1 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2, l_1 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м, материал Э42;}$$

$$S_2 = 10^{-5} \text{ м}^2, l_2 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м, материал Э310;}$$

$$S_3 = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2, l_3 = 10^{-2} \text{ м, материал Э42.}$$

Кроме того, даны площадь поперечного сечения и длина двух воздушных участков — рабочего ( $S_{в,р} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2, \delta_{в,р} = 10^{-3} \text{ м}$ ) и технологического ( $S_{в,т} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2, \delta_{в,т} = 10^{-4} \text{ м}$ ).

На рис. 4.17, б показана зависимость магнитной индукции  $B$  от напряженности магнитного поля  $H$  для материалов Э310 и Э42, используемых в конструкции электромагнита.

Вычислите намагничивающую силу, обеспечивающую заданное значение потока, и электромагнитную силу, действующую на якорь в исходном состоянии. Дайте оценку конструкции магнита.

*Решение.* Вычисляем значение индукции на каждом участке магнитопровода:

$$B_1 = \Phi/S_1 = 1,6 \cdot 10^{-5}/(2 \cdot 10^{-5}) = 0,8 \text{ Тл}; B_2 = 1,6 \text{ Тл}; B_3 = 0,27 \text{ Тл};$$

$$B_{в,р} = 0,8 \text{ Тл}; B_{в,т} = 0,27 \text{ Тл.}$$

По графику на рис. 4.17, б находим для трех ферромагнитных участков значения напряженности магнитного поля, соответствующие полученным значениям индукции:

$$H_1 = 270 \text{ А/м}; H_2 = 2000 \text{ А/м}; H_3 = 70 \text{ А/м.}$$

Определяем значения напряженности для воздушных участков:

$$H_{в,р} = 8 \cdot 10^5 \text{ А/м}; H_{в,т} = 8 \cdot 10^5 \cdot 0,8 = 6,4 \cdot 10^5 \text{ А/м}; H_{в,т} = 2,16 \cdot 10^5 \text{ А/м.}$$

Вычисляем падения магнитного напряжения на участках магнитопровода:

$$H_1 l_1 = 270 \cdot 3 \cdot 10^{-2} = 8,1 \text{ А}; H_2 l_2 = 40 \text{ А}; H_3 l_3 = 0,7 \text{ А};$$

$$H_{в.р} \delta_{в.р} = 640 \text{ А}; H_{в.т} \delta_{в.т} = 21,6 \text{ А}.$$

Находим в соответствии с законом полного тока суммарную намагничивающую силу, обеспечивающую заданное значение магнитного потока:

$$Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_{в.р} \delta_{в.р} + H_{в.т} \delta_{в.т} = 710,4 \text{ А}.$$

Вычисляем электромагнитную силу, действующую на якорь:

$$F_{эм} = \frac{(Iw)_{в.р}^2 \mu_0 S_{в.р}}{2\delta_{в.р}^2} = \frac{(H_{в.р} \delta_{в.р})^2 \mu_0 S_{в.р}}{2\delta_{в.р}^2} = \frac{640^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 10^{-6}} = 5,14 \text{ Н}.$$

*Ответ.* Расчеты электромагнита показывают, что конструктивная схема, размеры отдельных участков магнитопровода и их материал выбраны грамотно, так как практически 90 % всей намагничивающей силы  $Iw = 710,4 \text{ А}$  сосредоточены именно в воздушном рабочем зазоре ( $(Iw)_{в.р} = 640 \text{ А}$ ), что позволяет получить высокий КПД электромагнита и значительную электромагнитную силу, равную 5,14 Н.

2. Сердечник электромагнитного реле изготовлен из стали Э310 и имеет длину  $l = 5 \text{ см}$  и площадь поперечного сечения  $100 \text{ мм}^2$ . Катушка электромагнитного реле с числом витков  $w = 120$  и сопротивлением  $R = 90 \text{ Ом}$  питается от источника постоянного тока напряжением  $U = 27 \text{ В}$ . Определите магнитный поток в сердечнике.

*Решение.* В соответствии с законом полного тока  $Iw = Hl$ . Отсюда напряженность магнитного поля  $H = Iw/l$ . Значение тока определим по закону Ома:  $I = U/R = 27 \text{ В}/90 \text{ Ом} = 0,3 \text{ А}$ . Следовательно, намагничивающая сила  $Iw = 0,3 \cdot 120 = 36 \text{ А}$ , а напряженность  $H = 36 \text{ А}/0,05 \text{ м} = 720 \text{ А/м}$ .

По кривой намагничивания стали Э310 (см. рис. 4.17, б) находим, что значению напряженности  $H = 720 \text{ А/м}$  соответствует значение индукции  $B = 1,5 \text{ Тл}$ . Магнитный поток  $\Phi = BS = 1,5 \text{ Тл} \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$ .

*Ответ.* Магнитный поток в сердечнике электромагнитного реле равен  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$ .

3. Что произойдет с двумя параллельными проводниками, по которым текут токи одного направления?

*Ответ.* На проводники будут действовать силы, стремящиеся их сблизить. Действительно, в этом случае вокруг каждого проводника с током образуются магнитные силовые линии одного направления.

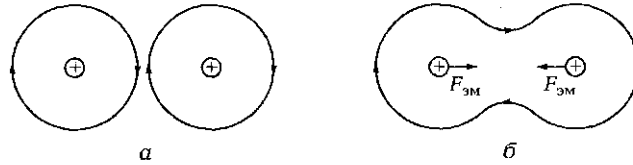


Рис. 4.18. Магнитные силовые линии вокруг проводников с током (а) и электромагнитные силы, действующие на проводники (б) [к задаче 3 подразд. 4.3]

На рис. 4.18, а ток течет от нас, поэтому магнитные силовые линии замыкаются по часовой стрелке. Там, где эти линии соприкасаются, они направлены встречно, а значит, компенсируют друг друга, уничтожая магнитное поле в этом месте. Силовые линии становятся как бы общими для обоих проводников с током (рис. 4.18, б), поэтому проводники стремятся сблизиться, чтобы уменьшить длину силовых линий и тем самым снизить магнитное сопротивление среды.

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

4. Подковообразный электромагнит развивает усилие, достаточное для преодоления силы пружины в 10 Н. Определите значение индукции в воздушном зазоре в этот момент, а также ее значение после прихода якоря на упор, если площадь поперечного сечения воздушного зазора  $S = 2 \text{ см}^2$ , а усилие электромагнита после прихода якоря на упор возрастает в 6,25 раза.

5. Какой ток должен протекать по катушке электромагнита с числом витков 1 000, чтобы он действовал на удаленную от него на 2 мм металлическую деталь с усилием 5 Н при площади поперечного сечения воздушного зазора  $1 \text{ см}^2$ ? Известно, что 80 % всей намагничивающей силы сосредоточено в воздушном зазоре.

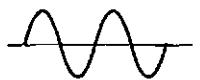
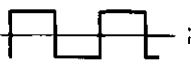

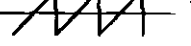
6. В подъемном электромагните с площадью поперечного сечения  $S = 0,1 \text{ м}^2$  действует магнитный поток  $\Phi = 0,1 \text{ Вб}$ . Определите силу притяжения электромагнита.

7. Какой ток протекает в катушке электромагнитного реле, если число витков катушки  $w = 1 000$ , а индукция в воздушном рабочем зазоре  $B_{\text{в.р}} = 1 \text{ Тл}$ ? Принять, что вся намагничивающая сила сосредоточена в воздушном рабочем зазоре длиной  $l = 1 \text{ мм}$ .

8. Определите индуктивность дросселя, если число витков его катушки  $w = 200$ , средняя длина сердечника, изготовленного из стали Э310 (см. рис. 4.17, б),  $l_{\text{ср}} = 50 \text{ мм}$ , площадь поперечного сечения сердечника  $S = 50 \text{ мм}^2$ , значение тока  $I = 0,1 \text{ А}$ .



## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Одна из катушек трансформатора включена на переменное напряжение: Как называется ЭДС, наводимая в этой катушке образованным магнитным потоком:
  - а) ЭДС самоиндукции;
  - б) ЭДС взаимной индукции;
  - в) ЭДС вихревых токов;
  - г) гистерезисная ЭДС?
2. Одна из катушек трансформатора включена на переменное напряжение: Как называется ЭДС, наводимая образованным магнитным потоком во второй катушке:
  - а) ЭДС самоиндукции;
  - б) гистерезисная ЭДС;
  - в) ЭДС вихревых токов;
  - г) ЭДС взаимной индукции?
3. Как должен изменяться магнитный поток (укажите соответствующий график), чтобы наводимая им ЭДС  $e = -w\Delta\Phi/\Delta t$  имела вид двуполярных прямоугольных импульсов:
  - а)  ;
  - в)  ;
  - б)  ;
  - г)  ?
4. Как будут вести себя два параллельных проводника, по которым текут токи в противоположных направлениях:
  - а) останутся неподвижными;
  - б) будут двигаться навстречу друг другу;
  - в) будут двигаться друг от друга;
  - г) будут вести себя непредсказуемо?
5. При каком токе, постоянном или переменном, КПД электромагнитных устройств выше:
  - а) при постоянном;
  - б) при переменном;
  - в) КПД одинаков при работе как на постоянном, так и на переменном токе;
  - г) нет ни одного правильного ответа?
6. Что собой представляют потери на гистерезис и вихревые токи:
  - а) магнитные потери;
  - б) электрические потери;
  - в) механические потери;
  - г) все вместе взятые потери?

7. Магнитопривод из какого материала будет иметь наименьшие магнитные потери:
- а) из сплошного куска железа;
  - б) алюминия;
  - в) листовой электротехнической стали;
  - г) сплава меди и вольфрама?
8. Как в промышленности используются вихревые токи:
- а) для нагрева деталей;
  - б) закалки деталей;
  - в) плавления металла;
  - г) верны все приведенные ответы?
9. Что снижает точность расчета магнитных цепей:
- а) наличие потоков рассеяния, которые трудно учесть;
  - б) использование в расчетах лишь основной кривой намагничивания;
  - в) отклонение реальных магнитных характеристик от приводимых в справочной литературе;
  - г) верны все приведенные ответы?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

### Исследование магнитной цепи постоянного тока

#### 1. Цель работы

1.1. Снять вебер-амперную характеристику материала магнитопротода (магнитной цепи без воздушного зазора).

1.2. Снять вебер-амперную характеристику магнитной цепи с воздушным зазором.

#### 2. Объект и средства испытаний

Объектом испытаний является магнитная цепь трансформатора, выполненная из двух симметричных Ш-образных ферритовых сердечников марки М2000НМ с двумя обмотками по 200 витков каждая и регулируемым воздушным зазором  $\delta_v$  между сердечниками (рис. А11.1). Одна из обмоток является намагничивающей ( $w_{\text{нам}}$ ), другая — измерительной ( $w_{\text{изм}}$ ). Намагничивающая обмотка подключается к регулируемому источнику постоянного напряжения 13 ... 0 ... +13 В через выключатель  $B$  и резистор с сопротивлением  $R_1 = 100$  Ом (рис. А11.2). Параллельно намагничивающей обмотке

включен конденсатор емкостью  $C_1 = 100 \text{ мкФ}$ , обеспечивающий за счет затухающих колебаний в параллельном контуре размагничивание сердечника при выключении питания. Измерительная обмотка трансформатора подключается через интегрирующий усилитель к вольтметру. В качестве измерительных приборов используются мультиметры, работающие в режимах амперметра и вольтметра постоянного тока.

В силу симметрии магнитной цепи трансформатора два крайних стержня при расчетах можно объединить в одну ветвь удвоенного сечения. Наличие в магнитной цепи воздушного зазора  $\delta_v$  существенно увеличивает магнитное сопротивление магнитопровода и оказывает влияние на характеристики магнитной цепи. Сигнал, пропорциональный значению магнитного потока  $\Phi$ , может быть измерен на выходе интегрирующего усилителя с помощью вольтметра  $V(U_{\text{изм}})$ .

### **3. Задание к лабораторной работе**

#### ***Выполняется при подготовке к работе***

3.1. Ознакомиться с порядком выполнения лабораторной работы, теоретическими сведениями по данной теме. Подготовить в рабочей тетради протокол испытаний.

#### ***Выполняется в лаборатории***

3.2. Установить воздушный зазор между сердечниками равным нулю ( $\delta = 0$ ), завернув рукой до отказа регулирующий винт.

Собрать ЭЦ в соответствии со схемой, показанной на рис. А11.2. Подключить намагничивающую обмотку к источнику регулируемого постоянного напряжения  $-13 \dots 0 \dots +13 \text{ В}$ . Установить выключатель  $B$  в положение «Вкл.», а переключатель интегратора — в положение «Сброс».

Включить стенд и, регулируя выходное напряжение источника, добиться, чтобы амперметр показал первое значение тока из приведенных в табл. А11.1 (10 мА).

3.3. Перевести переключатель интегратора в положение интегрирования (в нижнее положение) и тотчас отключить выключателем  $B$  источник питания. Зафиксировать показание вольтметра. Снизить показываемое вольтметром напряжение до нуля, переведя переключатель в положение «Сброс», после чего вновь перевести его в положение интегрирования и сразу же включить источник питания выключателем  $B$ . Вновь зафиксировать показание вольтметра. Занести среднее значение двух показаний вольтметра в строку  $U_{\text{изм}}$  табл. А11.1.

При необходимости выполнить несколько измерений.

3.4. Повторить опыт при всех значениях тока, указанных в табл. Л11.1 и занести значения  $U_{изм}$  в соответствующую строку табл. Л11.1 при  $\delta = 0$ .

3.5. Отключить питание стенда и ввести в зазор между крайними сердечниками два слоя писчей бумаги ( $\delta = 0,2$  мм), после чего повернуть рукой до отказа регулирующий винт. Включить стенд и, устанавливая ток в ЭЦ в соответствии с приведенными в табл. Л11.1 значениями, выполнить измерения напряжения и заполнить строку  $U_{изм}$  в табл. Л11.1 для  $\delta \neq 0$ .

3.6. После согласования протокола испытаний с преподавателем ЭЦ обесточить и разобрать, проводники и мини-блоки убрать на место, рабочее место привести в порядок.

#### 4. Протокол испытаний и отчет о работе № 11

##### Исследование магнитной цепи постоянного тока

4.1. Цель работы \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

4.2. Схемы магнитной и электрической цепей и таблицы.

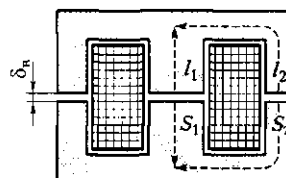


Рис. Л11.1. Схема магнитной цепи трансформатора

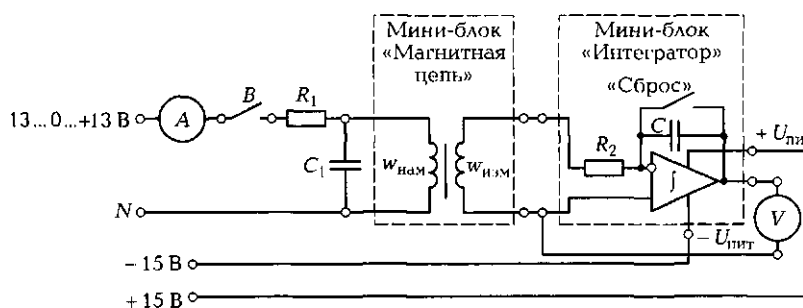


Рис. Л11.2. Схема ЭЦ для снятия вебер-амперной характеристики магнитной цепи трансформатора

Таблица Л11.1							
Воздушный зазор	Параметр	Значения экспериментальных электрических и расчетных магнитных параметров при токе $I$ , мА					
		10	20	40	60	80	100
$\delta = 0$	$U_{изм}$ , В						
	$Iw$ , А						
	$\Phi$ , Вб						
$\delta \neq 0$	$U_{изм}$ , В						
	$Iw$ , А						
	$\Phi$ , Вб						

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_  
 Преподаватель \_\_\_\_\_

4.3. Расчетно-графическая часть.

$$\Phi = R_2 C U_{изм} / w_{изм}$$

где  $R_2 = 5,6$  кОм;  $C = 0,22$  мкФ;  $w_{изм} = 200$  витков.

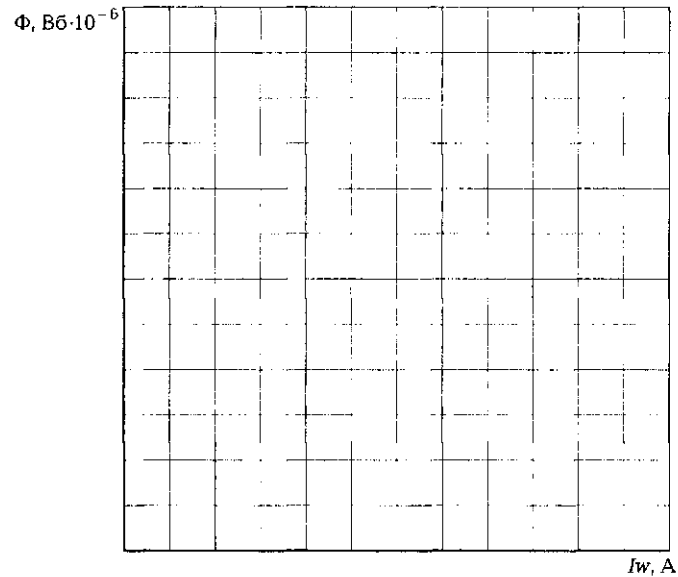


Рис. Л11.3. Вебер-амперная характеристика магнитной цепи трансформатора

4.4. Краткие выводы \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

### 5. Требования к расчетно-графической части отчета

5.1. По экспериментальным данным, занесенным в табл. Л11.1, для каждого значения тока вычислить значения магнитного потока  $\Phi$  и намагничивающей силы  $Iw$ , результаты занести в соответствующие строки табл. Л11.1.

5.2. По полученным данным на рис. Л11.3 построить вебер-амперную характеристику  $\Phi(Iw)$  при  $\delta = 0$  и  $\delta \neq 0$ .

5.3. Сделать краткие выводы по работе.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимают под магнитной цепью?
2. Перечислите основные параметры, характеризующие магнитную цепь, и укажите их размерности.
3. Почему магнитопровод электромагнитов изготавливают из ферромагнитных материалов?
4. Чем определяется магнитное сопротивление участков магнитной цепи?
5. Напишите выражение для магнитного сопротивления воздушного участка.
6. При каких условиях магнитная цепь оказывается нелинейной?
7. Почему точность инженерных расчетов магнитной цепи невелика?
8. Напишите выражения законов Ома и Кирхгофа (полного тока) для магнитной цепи.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12**

### **Исследование магнитной цепи переменного тока**

#### **1. Цель работы**

- 1.1. Проверить опытным путем явление взаимной индукции.
- 1.2. Измерить косвенным путем амплитуду магнитного потока.

1.3. Исследовать петлю гистерезиса и влияние на нее воздушно-го зазора.

## 2. Объект и средства испытаний

Объектом испытаний является магнитная цепь трансформатора, выполненная из двух симметричных Ш-образных ферритовых сердечников с двумя обмотками по 200 витков каждая и регулируемым воздушным зазором между сердечниками. Одна из обмоток служит намагничивающей ( $w_{\text{нам}}$ ), другая — измерительной ( $w_{\text{изм}}$ ). Намагничивающая обмотка подключается к регулируемому источнику постоянного напряжения  $-14 \dots 0 \dots +14$  В или к источнику переменного напряжения — генератору синусоидальных колебаний. Измерительная обмотка трансформатора подключается к вольтметру через интегрирующую цепочку  $R_{\text{и}} - C_{\text{и}}$  с параметрами  $R_{\text{и}} = 2,2$  кОм,  $C_{\text{и}} = 4,4$  мкФ. В качестве измерительных приборов в работе используются мультиметры, работающие в режиме вольтметра, и осциллограф для исследования формы магнитного потока и петли гистерезиса.

Схема магнитной цепи трансформатора показана на рис. А12.1, а, схемы ЭЦ с включенными в нее измерительными приборами — на рис. А12.2 и А12.3.

Наличие в магнитной цепи воздушного зазора существенно увеличивает магнитное сопротивление магнитопровода, в результате чего петля гистерезиса, показанная на рис. А12.1, б, вырождается в прямую линию.

Наблюдать кривую намагничивания материала магнитопровода  $B(H)$  (петлю гистерезиса) можно с помощью электронного осциллографа, если на его вход  $Y$  подать сигнал, пропорциональный магнитной индукции  $B$ , а на вход  $X$  — сигнал, пропорциональный напряженности магнитного поля  $H$ . Сигнал, пропорциональный индукции  $B$ , может быть снят с зажимов конденсатора  $C_{\text{и}}$  интегрирующей цепочки, вход которой подключен к измерительной катушке  $w_{\text{изм}}$  (см. рис. А12.3). Сигнал, пропорциональный напряженности  $H$ , может быть снят с зажимов резистора  $R$  сопротивлением 22 Ом, включенного последовательно с намагничивающей катушкой  $w_{\text{нам}}$ .

## 3. Задание к лабораторной работе

### *Выполняется при подготовке к работе*

3.1. Ознакомиться с порядком выполнения лабораторной работы, теоретическими сведениями по данной теме. Подготовить в рабочей тетради протокол испытаний.

3.2. Выполнить предварительные расчеты, вычислив максимальное значение магнитного потока  $\Phi_{\max}$  и ожидаемое значение индуцируемой в измерительной обмотке ЭДС  $E_{\text{изм}}$ . Расчет провести для двух значений частоты питающего напряжения: а)  $f = 0$ ; б)  $f = 50$  Гц. Результаты занести в протокол испытаний.

#### **Выполняется в лаборатории**

3.3. Установить воздушный зазор между сердечниками равным нулю, завернув рукой до отказа регулирующий винт.

Собрать ЭЦ в соответствии со схемой, показанной на рис. А12.2. Подключить намагничивающую обмотку к источнику постоянного напряжения  $U = 5$  В.

Включить выключатель  $B$  и убедиться с помощью вольтметра  $V1$  в наличии напряжения на намагничивающей обмотке. Измерить вольтметром  $V2$  напряжение на измерительной обмотке. Данные занести в протокол испытаний. Обратит внимание на то, что лишь в переходном режиме (при включении и выключении выключателя  $B$ ) на измерительной обмотке появляются кратковременные импульсы.

3.4. Подключить намагничивающую обмотку к генератору напряжения синусоидальной формы. Подать от генератора сигнал частотой 500 Гц и амплитудой 5 В. Включить выключатель  $B$ . Убедиться с помощью вольтметра  $V1$  в наличии напряжения на намагничивающей обмотке и измерить вольтметром  $V2$  напряжение на измерительной обмотке. Результаты измерений занести в протокол испытаний.

3.5. Собрать ЭЦ в соответствии со схемой, показанной на рис. А12.3. Включить генератор напряжения синусоидальной формы и подвести напряжение 7 В частотой 500 Гц к намагничивающей обмотке. Включить осциллограф и подать на его вход  $Y$  сигнал с выхода интегрирующего устройства, пропорциональный магнитному потоку. Измерить напряжение на выходе интегратора  $U_{\text{вых}}$  и записать результат в протокол испытаний.

Изменяя напряжение на выходе генератора в диапазоне от 3 до 7 В, наблюдать за изменением формы сигнала, пропорционального магнитному потоку. Сделать вывод о влиянии подаваемого напряжения на форму и значение магнитного потока.

3.6. Установить напряжение на выходе генератора равным 5 В, перевести осциллограф в режим  $X—Y$  и разместить в центре экрана изображение кривой  $B(H)$ . Изменяя напряжение на выходе генератора в диапазоне от 3 до 7 В, наблюдать за изменением формы петли гистерезиса. Зарисовать полученное на экране изображение петли гистерезиса при  $\delta_b = 0$  и напряжении на выходе генератора



ра 7 В. Для рисунка выделено место в протоколе испытаний (рис. Л12.4). Сделать вывод о влиянии изменения подаваемого напряжения на петлю гистерезиса.

3.7. Установить воздушный зазор между сердечниками (например, 0,2 мм — ввести в зазор два слоя писчей бумаги) и, не изменяя положения переключателей осциллографа, наблюдать за петлей гистерезиса при наличии воздушного зазора. Зарисовать полученное на экране изображение петли гистерезиса при  $\delta_n \neq 0$  (поместить на рис. Л12.4).

3.8. После согласования протокола испытаний с преподавателем ЭЦ обесточить и разобрать, проводники и мини-блоки убрать на место, рабочее место привести в порядок.

#### 4. Протокол испытаний и отчет о работе № 12

##### Исследование магнитной цепи переменного тока

###### 4.1. Цель работы \_\_\_\_\_

---



---



---

###### 4.2. Формулы и предварительные расчеты.

$w_{\text{нам}} = 200$  витков;  $w_{\text{изм}} = 200$  витков;  $U_{\text{нам}} = 5$  В;

а)  $f = 0$ ,  $E_{\text{изм}} = \underline{\hspace{2cm}}$  В;

б)  $f = 50$  Гц,  $E_{\text{изм}} = \underline{\hspace{2cm}}$  В;

$\Phi_{\text{мах}} = U_1 / (4,44fw_{\text{нам}}) = \underline{\hspace{2cm}}$  Вб.

###### 4.3. Схемы магнитной и электрических цепей.

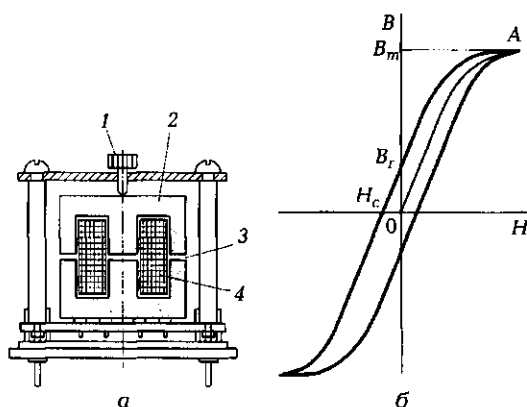


Рис. Л12.1. Схема магнитной цепи трансформатора [а] и петля гистерезиса ферромагнитного материала [б]:

1 — регулировочный винт; 2 — магнитопровод; 3 — воздушный зазор; 4 — катушка

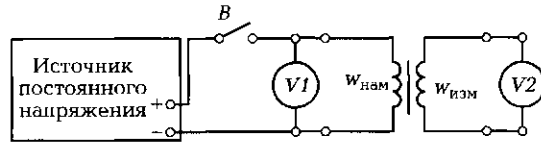


Рис. П12.2. Схема ЭЦ для проверки явления взаимной индукции

Постоянное напряжение ( $f = 0$ );  $U_{изм} = \underline{\hspace{2cm}}$  В;  
 переменное напряжение ( $f = 500$  Гц);  $U_{изм} = \underline{\hspace{2cm}}$  В.

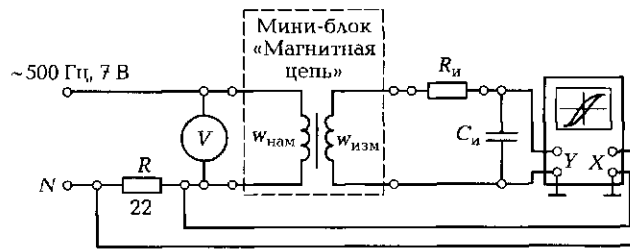


Рис. П12.3. Схема ЭЦ с интегрирующей цепочкой  $R_i - C_i$  для исследования петли гистерезиса

$U_{вх} = \underline{\hspace{2cm}}$  В;  $U_{вых} = \underline{\hspace{2cm}}$  В.

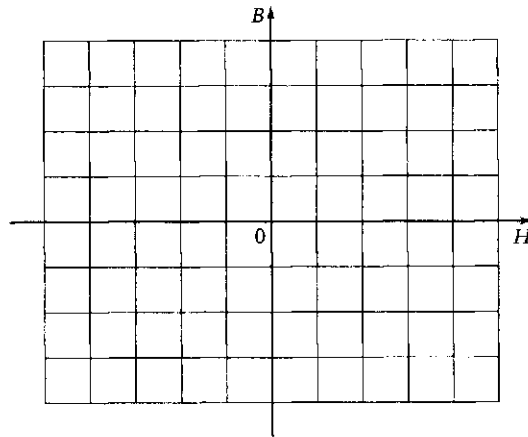


Рис. П12.4. Петля гистерезиса, построенная по экспериментальным данным

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_  
 Преподаватель \_\_\_\_\_

4.4. Расчетно-графическая часть.

$$\Phi_{\max} = \text{_____ Вб}$$

4.5. Краткие выводы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

### 5. Требования к расчетно-графической части отчета

5.1. Вычислить амплитуду магнитного потока по полученным экспериментальным данным:

$$\Phi_{\max} = \sqrt{2} R_{\text{и}} C_{\text{и}} U_{\text{изм}} / w_{\text{изм}}$$

где  $R_{\text{и}} = 2,2 \text{ кОм}$ ;  $C_{\text{и}} = 4,4 \text{ мкФ}$ ;  $w_{\text{изм}} = 200$ .

Рассчитать амплитуду магнитного потока по формуле  $\Phi_{\max} = U_{\text{изм}} / (4,44 f w_{\text{изм}})$ , справедливой при  $w_{\text{изм}} = w_{\text{ном}}$ . Сравнить полученные результаты.

5.2. Сравнить петли гистерезиса при отсутствии воздушного зазора и при его наличии.

5.3. Сделать краткие выводы по работе.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные параметры, характеризующие магнитную цепь, и укажите их размерности.
2. Объясните явление электромагнитной индукции.
3. Какие магнитные материалы имеют узкую петлю гистерезиса?
4. Какие магнитные материалы имеют широкую петлю гистерезиса?
5. Что отражает площадь петли гистерезиса?
6. Как уменьшить потери на вихревые токи при переменном магнитном потоке?
7. Где используется явление взаимной индукции?

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## 5.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

### ТЕОРИЯ

#### 5.1.1. Основные понятия и определения

Чтобы судить о работе той или иной электротехнической установки, предвидеть поведение той или иной системы, фиксировать выход ее параметров за допустимые границы, необходимо использовать специальные измерительные средства — электроизмерительные приборы (ЭИП).

☛ *Измерение* — это определение значений физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Все технические средства можно подразделить на меры и измерительные приборы.

*Меры* служат для воспроизведения физической величины заданного размера (эталонные сопротивление, емкость, индуктивность).

*Измерительный прибор* — это средство измерения, которое предназначено для выработки информации в форме, допустимой для непосредственного восприятия. Такой информацией может быть отклонение стрелки, положение луча осциллографа или же сигнал, подаваемый на соответствующее регулирующее устройство.

☛ *Приборы*, используемые для измерения электрических величин (тока, напряжения, электрической мощности, электрической энергии, сопротивления), называются *электроизмерительными приборами*.

Измерительные приборы подразделяют на аналоговые и цифровые.

В *аналоговых* приборах показания являются непрерывной функцией измеряемой величины. К таким приборам относятся, например, стрелочные амперметры и вольтметры, электронно-лучевые осциллографы.

*Цифровые* приборы вырабатывают дискретные сигналы измерительной информации. Их показания представлены в цифровой форме.

По *виду получаемой измерительной информации* приборы подразделяют следующим образом:

- показывающие (возможен только отсчет показаний);
- регистрирующие (имеет место регистрация показаний);
- самопишущие (представление показаний в виде диаграмм);
- печатающие (вывод показаний на печать);
- интегрирующие (счетчики энергии).

По *способу сравнения с мерой* различают измерительные приборы прямого действия и приборы сравнения.

В *приборе прямого действия* (рис. 5.1, а) имеет место преобразование измеряемой величины в одном направлении. Например, измеряемое напряжение ( $X$ ) преобразуется преобразователем  $П1$  в электрический ток ( $Y_1$ ). Этот ток в измерительном приборе преобразуется в электромагнитный момент ( $Y_2$ ), под действием которого подвижный элемент вместе с указателем (стрелкой) поворачивается на определенный угол ( $Y_3$ ), пропорциональный величине напряжения  $X$ . К приборам прямого действия относятся стрелочные амперметры, вольтметры, ваттметры, омметры.

*Прибор сравнения* осуществляет сравнение измеряемой величины  $A_{изм}$  с заранее известной  $A_0$  (рис. 5.1, б). Величина  $A_0$  изменяется до тех пор, пока разность  $\Delta A = A_{изм} - A_0$  и соответственно угол откло-

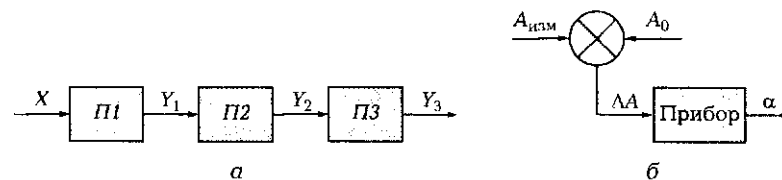


Рис. 5.1. Функциональные схемы приборов прямого действия (а) и сравнения (б):

$П1, П2, П3$  — преобразователи

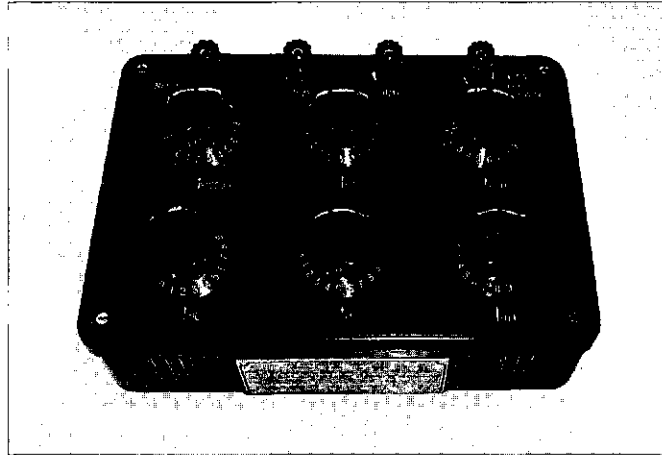


Рис. 5.2. Магазин сопротивлений

нения указателя  $\alpha$  не станут равными нулю. В этом случае  $A_{изм} = A_0$ . По такому принципу работает магазин сопротивлений (рис. 5.2).

В электромеханических измерительных механизмах всех ЭИП вращающий момент  $M_{вр}$  возникает при протекании тока по обмоткам механизма или при включении его под напряжение.

Под действием момента  $M_{вр}$  подвижная часть стремится повернуться до упора. Если же за счет пружин или растяжек создать противодействующий момент  $M_{пр}$ , то подвижная часть остановится, когда наступит равенство  $M_{вр} = M_{пр}$ . Чем больше измеряемая величина (ток), тем больше вращающий момент  $M_{вр}$  и угол отклонения  $\alpha$  подвижной части. При этом  $M_{пр} = k_\alpha \alpha$ , где  $k_\alpha$  — жесткость пружины.

Приборы, в которых момент  $M_{пр}$  создается не механической пружиной или растяжкой, а за счет электрического противодействующего момента, называются *логометрами*. Логометр представляет собой совмещение двух приборов, один из которых создает вращающий момент, а другой — противодействующий. Поэтому обозначение логометра состоит из изображений двух подвижных элементов (например  $\otimes$  — магнитоэлектрический логометр).

### 5.1.2. Основные характеристики электроизмерительных приборов

Основными характеристиками ЭИП являются:

- номинальная величина  $A_n$  — наибольшее значение физической величины, которое может быть измерено прибором;

- постоянная прибора (цена деления)  $C$  — значение измеряемой величины, вызывающее отклонение стрелки прибора на одно деление шкалы. Например, постоянная ваттметра определяется как

$$C = \frac{P_{\text{ном}}}{n} = \frac{U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}}{n},$$

где  $n$  — число делений шкалы;

- погрешность измерения. Различают абсолютную, приведенную и относительную погрешности.

**Абсолютная погрешность** — это разность между измеряемым  $A_n$  и действительным  $A_d$  значениями контролируемой величины:

$$\Delta A = A_n - A_d.$$

**Приведенная погрешность** — это отношение абсолютной погрешности к номинальной величине прибора, выраженное в процентах:

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{\Delta A}{A_n} 100 \%.$$

Приведенная погрешность определяет **класс точности** прибора. Цифра, обозначающая класс точности, соответствует наибольшей показанной погрешности. Так, класс точности прибора 0,5 указывает, что прибор имеет приведенную погрешность  $\pm 0,5 \%$ .

Государственным стандартом установлены девять классов точности: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Класс точности указывается на шкале прибора.

**Относительная погрешность** — это отношение абсолютной погрешности прибора к действительному  $A_d$  (которое с достаточной точностью можно считать равным измеренному  $A_n$ ) значению физической величины, выраженное в процентах:

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_d} 100 \%.$$

Именно относительная погрешность определяет точность измерения. Поскольку  $\Delta A = \gamma_{\text{пр}} A_n = \gamma A_d$ , то

$$\gamma = \gamma_{\text{пр}} \frac{A_n}{A_d},$$

т. е. относительная погрешность зависит от действительного значения измеряемой величины и возрастает при ее уменьшении. Вот почему для повышения точности измерения приборы рекомендуют-

ся подбирать таким образом, чтобы их показания лежали в пределах последней трети шкалы там, где значения наибольшие. При измерениях существенно различающихся величин используют многопредельные приборы, т. е. приборы, допускающие переключение с одного предела измерения на другой.

### 5.1.3. Конструктивные элементы электромеханических измерительных приборов

Все электромеханические приборы несмотря на конструктивные отличия имеют ряд общих узлов и деталей: опоры подвижной части, отсчетные устройства, корректоры, успокоители, балансирующие грузики, корпуса.

*Подвижная часть* (рамка, магнит или стальной сердечник) может быть установлена на растяжках (рис. 5.3, а), подвесе (рис. 5.3, б) или керне (рис. 5.3, в).

*Отсчетное устройство* состоит из шкалы с делениями и указателя — легкой алюминиевой стрелки. В зеркальных гальванометрах роль указателя выполняет световой луч.

*Корректор* служит для установки указателя на нуль перед началом измерения. Он представляет собой винт, выведенный на переднюю панель прибора и связанный с концом спиральной пружины.

*Успокоитель* служит для гашения колебаний подвижной части. Он может быть воздушным, жидкостным или магнитоиндукционным. В воздушном успокоителе, как правило, вместе с подвижной системой в закрытой воздушной камере 1 (рис. 5.4) перемещается легкое алюминиевое крыло 2, которое создает тормозящую силу. В жидкостном успокоителе между подвижной и неподвижной алюминиевыми пластинами, расстояние между которыми не бо-

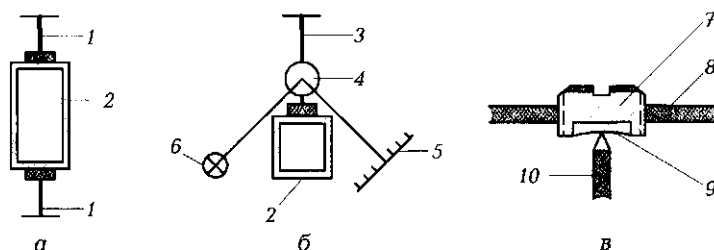


Рис. 5.3. Виды опор подвижной части:

а — растяжки; б — подвес; в — керн; 1 — растяжки; 2 — рамка с током; 3 — подвес; 4 — зеркало; 5 — шкала; 6 — лампа; 7 — керн; 8 — корпус; 9 — подпятник; 10 — ось



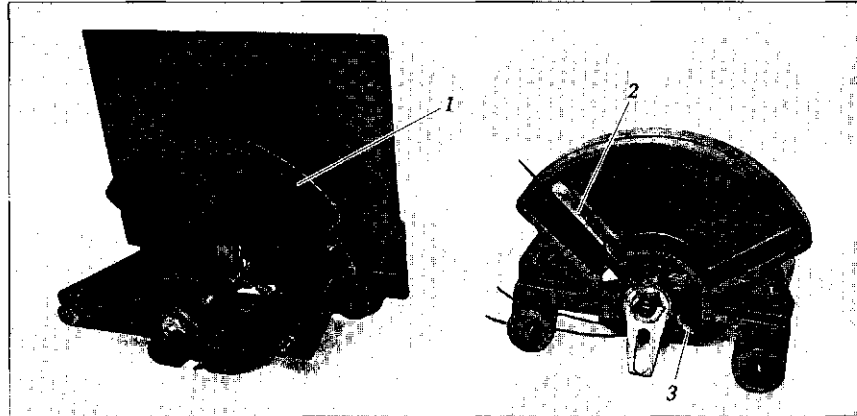


Рис. 5.4. Прибор с воздушным успокоителем:

1 — воздушная камера; 2 — алюминиевое крыло; 3 — балансирующие грузики

лее 0,1 мм, помещается капля вязкой жидкости, создающая сильное успокаивающее действие. Магнитоиндукционное успокоение основано на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита с вихревыми токами, наводимыми в элементах подвижной части при ее движении.

Балансирующие грузики предназначены для балансировки подвижной части, т. е. для совмещения ее центра тяжести с осью вра-

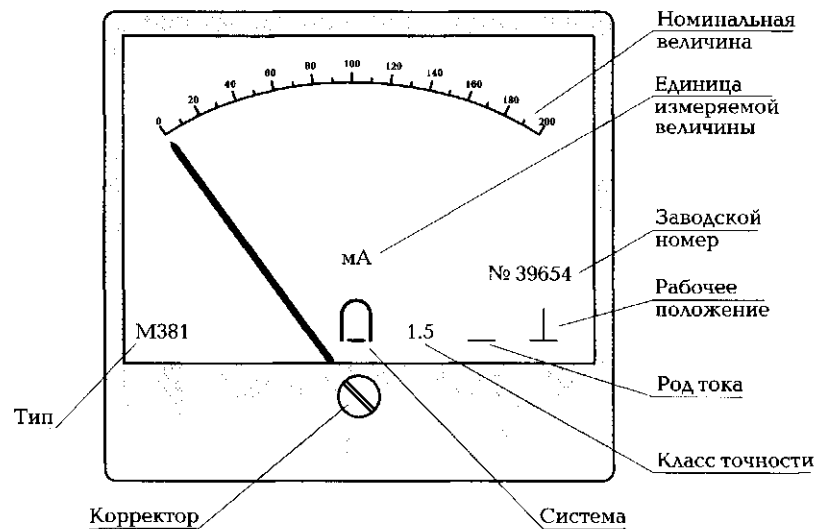


Рис. 5.5. Передняя панель электромеханического прибора

нения. Грузики выполняют в виде навинчивающихся цилиндров 3 (см. рис. 5.4).

Корпус прибора служит для защиты измерительного механизма от механических воздействий. На передней панели прибора наносят ряд обозначений (рис. 5.5).

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. Напряжение на входе электрической цепи, схема которой показана на рис. 5.6, а, составляет  $U = 140$  В. Измеренное вольтметром  $V$  напряжение  $U_{н.и}$  на резисторе  $R_n$  равно 70 В. Сопротивления резисторов  $R_1 = 1$  кОм,  $R_2 = 500$  Ом,  $R_n = 2$  кОм. Вычислите внутреннее сопротивление  $R_V$  вольтметра и его абсолютную погрешность измерения. Какое значение тока показал бы миллиамперметр  $mA$  при отсутствии вольтметра?

*Решение.* Вычислим сначала значение тока, которое показал бы идеальный миллиамперметр  $mA$  при отсутствии в ЭЦ вольтметра  $V$ . В соответствии с законом Ома  $I = U / (R_1 + R_2 + R_n) = 140 \text{ В} / 3,5 \text{ кОм} = 40$  мА. Следовательно, идеальный вольтметр с бесконечно большим сопротивлением должен был бы показать значение напряжения  $U_{н.д} = IR_n = 40 \text{ мА} \cdot 2 \text{ кОм} = 80$  В. Это действительное значение напряжения на нагрузке. Измеренное же значение  $U_{н.и}$  равно 70 В, т. е. вольтметр внес погрешность в результаты измерения. Абсолютная погрешность составляет  $U_{н.д} - U_{н.и} = 80 - 70 = 10$  В. Очевидно, что такая большая погрешность измерения обусловлена недостаточно большим внутренним сопротивлением  $R_V$  вольтметра.

Вычислим значение тока в ЭЦ при включенном вольтметре:  $I_n = (U - U_{н.и}) / (R_1 + R_2) = 70 \text{ В} / 1,5 \text{ кОм} = 46,7$  мА.

Для вычисления  $R_V$  воспользуемся выражением  $U_{н.и} = I_n(1 / (1/R_n + 1/R_V))$ , справедливым при параллельном включении резисторов  $R_n$  и  $R_V$ . Подставив соответствующие значения известных вели-

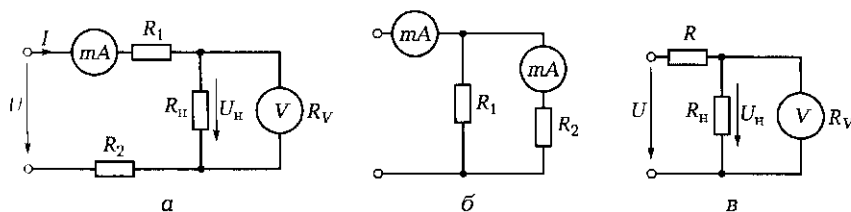


Рис. 5.6. Схемы ЭЦ к задачам 1 (а), 2 (б) и 5 (в) подразд. 5.1

чин, находим значение внутреннего сопротивления вольтметра  $R_V = 5,98 \text{ кОм}$ .

*Ответ.* Абсолютная погрешность измерения составляет 10 В. Это вызвано неправильным выбором измерительного прибора — вольтметра, сопротивление которого равно 5,98 кОм, т.е. лишь в 3 раза выше, чем сопротивления нагрузки. Теоретически сопротивление вольтметра должно быть, по крайней мере, на порядок выше, чем сопротивления нагрузки. Миллиамперметр в идеальном случае должен показать значение тока 40 мА.

2. Миллиамперметр класса точности 2,5 с номинальной величиной 300 мА на входе ЭЦ показывает значение тока 250 мА, а в ветви с резистором  $R_2$  (рис. 5.6, б) — 50 мА. Определите максимальную относительную погрешность измерения полного тока ЭЦ и тока в ветви.

*Решение.* Относительная погрешность определяется выражением  $\gamma = 100\Delta A/A_A$ .

Максимальную абсолютную погрешность  $\Delta A$  можно вычислить в соответствии с выражением  $\gamma_{пр} = 100\Delta A/A_{н}$ , где  $\gamma_{пр}$  — приведенная погрешность, определяемая классом точности. Отсюда  $\Delta A = \gamma_{пр} A_{н}/100 = 2,5 \cdot 300/100 = 7,5 \text{ мА}$ . Следовательно, относительная погрешность измерения полного тока  $\gamma_1 = 100\Delta A/A_A = 100 \cdot 7,5/250 = 3\%$ , а относительная погрешность измерения тока в ветви с резистором  $R_2$  составляет  $\gamma_2 = 100\Delta A/A_A = 100 \cdot 7,5/50 = 15\%$ .

*Ответ.* Относительные погрешности измерения тока, потребляемого всей ЭЦ, и тока в ветви с резистором  $R_2$  равны соответственно 3 и 15%. Низкая точность измерения во втором случае объясняется тем, что показание находится в начальной части шкалы миллиамперметра. Для повышения точности измерения тока в ветви необходимо использовать миллиамперметр с номинальной величиной 75 мА.

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

3. Амперметр, включенный в ЭЦ, показывает значение тока 0,52 А, тогда как действительное значение тока 0,5 А. Определите абсолютную и относительную погрешности измерения.

4. Чему равна абсолютная погрешность измерения тока, если используется миллиамперметр класса точности 2,5 с номинальной величиной 100 мА?

5. В ЭЦ, схема которой показана на рис. 5.6, в,  $U = 100 \text{ В}$ ,  $R = 2000 \text{ Ом}$ ,  $R_{н} = 3000 \text{ Ом}$ , сопротивление вольтметра  $R_V = 6000 \text{ Ом}$ . Определите абсолютную погрешность измерения напряжения.

6. Вольтметр магнитоэлектрической системы с номинальной величиной 300 В имеет шкалу с 60 делениями. Определите постоянную (цену деления) прибора.

7. С помощью многопредельного миллиамперметра класса точности 4 измерен ток, действительное значение которого равно 100 мА. Определите относительную погрешность измерения на двух пределах:  $A_{ном1} = 500$  мА и  $A_{ном2} = 2000$  мА.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Что понимают под измерением:
  - а) измерение тока, напряжения, сопротивления, мощности, энергии, емкости и т. д.;
  - б) определение физической величины опытным путем с помощью технических средств;
  - в) оценку электрических величин субъективным методом;
  - г) все перечисленное?
2. Какие параметры непосредственно измеряют электромеханическими измерительными приборами:
  - а) напряжение, силу, массу, скорость;
  - б) силу тока, напряжение, сопротивление, электрическую мощность, электрическую энергию, емкость, индуктивность;
  - в) температуру, сопротивление, уровень, давление, освещенность, напряжение;
  - г) нет ни одного верного ответа?
3. Укажите основные конструктивные элементы электромеханических измерительных приборов:
  - а) подшипники, стрелка, стекло, крепежные винты, устройство установки прибора в ноль;
  - б) постоянный магнит, электромагнит, электромагнитное реле, провода;
  - в) подвижная часть, отсчетное устройство, корректор, успокоитель, балансирующие грузики, корпус;
  - г) все перечисленные элементы.
4. Какие из перечисленных показателей указывают на передней панели прибора:
  - а) номинальная величина;
  - б) класс точности;
  - в) единица измеряемой величины;
  - г) все перечисленные показатели?

5. Какие из перечисленных показателей относятся к основным показателям электроизмерительных приборов:
- а) номинальная величина;
  - б) цена деления;
  - в) класс точности;
  - г) все перечисленные показатели?
6. Какие из перечисленных погрешностей относятся к основным видам погрешностей:
- а) абсолютная;
  - б) приведенная;
  - в) относительная;
  - г) все перечисленные?

## 5.2. КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

### ТЕОРИЯ

#### 5.2.1. Магнитоэлектрические приборы

Различают четыре основные системы электромеханических измерительных приборов: магнитоэлектрическую; электромагнитную; электродинамическую; индукционную. Приборы каждой из этих систем отличаются конструкцией и принципом преобразования электрической величины в угловое перемещение подвижной части.

☛ В магнитоэлектрических приборах вращающий момент возникает в результате взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и проводника (рамки) с током.

Измерительный механизм магнитоэлектрического прибора с подвижной катушкой (рис. 5.7, а) состоит из постоянного магнита 3, рамки 2, либо выполняемой на алюминиевом каркасе 1, либо бескаркасной, выходных зажимов 4, спиральных пружин 5, токоведущих шин 6, корректора 7, балансирующих грузиков 8, опор 9, оси 10, стрелки 11, шкалы 12. Фрагмент измерительного механизма магнитоэлектрического вольтметра приведен на рис. 5.7, б.

Ток, пропорциональный измеряемой физической величине, подводится к зажимам 4 и через спиральные пружины 5, токоведущие шины 6 на оси 10 подходит к рамке 2.

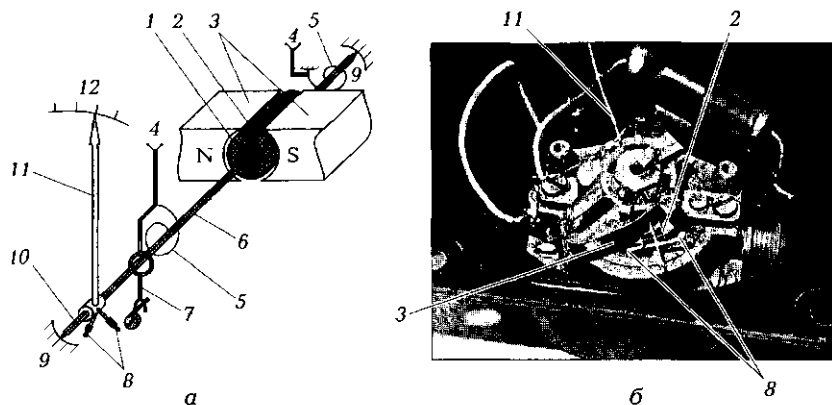


Рис. 5.7. Электроизмерительный прибор магнитоэлектрической системы: а — конструктивная схема; б — фрагмент измерительного механизма; 1 — алюминиевый каркас; 2 — рамка с током; 3 — постоянный магнит; 4 — зажим; 5 — пружины; 6 — токоведущая шина; 7 — корректор; 8 — балансирующие грузики; 9 — опоры; 10 — ось; 11 — стрелка; 12 — шкала

В соответствии с формулой Ампера на рамку с током  $I$ , находящуюся в поле постоянного магнита с индукцией  $B$ , действует вращающий момент:

$$M_{\text{вр}} = c_m BI,$$

где  $c_m$  — конструктивный коэффициент.

Противодействующий момент  $M_{\text{пр}}$  создается механической пружиной с коэффициентом жесткости  $k_\alpha$ . Уравнение шкалы получаем на основе равенства моментов  $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$ . В этом случае  $c_m BI = k_\alpha \alpha$ , откуда  $\alpha = (c_m B / k_\alpha) I$ . Введя обозначение  $k_1 = c_m B / k_\alpha$ , будем иметь

$$\alpha = k_1 I.$$

☛ Уравнение шкалы позволяет сделать два вывода.

1. Магнитоэлектрический прибор чувствителен к полярности тока, т.е. при изменении направления тока изменяется направление отклонения подвижной системы. Следовательно, при подключении прибора к сети переменного тока из-за инерционности подвижной части отсчетное устройство (стрелка) будет оставаться в нулевом положении, т.е. прибор не предназначен для измерения переменного тока.

2. Шкала прибора равномерная.

**Достоинства** магнитоэлектрического прибора: высокая точность (класс точности до 0,1), малое собственное потребление энергии, слабое воздействие внешних полей (мощное собственное поле от постоянного магнита).

*Недостатки:* сложность конструкции и невысокая перегрузочная способность, т. е. способность выдерживать токи и напряжения больше номинальных (перегорают токоподводящие пружины и токоведущие шины).

☛ Магнитоэлектрические приборы используют главным образом в цепях постоянного тока в качестве амперметров, вольтметров, омметров.

В сочетании с полупроводниковым выпрямителем эти приборы могут быть использованы для измерения переменного тока (рис. 5.8, а). В этом случае отклонение стрелки прибора пропорционально среднему значению пульсирующего тока. Шкала может быть отградуирована в действующих значениях измеряемой величины.

Успокоение стрелки в приборах магнитоэлектрической системы — магнитоиндукционное. При перемещении подвижной системы в магнитном поле постоянного магнита в алюминиевом каркасе индуцируются вихревые токи, взаимодействие которых с магнитным полем приводит в соответствии с правилом Ленца к появлению противодействующей силы, тормозящей движение системы.

Для измерения малых токов (20 ... 30 мА) измерительный механизм магнитоэлектрического прибора включают в цепь непосредственно. Если токи больше 30 мА, то применяют измерительную цепь, которая преобразует большой ток  $I$  в малый  $I_1$  (рис. 5.8, б). Это достигается за счет включения параллельно измерительному прибору специального резистора — шунта. При этом большая часть тока проходит через шунт, сопротивление которого значительно меньше сопротивления измерительного механизма прибора.

☛ Таким образом, для расширения пределов измерения амперметра параллельно его измерительному механизму включают резистор с малым сопротивлением — шунт.

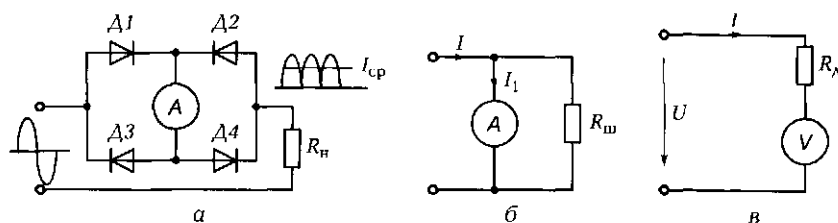


Рис. 5.8. Схемы измерительной цепи ЗИП магнитоэлектрической системы при измерении:

а — переменного тока; б — больших токов; в — больших напряжений

В вольтметрах последовательно с измерительным механизмом включают добавочный резистор  $R_A$  (рис. 5.8, в), преобразующий измеряемую величину  $U$  в промежуточную  $I$ , на которую и реагирует прибор.

☛ Таким образом, для расширения пределов измерения вольтметра последовательно с его измерительным механизмом включают резистор со значительным сопротивлением.

### 5.2.2. Электромагнитные приборы

Конструктивная схема измерительного механизма электромагнитного прибора показана на рис. 5.9, а. На рис. 5.9, б показан фрагмент измерительного механизма электромагнитного вольтметра.

☛ При протекании тока  $I$  по катушке 3 создается намагничивающая сила  $Iw$ , а следовательно, электромагнитный момент  $M_{эм}$ , под действием которого сердечник 4 втягивается внутрь катушки:

$$M_{эм} = c_m(Iw)^2,$$

где  $c_m$  — конструктивный коэффициент.

Электромагнитный момент уравновешивается противодействующим моментом, создаваемым пружиной 6:  $M_{эм} = M_{пр} = k_\alpha \alpha$ . Отсю-

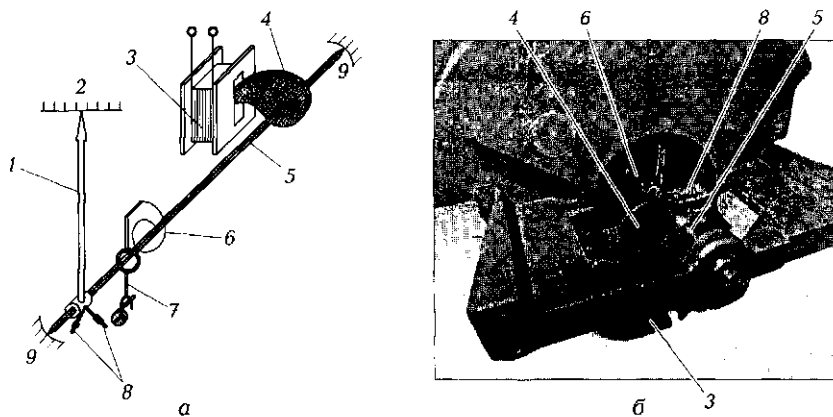


Рис. 5.9. Электроизмерительный прибор электромагнитной системы:  
 а — конструктивная схема; б — фрагмент измерительного механизма; 1 — стрелка; 2 — шкала; 3 — катушка; 4 — сердечник; 5 — ось; 6 — пружина; 7 — корректор; 8 — балансирующие грузики; 9 — опоры



да  $c_m(Iw)^2 = k_a \alpha$  и уравнение шкалы принимает вид  $\alpha = (c_m w^2 / k_a) I^2$ .  
 Введя обозначение  $k_2 = c_m w^2 / k_a$ , получим

$$\alpha = k_2 I^2.$$

Из уравнения шкалы следуют два вывода.

1. Направление отклонения стрелки не зависит от направления тока, поскольку угол отклонения пропорционален квадрату тока. Поэтому исполнительный механизм пригоден для измерения как постоянного тока, так и действующего значения переменного тока.
2. Шкала прибора неравномерная. Для повышения равномерности используют сердечник специальной формы.

*Достоинства* прибора: простота, высокая перегрузочная способность, так как отсутствуют токоподводящие пружины.

*Недостатки*: невысокая точность, значительное собственное потребление энергии, зависимость от внешних магнитных полей (собственное поле слабое).

Приборы электромагнитной системы применяются в основном в цепях переменного тока в качестве амперметров и вольтметров.

### 5.2.3. Электродинамические приборы

Приборы электродинамической системы выполняют по схеме, показанной на рис. 5.10, а.

Электродинамический прибор имеет неподвижную катушку 1 и подвижную катушку 2, располагаемую в магнитном поле неподвижной катушки. При протекании тока  $I_2$  по обмотке подвижной катушки она будет поворачиваться внутри неподвижной до тех пор, пока развиваемый электромагнитный момент не станет равен

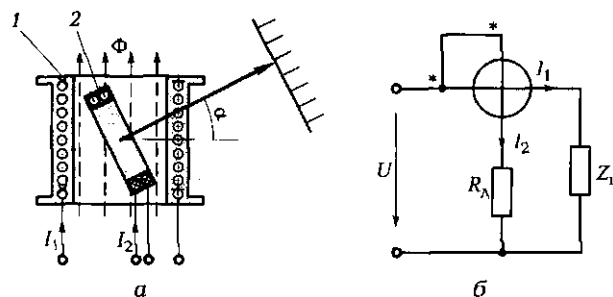


Рис. 5.10. Электроизмерительный прибор электродинамической системы: а — схема, поясняющая принцип действия; б — схема включения катушек; 1 — неподвижная катушка; 2 — подвижная катушка

противодействующему моменту, создаваемому пружиной. По сути, это прибор магнитоэлектрической системы, в котором постоянный магнит заменен электромагнитом с катушкой  $I$ . Схема включения катушек прибора показана на рис. 5.10, б. Фрагмент измерительного механизма прибора показан на рис. 5.11.

Поскольку магнитное поле неподвижной катушки создается током  $I_1$ , а в обмотке подвижной катушки течет ток  $I_2$ , то

$$M_{эм} = c_m I_1 I_2.$$

Отсюда уравнение шкалы принимает вид  $\alpha = (c_m/k_a) I_1 I_2$ . Если к неподвижной катушке подвести напряжение, подаваемое на нагрузку, а по подвижной катушке пропустить ток нагрузки, то будем иметь

$$\alpha = k_3 UI = k_3 P,$$

где  $k_3$  — конструктивный коэффициент.

Таким образом, отклонение стрелки прибора будет пропорционально мощности, потребляемой нагрузкой.

☛ Из уравнения шкалы следуют два вывода.

1. При одновременном изменении направлений токов  $I_1$  и  $I_2$  направление отклонения стрелки не изменится. Прибор пригоден для измерения постоянного и переменного тока.

2. Шкала прибора в общем случае неравномерна, однако при неизменной величине подводимого напряжения может быть линейной.

*Достоинство* прибора — высокая точность (отсутствуют части, содержащие железо).

*Недостатки*: значительное собственное потребление, большая чувствительность к внешним магнитным полям, высокая стоимость, из-за сложности изготовления.

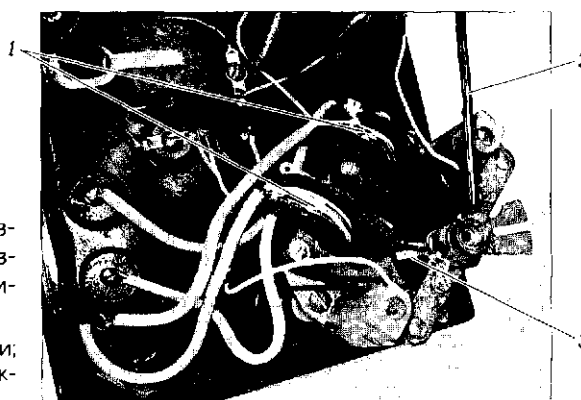


Рис. 5.11. Фрагмент измерительного механизма прибора электродинамической системы:

1 — неподвижные катушки;  
2 — стрелка; 3 — подвижная катушка

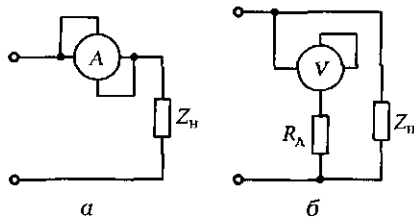


Рис. 5.12. Схемы измерительной цепи ЭИП электродинамической системы при измерении тока (а) и напряжения (б)

Приборы используются в основном в цепях переменного тока для измерения мощности. В то же время промышленность выпускает электродинамические амперметры и вольтметры класса точности до 0,1, применяемые при точных измерениях. Схемы включения таких приборов в ЭЦ показаны на рис. 5.12.

В амперметре обе катушки включают параллельно друг другу и затем последовательно с нагрузкой  $Z_{\text{н}}$ , а в вольтметре — последовательно друг с другом и добавочным резистором  $R_{\text{л}}$ , а затем параллельно нагрузке  $Z_{\text{н}}$ .

В отличие от приборов ранее рассмотренных систем прибор электродинамической системы (ваттметр) имеет на корпусе четыре зажима:  $I$ ,  $I^*$  и  $U$ ,  $U^*$ . Амперметр и вольтметр имеют на корпусе лишь два зажима, поскольку соединение катушек между собой выполнено внутри прибора.

#### 5.2.4. Индукционные приборы

➤ Принцип работы индукционного прибора (рис. 5.13) основан на взаимодействии переменных магнитных потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  с вихревыми токами  $I_{\text{в}}$ , индуцируемыми этими потоками в подвижном алюминиевом диске 2. Следовательно, индукционные приборы могут применяться только в цепях переменного тока. В основном их используют в качестве счетчиков электрической энергии.

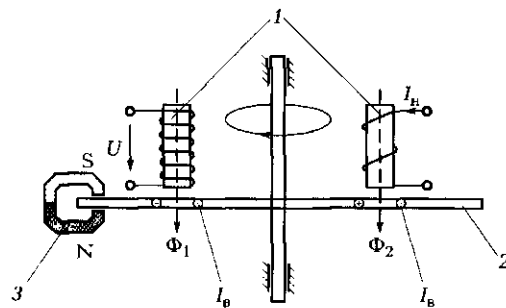


Рис. 5.13. Условная конструктивная схема прибора индукционной системы:

1 — электромагниты; 2 — алюминиевый диск; 3 — постоянный магнит

Один из электромагнитов  $I$  подключается к сети параллельно, а второй — последовательно с нагрузкой, т. е.  $\Phi_1 = k_1 U$ , а  $\Phi_2 = k_2 I_n$ . В этом случае вращающий момент  $M_{пр} = k U I_n \cos \varphi = k P$ , т. е. пропорционален активной мощности  $P$ , потребляемой нагрузкой.

Противодействующий момент  $M_{пр.}$ , создаваемый постоянным магнитом  $3$ , пропорционален частоте вращения диска  $n$ :  $M_{пр.} = k_3 n$ .

При установившейся частоте вращения подвижного диска  $M_{вр} = M_{пр.}$ , следовательно, потребляемая мощность  $P$  пропорциональна частоте вращения диска ( $P = k_3 n$ ), а расход энергии  $W$  за время  $t$  ( $W = Pt$ ) пропорционален числу оборотов диска  $N$  за это же время ( $N = nt$ ). Таким образом, число оборотов диска  $N$  определяет расход энергии  $W$ :  $N = k_4 W$ . Шкала счетчика электрической энергии проградуирована в киловатт-часах (кВт·ч).

### 5.2.5. Самопишущие и регистрирующие приборы

Все рассмотренные ранее приборы относились к показывающим. Кроме них на практике находят применение самопишущие (для записи показаний в течение длительного промежутка времени) и регистрирующие (для фотографирования быстропротекающих процессов) приборы.

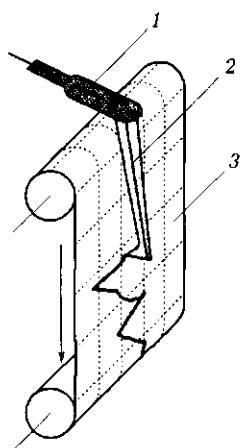


Рис. 5.14. Самопишущий прибор:  
1 — ось стрелки; 2 — перо с чернилами; 3 — бумага

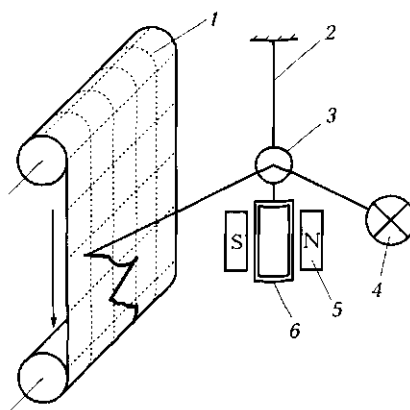


Рис. 5.15. Регистрирующий прибор:  
1 — фотобумага; 2 — подвес; 3 — зеркальце; 4 — лампочка; 5 — постоянный магнит; 6 — рамка с током

Самопишущие приборы создаются на основе тех же систем, что и показывающие, но в отличие от последних указатель самопишущего прибора (ось стрелки 1 — рис. 5.14) связан с пером 2, которое с помощью чернил осуществляет запись показаний на движущейся с постоянной скоростью бумаге 3.

В качестве регистрирующих приборов (рис. 5.15) используются электромеханические осциллографы (светолучевые). Основным элементом осциллографа является гальванометр — миниатюрный зеркальный прибор магнитоэлектрической системы.

Обычно светолучевой осциллограф имеет несколько гальванометров, что позволяет одновременно регистрировать несколько контролируемых параметров.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. В сеть напряжением 220 В включен нагреватель мощностью  $P = 3$  кВт. В процессе испытаний необходимо контролировать ток, протекающий в ЭЦ с нагревателем. В лаборатории имеются четыре амперметра с номинальной величиной тока  $I_{ном} = 5$  А, но с различными внутренними сопротивлениями:  $r_1 = 0,15$  Ом,  $r_2 = 0,18$  Ом,  $r_3 = 0,16$  Ом,  $r_4 = 0,2$  Ом.

Как и сколько приборов надо включить в цепь и какое значение тока каждый из них покажет?

*Решение.* Вычисляем ток, потребляемый нагревателем:  $I = P / (U \cos \varphi) = 3000 / (220 \cdot 1) = 13,64$  А.

Для измерения такого тока требуется по крайней мере три включенных параллельно амперметра. Учитывая значительный разброс их внутренних сопротивлений, включим в цепь все четыре прибора (рис. 5.16).

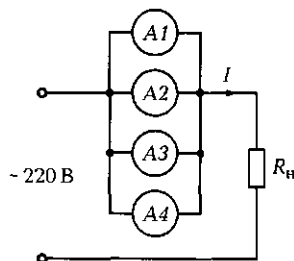


Рис. 5.16. Схема включения амперметров к задаче 1 подразд. 5.2

Находим эквивалентное сопротивление всех включенных параллельно амперметров:  $r_э = 1 / (1/r_1 + 1/r_2 + 1/r_3 + 1/r_4) = 1 / (6,67 + 5,56 + 6,25 + 5) = 0,0426$  Ом.

Вычисляем падение напряжения на амперметрах при протекании тока через нагреватель:  $U_A = I r_э = 13,64 \cdot 0,0426 = 0,58$  В.

Под действием этого напряжения в каждом амперметре протекает ток, обратно пропорциональный его внутреннему сопротивлению. Поэтому амперметр

$A1$  покажет значение тока  $I_1 = U_A/r_1 = 0,58/0,15 = 3,87$  А, амперметр  $A2 — 3,22$  А,  $A3 — 3,63$  А,  $A4 — 2,9$  А. В сумме все четыре амперметра покажут 13,62 А, что практически совпадает с рассчитанным значением тока, потребляемого нагревателем.

*Ответ.* Для измерения тока через нагреватель целесообразно включить параллельно четыре амперметра с номинальной величиной 5 А. Суммирование их показаний даст ток, близкий к расчетному, при этом каждый амперметр покажет свое значение тока, определяемое внутренним сопротивлением прибора.

2. Можно ли прибор магнитоэлектрической системы использовать для измерения в цепях переменного тока?

*Ответ.* Напрямую — нет. Если же в измерительную цепь ввести выпрямитель, то можно. В этом случае измерительный механизм будет реагировать на среднее значение измеряемой величины, которое для двухполупериодного выпрямителя на 11 % меньше действующего значения. Таким образом, если прибор показывает 198 В, то действующее значение напряжения равно 220 В.

В большинстве случаев шкала прибора магнитоэлектрической системы с выпрямителем градуируется в действующих значениях тока и напряжения.

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

3. Миллиамперметр и вольтметр, включенные в цепь, схема которой показана на рис. 5.17, а, показывают соответственно 8 мА и 16 В. Определите сопротивление нагрузки и потребляемую ею мощность, считая измерительные приборы идеальными.

4. Ваттметр, включенный в одну из фаз трехфазного двигателя, показывает мощность 1,2 кВт. Коэффициент мощности двигателя по паспортным данным равен 0,9. Чему равна полная мощность, потребляемая двигателем?

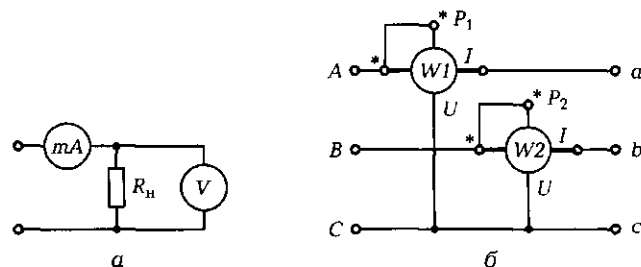


Рис. 5.17. Схемы ЭЦ к задачам 3 (а) и 5 (б) подразд. 5.2





Электродинамическая		$\alpha = k_2 I^2$
Магнитоэлектрическая		$N = k_4 W$
Электромагнитная		$\alpha = k_1 I$
Индукционная		$\alpha = k_3 P$

Рис. 5.18. Соответствие между названием системы, ее условным графическим обозначением и уравнением шкалы электромеханических измерительных приборов [к задаче 7 подразд. 5.2]

5. Оба ваттметра, включенных в ЭЦ (рис. 5.17, б), показывают мощность 3,6 кВт. Определите мощность, потребляемую всей трехфазной ЭЦ и каждой фазой.

6. Амперметр в одной из фаз трехфазного двигателя, включенного треугольником, показывает 2,8 А. Чему равен линейный ток, потребляемый двигателем? Как его измерить, если в лаборатории имеются лишь амперметры с номинальной величиной 3 А?

7. На рис. 5.18 покажите линиями соответствие между названием системы, ее условным графическим обозначением и уравнением шкалы электромеханических измерительных приборов.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Что лежит в основе работы прибора магнитоэлектрической системы:
  - а) взаимодействие магнитного поля катушки и ферромагнитного сердечника;
  - б) взаимодействие постоянного магнитного поля и рамки с током;
  - в) взаимодействие магнитных полей подвижной и неподвижной катушек;
  - г) взаимодействие переменных магнитных полей с наведенными ими вихревыми токами?
2. Что лежит в основе работы прибора электродинамической системы:
  - а) взаимодействие магнитного поля катушки и ферромагнитного сердечника;

- б) взаимодействие постоянного магнитного поля и рамки с током;
  - в) взаимодействие магнитных полей подвижной и неподвижной катушек;
  - г) взаимодействие переменных магнитных полей с наведенными ими вихревыми токами?
3. Что лежит в основе работы прибора электромагнитной системы:
- а) взаимодействие магнитного поля катушки и ферромагнитного сердечника;
  - б) взаимодействие постоянного магнитного поля и рамки с током;
  - в) взаимодействие магнитных полей подвижной и неподвижной катушек;
  - г) взаимодействие переменных магнитных полей с наведенными ими вихревыми токами?
4. Что лежит в основе работы прибора индукционной системы:
- а) взаимодействие магнитного поля катушки и ферромагнитного сердечника;
  - б) взаимодействие постоянного магнитного поля и рамки с током;
  - в) взаимодействие магнитных полей подвижной и неподвижной катушек;
  - г) взаимодействие переменных магнитных полей с наведенными ими вихревыми токами?
5. Можно ли измерить переменный ток прибором электромагнитной системы:
- а) можно;
  - б) можно только при малых значениях тока;
  - в) можно, но в определенном диапазоне;
  - г) нельзя?
6. Можно ли измерить постоянный ток прибором электромагнитной системы:
- а) можно;
  - б) нельзя;
  - в) можно, но в определенном диапазоне;
  - г) можно только при малых значениях тока?
7. Можно ли измерить переменный ток прибором магнитоэлектрической системы:
- а) можно;
  - б) можно только при малых значениях;
  - в) можно, но в определенном диапазоне;
  - г) нельзя?



8. Какую мощность измеряет прибор электродинамической системы:
  - а) полную;
  - б) активную;
  - в) реактивную;
  - г) индуктивную?
9. Прибор какой системы имеет равномерную шкалу:
  - а) магнитоэлектрической;
  - б) электромагнитной;
  - в) индукционной;
  - г) прибора с такой шкалой нет?
10. Какие приборы используются для записи показаний в течение длительного времени:
  - а) регистрирующие;
  - б) интегрирующие;
  - в) показывающие;
  - г) самопишущие?
11. Какие приборы используются для фотографирования быстропротекающих процессов:
  - а) самопишущие;
  - б) регистрирующие;
  - в) показывающие;
  - г) интегрирующие?

## **5.3. ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

---

### **ТЕОРИЯ**

#### **5.3.1. Особенности электронных измерительных приборов**

Помимо электромеханических измерительных приборов широкое применение в технике нашли электронные приборы. Это обусловлено следующими их преимуществами:

- высокая чувствительность, т. е. способность измерять сигналы малой величины;
- малое потребление энергии из исследуемой цепи, т. е. высокое входное сопротивление;

- широкий диапазон измеряемых частот исследуемого сигнала.

Все эти достоинства стали возможными благодаря введению в состав измерительного прибора ряда электронных устройств: усилителей, генераторов, импульсных устройств, выпрямителей, стабилизаторов и т. д. Применение данных устройств, в том числе усилителей с высоким коэффициентом усиления и большим входным сопротивлением, позволяет значительно повысить чувствительность приборов и снизить потребление энергии из цепи, а следовательно, исключить влияние приборов на режим работы исследуемой цепи. Диапазон частот, в котором чувствительность остается неизменной, может быть расширен до 20 МГц, тогда как у электромеханических приборов этот диапазон составляет 45... 1 500 Гц.

Конечно, использование электронных устройств усложняет схему прибора, увеличивает его габаритные размеры и массу, снижает надежность. Однако электронные приборы позволяют решать задачи, которые не могут решить другие приборы.

Широкое применение в технике нашли электронные приборы общего назначения, такие как электронные осциллографы, электронные вольтметры, электронные измерительные генераторы.

### 5.3.2. Электронно-лучевой осциллограф

Электронно-лучевой осциллограф предназначен для визуальных наблюдений и записи изменяющихся во времени электрических величин — напряжения, частоты, тока.

Основной частью прибора является электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) с электрическим отклонением луча (рис. 5.19, а). Она состоит

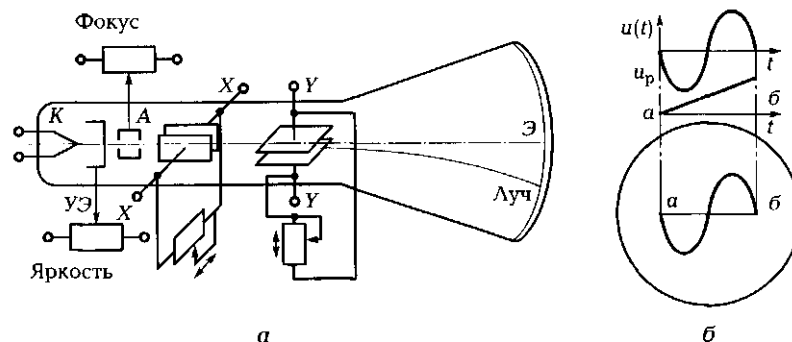


Рис. 5.19. Электронно-лучевая трубка осциллографа: а — конструктивная схема; б — схема формирования изображения на экране осциллографа

из катода  $K$ , управляющего (яркостью) электрода  $УЭ$ , группы анодов  $A$ , фокусирующих электронный луч, двух пар пластин ( $X—X$ ,  $Y—Y$ ), отклоняющих электронный луч в соответствии с подаваемыми на них сигналами по горизонтали и вертикали, светящегося экрана  $Э$ .

Пластины  $Y—Y$  предназначены для отклонения луча в вертикальной плоскости,  $X—X$  — в горизонтальной. Сигналы, подаваемые на пластины, проходят через соответствующие усилители (вертикальный и горизонтальный каналы). При отсутствии сигнала на входе  $Y—Y$  и отключенном канале  $X—X$  электронный луч проецируется в центре экрана. Для смещения луча в вертикальном или горизонтальном направлении на переднюю панель прибора выведены соответствующие ручки ( $\updownarrow \leftrightarrow$ ).

☛ Для наблюдения за периодическим процессом исследуемый сигнал  $u(t)$  подводится к вертикальным пластинам  $Y—Y$ . К горизонтальным пластинам  $X—X$  подводится пилообразное напряжение  $u_p$ , период которого равен периоду исследуемого сигнала или в целое число раз больше него.

Если  $u(t) = 0$ , то на экране видна горизонтальная линия. При  $u(t) \neq 0$  на экране появляется вертикальный сигнал, который изменяется пока существует напряжение развертки  $u_p$  (от  $a$  до  $b$ ) (рис. 5.19, б). В точке  $b$  напряжение  $u_p$  мгновенно падает до нуля, луч моментально перемещается из точки  $b$  в точку  $a$  и процесс повторяется вновь. В результате на экране осциллографа появляется изображение исследуемого сигнала. Экран обладает световой инерцией, что делает изображение процесса непрерывным. Горизонтальная развертка формируется генератором пилообразных напряжений, имеющим широкий диапазон частот. Это позволяет исследовать сигналы в диапазоне от десятков герц до десятков мегагерц.

☛ Кроме наблюдения за периодическим процессом с помощью электронного осциллографа можно выполнять измерения амплитуды и частоты исследуемого сигнала. Для этого используются дополнительные устройства: источник калиброванного напряжения, стабильные генераторы меток, проградуированных в единицах времени, и др.

При наличии на экране осциллографа неподвижного изображения синусоидального сигнала (рис. 5.20, а) с помощью имеющейся на экране сетки можно измерить амплитуду исследуемого сигнала  $A_m$  (2,2 деления) и его период  $T$  (8 делений). Пусть переключатель «Усиление» находится в положении 10 мВ в делении, а переключача-

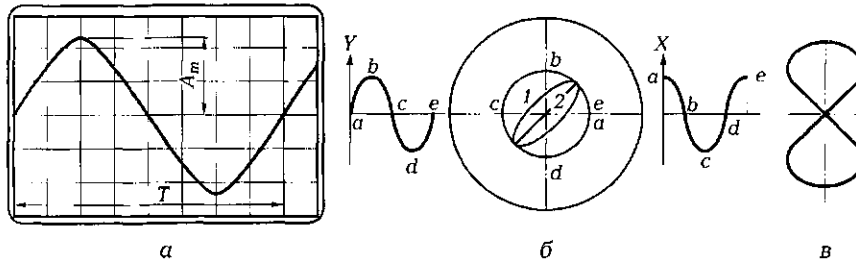


Рис. 5.20. Измерение амплитуды и частоты сигнала с помощью калиброванных меток (а) и частоты с помощью фигур Лиссажу (б, в)

тель «Длительность развертки» — 2 мс в делении. Тогда амплитуда сигнала  $A_m = 2,2 \cdot 10 = 22$  мВ, а частота сигнала  $f = 1/T = 1/(8 \cdot 2 \cdot 10^{-3}) = 62,5$  Гц.

Частота исследуемого сигнала может быть также измерена с помощью фигур Лиссажу (рис. 5.20, б). Если на вертикальные и горизонтальные входы осциллографа подать синусоидальные сигналы одной и той же частоты, но сдвинутые по фазе на  $90^\circ$ , то на экране появится окружность.

Если угол сдвига фаз отличается от  $90^\circ$ , то окружность трансформируется в эллипс (1), а если угол сдвига фаз равен нулю — в прямую линию (2).

Если вход X подать сигнал двойной частоты, то фигура будет иметь вид, показанный на рис. 5.20, в.

На рис. 5.21 показана структурная схема осциллографа, а на рис. 5.22 — его внешний вид. Исследуемый сигнал подается на вход Y (см. рис. 5.21) и через входное устройство и усилитель Y поступает на вертикально отклоняющие пластины электронно-

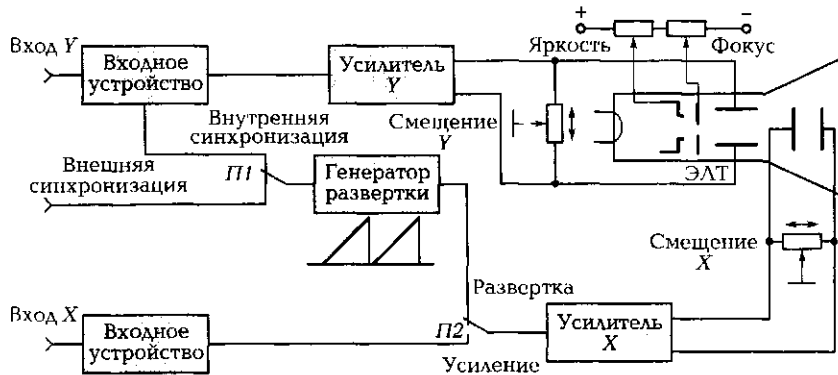


Рис. 5.21. Структурная схема осциллографа

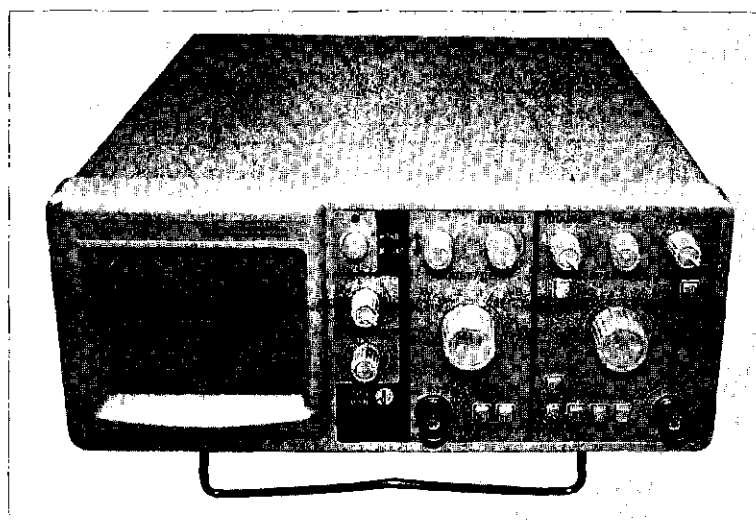


Рис. 5.22. Внешний вид осциллографа ОСУ-10А

лучевой трубки. Сигнал на горизонтально отклоняющие пластины подается от генератора развертки через переключатель *П2* и усилитель *X*. На экране электронно-лучевой трубки отображается временная диаграмма исследуемого сигнала. Для обеспечения устойчивого изображения генератор развертки синхронизируется сигналом либо от внешнего источника (внешняя синхронизация), либо от входного сигнала (внутренняя синхронизация). Для исследования фигур Лиссажу сигнал от эталонного генератора подается на вход *X* и далее через входное устройство, переключатель *П2*, находящийся в положении «Усиление», и усилитель *X* поступает на горизонтально отклоняющие пластины.

### 5.3.3. Электронный вольтметр

☞ Для измерения напряжения высокой частоты, а также постоянного и переменного напряжений в цепях со значительным выходным сопротивлением применяются электронные вольтметры. По способу представления информации их подразделяют на стрелочные, в которых отсчет ведется по шкале со стрелкой, и цифровые, в которых показание выводится на цифровое табло.

По роду тока электронные вольтметры подразделяют на приборы постоянного тока, переменного тока и комбинированные. По-

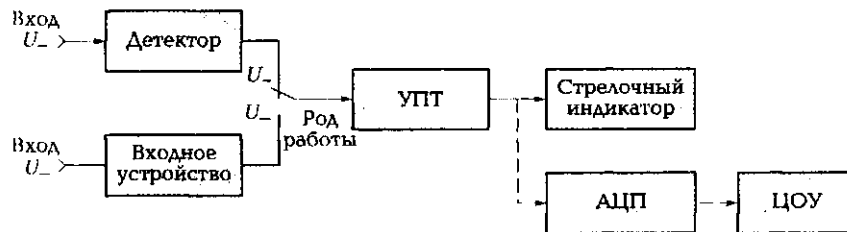


Рис. 5.23. Структурная схема универсального вольтметра

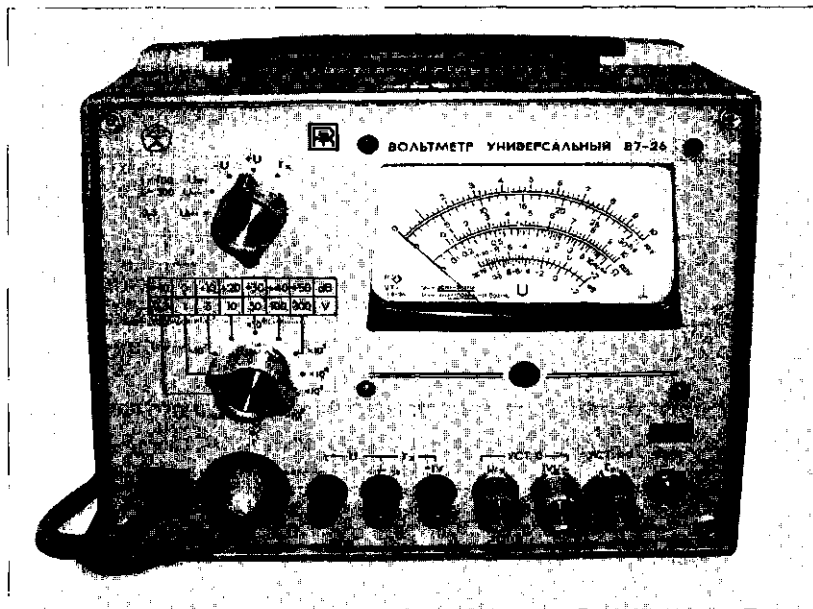


Рис. 5.24. Внешний вид вольтметра В7-26

следние предназначены для измерения как постоянного, так и переменного тока, а также сопротивления.

Основными узлами вольтметра являются (рис. 5.23) входное устройство (делитель напряжения), усилитель (постоянного тока — УПТ или широкополосный), детектор (выпрямитель с фильтром), стрелочный индикатор (магнитоэлектрический прибор) или цифровое отсчетное устройство (ЦОУ) с аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Комбинированные вольтметры имеют также переключатель рода работы, устанавливаемый в соответствующее положение при измерении постоянного или переменного напряжения.

Внешний вид универсального вольтметра показан на рис. 5.24.

### 5.3.4. Электронный измерительный генератор

Измерительные генераторы широко используются для исследования ряда электронных устройств (например, усилителей). На рис. 5.25 показана структурная схема генератора синусоидальных колебаний низкой частоты, а на рис. 5.26 — внешний вид прибора.

*Задающий генератор* представляет собой *RC*-автогенератор с регулируемой частотой (дискретно или плавно). Ручки регулирования частоты выведены на переднюю панель прибора. Контроль частоты осуществляется либо по шкале, либо по цифровому табло.

*Усилитель* усиливает маломощные сигналы задающего генератора по напряжению и мощности.

*Выходное устройство* обеспечивает согласование выходного сопротивления генератора с сопротивлением нагрузки. Оно включает

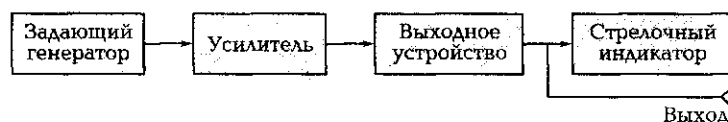


Рис. 5.25. Структурная схема электронного измерительного генератора

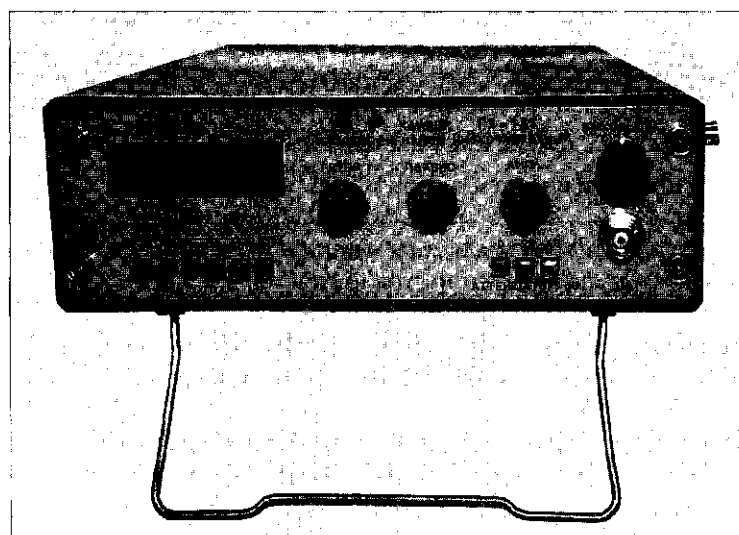


Рис. 5.26. Внешний вид генератора ГЗ-131

и себя делители напряжения для регулирования уровня выходного сигнала, контролируемого с помощью стрелочного индикатора.

### 5.3.5. Мультиметры

В последнее время все более широкое применение получают многофункциональные приборы — мультиметры (рис. 5.27). Они создаются на базе микропроцессорной техники и имеют цифровой выход на дисплей, а также интерфейс связи с компьютером. Мультиметры снабжены индикатором разряда батареи и перегрузки, устройством автоотключения после 10 мин простоя. Погрешность измерения этих приборов лежит в диапазоне от 0,5 до 3%. Они могут выполнять до 18 измерительных функций, в том числе осуществлять измерение частоты, температуры, параметров диодов и транзисторов, звуковую прозвонку.

Мультиметр позволяет непосредственно измерить емкость конденсатора, причем в достаточно широких пределах (от 1 пФ до 20 мкФ). Для измерения больших значений емкости требуются иные приборы либо другие методы измерения.

В процессе измерений мультиметром необходимо следить за тем, чтобы переключатель режимов его работы был установлен в соответствующее положение, определяемое типом измеряемой величины и диапазоном измерения. Кроме того, при измерении напряжения, сопротивления и тока необходимо следить за правильностью выбора зажимов для подключения измерительных проводов.

Усредненные технические характеристики профессионального мультиметра (диапазон измеряемых величин):

Напряжение постоянного тока, В .....	0,1 ... 1 000
Напряжение переменного тока, В.....	0,1 ... 750
Ток (переменный или постоянный), А.....	$1 \cdot 10^{-4}$ ... 20
Сопротивление, Ом.....	0,1 ... $2 \cdot 10^8$
Емкость, пФ .....	1 ... $2 \cdot 10^7$
Коэффициент усиления транзисторов .....	До 1 000
Температура, °С .....	-40 ... 1 200

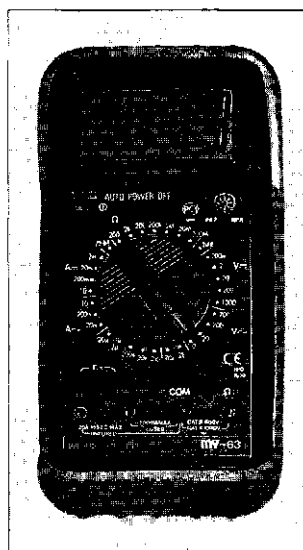


Рис. 5.27. Внешний вид мультиметра MY-63



## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. Осциллографом измеряется синусоидальный сигнал амплитудой  $U_m = 36$  мВ и частотой  $f = 1\,250$  Гц. В какое положение должны быть установлены переключатели «Усиление  $Y$ » и «Длительность развертки», чтобы изображение на экране имело два-три периода колебаний и амплитуду в три-четыре деления?

*Решение.* Переключатель «Усиление  $Y$ » необходимо установить в положение, определяемое выражением  $n_1 = U_m / (3 \dots 4) = 36 / (3 \dots 4) = \approx (12 \dots 9)$  мВ в делении.

Выбираем  $n_1 = 10$  мВ/дел.

Для установки переключателя «Длительность развертки» в необходимое положение будем исходить из того, что два-три периода колебаний должны занять всю горизонтальную ось экрана, разбитую на  $N = 10$  делений. Период исследуемого сигнала  $T = 1/f = 1/1\,250 = \approx 8 \cdot 10^{-4}$  с = 0,8 мс. Следовательно, два-три периода колебаний составят  $(2 \dots 3)T = 1,6 \dots 2,4$  мс, а положение переключателя «Длительность развертки»  $n_2 = (2 \dots 3)T/N = (1,6 \dots 2,4)/10 = 0,16 \dots 0,24$  мс/дел.

Выбираем  $n_2 = 0,2$  мс/дел.

*Ответ.* Для наблюдения исследуемого сигнала необходимо переключатель «Усиление  $Y$ » установить в положение 10 мВ/дел., а переключатель «Длительность развертки» — в положение 0,2 мс/дел.

2. Можно ли с помощью осциллографа исследовать непериодические сигналы?

*Ответ.* Нет. Сигнал на экране создается двумя развертками: вертикальной, формируемой амплитудой исследуемого сигнала, и горизонтальной, формируемой генератором линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) определенной частоты. Для того чтобы на экране осциллографа изображение оставалось неподвижным, необходимо, чтобы частота исследуемых колебаний была кратна частоте колебаний от ГЛИН.

Изображение непериодических колебаний никогда не будет неподвижным, поэтому исследование таких колебаний возможно лишь с помощью записывающих или запоминающих осциллографов.

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

4. Вычислите действующее значение измеряемого осциллографом синусоидального сигнала, если его амплитуда на экране равна

четырем делениям, а переключатель «Усиление  $Y$ » находится в положении 5 В/дел.

5. Вычислите частоту измеряемого осциллографом сигнала, если его период равен четырем делениям, а переключатель «Длительность развертки» находится в положении 5 мс/дел.

6. При измерении частоты осциллографом по методу фигур Лиссажу на экране получено устойчивое изображение в виде восьмерки (8). При этом частота сигнала от генератора, подаваемого на вход  $X$ , равна 100 Гц. Определите частоту сигнала, подаваемого на вход  $Y$ .

7. При измерении частоты осциллографом по методу фигур Лиссажу на экране получено устойчивое изображение в виде знака «бесконечность» ( $\infty$ ). При этом частота сигнала от генератора, подаваемого на вход  $X$ , равна 25 Гц. Определите частоту сигнала, подаваемого на вход  $Y$ .

8. На экране осциллографа получено устойчивое изображение синусоидального сигнала амплитудой в три целых и шесть десятых деления и периодом в пять делений. При этом переключатель «Усиление  $Y$ » находится в положении 1 В/дел., переключатель на кабеле осциллографа — в положении 1 : 10, а переключатель «Длительность развертки» — в положении 1 мс/дел. Вычислите действующее значение и частоту исследуемого напряжения.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Назовите основные преимущества электронных приборов:
  - а) высокая точность;
  - б) широкий диапазон измеряемых частот;
  - в) высокая чувствительность;
  - г) низкая стоимость;
  - д) малое собственное потребление энергии;
  - е) высокая надежность.
2. Для чего предназначен осциллограф:
  - а) для измерения температуры;
  - б) для измерения тока и напряжения;
  - в) для измерения сопротивления;
  - г) для визуального наблюдения;
  - д) для измерения мощности?
3. Какие узлы обеспечивают электронному вольтметру высокую чувствительность, широкий диапазон измеряемых частот и малое потребление энергии:
  - а) входное устройство;
  - б) усилитель с большим коэффициентом усиления;

- в) детектор;
  - г) отсчетное устройство;
  - д) стрелочный индикатор;
  - е) усилитель с большим входным сопротивлением?
4. Что позволяет измерять мультиметр:
- а) ток;
  - б) давление;
  - в) сопротивление;
  - г) напряжение;
  - д) мощность?
5. Что надо сделать, чтобы измерить мультиметром постоянное напряжение 1,1 В:
- а) подключить выводы ЭЦ к зажимам «СОМ» и «mA»;
  - б) подключить выводы ЭЦ к зажимам «СОМ» и «V»;
  - в) закоротить выводы для установки прибора в нулевое положение;
  - г) установить переключатель рода работы в положение «DCV»;
  - д) установить переключатель рода работы в положение «2 В»;
  - е) установить переключатель рода работы в положение «20 В»?
6. Какие основные узлы входят в состав измерительного генератора:
- а) маломощный задающий RC-генератор;
  - б) корпус;
  - в) усилитель;
  - г) ручка для переноски;
  - д) выходное устройство;
  - е) динамики?

## 5.4. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

### ТЕОРИЯ

#### 5.4.1. Измерение напряжения

- ☛ Прибор для измерения напряжения называется вольтметром. Его общий вид показан на рис. 5.28. Вольтметр включается параллельно нагрузке (рис. 5.29, а). Чтобы он не оказывал влияния на параметры измеряемой ЭЦ, его внутреннее сопротивление должно быть очень большим (стремиться к бесконечности).

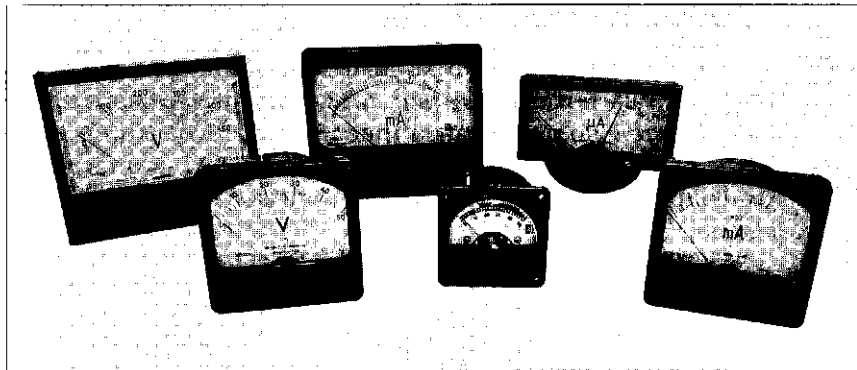


Рис. 5.28. Щитовые электромеханические измерительные приборы

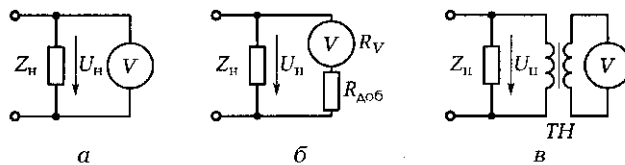


Рис. 5.29. Схемы включения вольтметра:

а — напрямую к нагрузке; б — через добавочный резистор; в — через измерительный трансформатор напряжения

Для измерения постоянного напряжения может использоваться прибор любой системы. На практике чаще применяются приборы магнитоэлектрической системы. Для измерения переменного напряжения используется прибор электромагнитной системы, шкала которого проградуирована в действующих значениях. Может также применяться прибор магнитоэлектрической системы с полупроводниковым диодом, показывающий среднее значение измеряемой величины.

Для расширения пределов измерения вольтметра на постоянном токе используется добавочный резистор, включаемый последовательно с прибором (рис. 5.29, б). При этом

$$R_{\text{доб}} = R_V(n - 1).$$

Здесь  $R_V$  — внутреннее сопротивление вольтметра;  $n = U_{\text{н}}/U_0$ , где  $U_{\text{н}}$  — измеряемое напряжение на разгрузке;  $U_0$  — номинальная величина вольтметра.

Для расширения пределов измерения вольтметра на переменном токе используются трансформаторы напряжения  $ТН$  (рис. 5.29, в). Коэффициент трансформации выбирается из условия  $n = U_{\text{н}}/U_0$ .

## 5.4.2. Измерение тока

▶▶▶ Прибор для измерения тока называется амперметром. Его внешний вид показан на рис. 5.28. Амперметр включается последовательно с нагрузкой (рис. 5.30, а). Чтобы он не оказывал влияния на параметры измеряемой ЭЦ, его внутреннее сопротивление должно быть минимальным (стремиться к нулю).

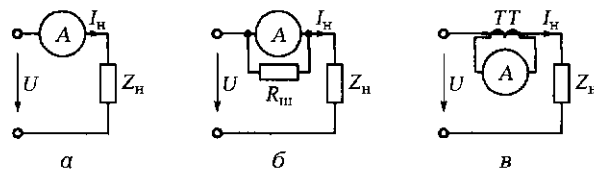


Рис. 5.30. Схемы включения амперметра:

а — напрямую к нагрузке; б — с помощью шунта; в — через измерительный трансформатор тока

Для измерения постоянного тока чаще применяется прибор магнитоэлектрической системы, переменного — электромагнитной.

Для расширения пределов измерения амперметра на постоянном токе используется добавочный резистор (шунт), включаемый параллельно прибору (рис. 5.30, б). При этом

$$R_{\text{ш}} = R_A \frac{I_0}{I_{\text{н}} - I_0},$$

где  $R_A$  — внутреннее сопротивление амперметра;  $I_{\text{н}}$  — измеряемый ток в нагрузке;  $I_0$  — номинальная величина амперметра.

Для расширения пределов измерения амперметра на переменном токе используются трансформаторы тока ТТ (рис. 5.30, в). Коэффициент трансформации выбирается из условия  $n = I_{\text{н}}/I_0$ .

## 5.4.3. Измерение мощности

▶▶▶ Мощность, потребляемая нагрузкой ( $P = UI$ ), может быть измерена косвенным методом с помощью амперметра и вольтметра (рис. 5.31, а) или непосредственно прибором электродинамической системы — ваттметром, включаемым по схеме, показанной на рис. 5.31, б. Одна из катушек прибора — токовая ( $I-I^*$ ) — включается последовательно с нагрузкой, а другая — напряжения ( $U-U^*$ ) — параллельно нагрузке. Зажимы со знаком «\*» должны быть соединены между собой.

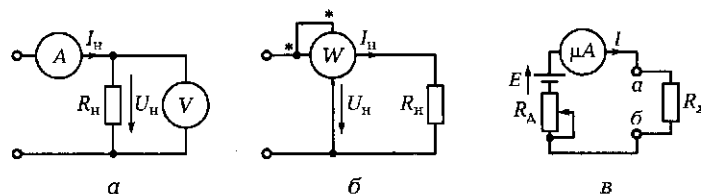


Рис. 5.31. Схемы измерения:

*а* — мощности и сопротивления косвенным методом; *б* — мощности ваттметром; *в* — сопротивления омметром

Для расширения пределов измерения ваттметра на постоянном токе используются добавочный резистор (шунт), включаемый параллельно токовой катушке прибора, и резистор, включаемый последовательно с катушкой вольтметра. Для расширения пределов измерения ваттметра на переменном токе используются трансформаторы тока и напряжения.

#### 5.4.4. Измерение сопротивления

☛ Сопротивление может быть измерено косвенным методом с помощью амперметра и вольтметра ( $R_n = U_n / I_n$ ) (см. рис. 5.31, *а*) или непосредственно омметром, включаемым по схеме, показанной на рис. 5.31, *в*.

Здесь  $E$  — ЭДС источника питания, входящего в состав прибора;  $R_d$  — резистор переменного сопротивления, включаемый последовательно с микроамперметром магнитоэлектрической системы;  $R_x$  — измеряемое сопротивление. Поскольку ток в цепи  $I = E / (R_d + R_x)$  обратно пропорционален сопротивлению, то максимальному отклонению стрелки микроамперметра будет соответствовать минимальное сопротивление.

Если соединить накоротко точки *а* и *б*, то можно с помощью резистора  $R_d$  установить максимальный ток по шкале прибора. При этом сопротивление  $R_x = 0$ . Если же разорвать соединение между точками *а* и *б*, то ток будет равен нулю, а сопротивление  $R_x$  будет стремиться к бесконечности. Таким образом, шкала микроамперметра может быть проградуирована в омах справа налево. При этом она будет неравномерной.

Для измерения значительных сопротивлений, например сопротивления изоляции в том же электроизмерительном приборе, используются специальные приборы — мегаомметры. Они могут измерять сопротивления до 10 000 МОм. Поэтому для получения приемлемого тока применяется источник напряжения до 2 500 В.

### 5.4.5. Измерение неэлектрических величин

Практически все параметры, характеризующие тот или иной технологический процесс, являются величинами неэлектрическими (перемещение, скорость, давление, температура, уровень, расход, деформация, освещенность, задымленность и т.д.). Как же их измерить? Как передать информацию об их величине в автоматическую систему управления технологическим процессом? Как обеспечить работу полностью автоматических производств?

Это сделать нетрудно, если преобразовать определенным образом неэлектрическую величину в соответствующую электрическую (ЭДС, электрический ток, активное сопротивление, индуктивность или емкость).

☛ Устройство, преобразующее какую-либо физическую величину в электрический сигнал, называется *первичным преобразователем*, или *датчиком*.

В зависимости от того, в какую электрическую величину преобразуется неэлектрическая, принято различать:

*активные*, или *генераторные*, преобразователи — в них неэлектрическая величина преобразуется в ЭДС или электрический ток;

*пассивные*, или *параметрические*, преобразователи — в них изменение неэлектрической величины сопровождается изменением одного из электрических параметров ( $R$ ,  $L$  или  $C$ ).

Активные преобразователи подразделяются на четыре группы: *индукционные* — это, как правило, датчики скорости, поскольку ЭДС, индуцируемая на их выходе, пропорциональна скорости перемещения проводника в магнитном поле;

*оптические* — это датчики освещенности, перемещения, в основу которых положен фотоэффект — преобразование лучистой энергии в фототок;

*пьезоэлектрические* — преобразуют механические силы, действующие на некоторые кристаллы или керамику, в пьезоЭДС;

*термоэлектрические* — преобразуют тепловую энергию в термоЭДС.

Пассивные преобразователи образуют широкую группу и подразделяются по принципу действия:

на *резистивные* — преобразуют перемещение, деформацию, изменение давления, температуры, уровня в изменение электрического сопротивления;

*индуктивные* — преобразуют перемещение, изменение давления, силы, момента в изменение индуктивности;

*емкостные* — преобразуют перемещение, изменение силы, давления, содержания влаги, количества вещества в изменение емкости.

Поскольку изменение активного сопротивления, индуктивности и емкости сопровождается изменением тока в электрической цепи, то для измерения неэлектрических величин могут быть использованы уже рассмотренные измерительные приборы.

Электрические сигналы с выхода датчика, пропорциональные измеряемой неэлектрической величине, могут быть переданы на значительные расстояния в систему автоматического управления технологическим процессом, где выполняется их обработка с помощью ЭВМ.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. В лаборатории электротехники на стендах используются многопредельные приборы магнитоэлектрической системы: вольтметр с максимальным током  $I_V = 30 \text{ мА}$ , внутренним сопротивлением  $R_V = 20 \text{ Ом}$  и миллиамперметр с максимальным током  $I_A = 20 \text{ мА}$ , внутренним сопротивлением  $R_A = 15 \text{ Ом}$ .

Рассчитайте сопротивления добавочных резисторов для вольтметра, обеспечивающих три диапазона измерений напряжений: от 0 до соответственно  $U_1 = 30 \text{ В}$ ,  $U_2 = 150 \text{ В}$ ,  $U_3 = 300 \text{ В}$ , а также сопротивления шунтов для миллиамперметра, обеспечивающих три диапазона измерений токов: от 0 до соответственно  $I_1 = 100 \text{ мА}$ ,  $I_2 = 500 \text{ мА}$ ,  $I_3 = 1000 \text{ мА}$ .

*Решение.* Добавочные резисторы для расширения пределов измерения напряжения включаются последовательно с вольтметром (рис. 5.32, а). Для расчета сопротивления первого добавочного резистора можно воспользоваться выражением  $R_1 = U_1/I_V - R_V$ , второго —  $R_2 = U_2/I_V - (R_V + R_1)$  и т.д. Тогда  $R_1 = 30/0,03 - 20 = 980 \text{ Ом}$ ;

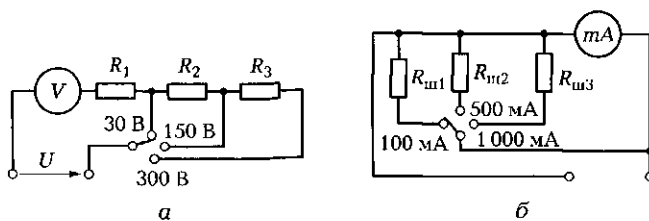


Рис. 5.32. Схемы, обеспечивающие расширение пределов измерения вольтметра (а) и миллиамперметра (б) (к задаче 1 подразд. 5.4)



$$R_2 = 150/0,03 - (20 + 980) = 4\,000 \text{ Ом} = 4 \text{ кОм}; R_3 = 300/0,03 - (20 + 980 + 4\,000) = 5\,000 \text{ Ом} = 5 \text{ кОм}.$$

Чтобы вычислить сопротивления шунтов для миллиамперметра (рис. 5.32, б), определяем падение напряжения на самом приборе при максимальном токе, т. е. при максимальном отклонении стрелки прибора:  $U_A = I_A R_A = 0,02 \cdot 15 = 0,3 \text{ В}$ . Поскольку это напряжение должно быть и на шунте, определяем сопротивление шунта для первого диапазона:  $R_{ш1} = U_1/I_{ш1} = U_1/(I_1 - I_A) = 0,3/(0,1 - 0,02) = 3,75 \text{ Ом}$ . Аналогичным образом находим, что  $R_{ш2} = 0,63 \text{ Ом}$ ,  $R_{ш3} = 0,3 \text{ Ом}$ .

*Ответ.* Для расширения пределов измерения и создания многопредельных приборов могут использоваться добавочные резисторы, включаемые последовательно с вольтметром, и шунты, включаемые параллельно амперметру. При этом повышение измеряемого напряжения требует увеличения сопротивления добавочного резистора ( $R_1 = 0,98 \text{ кОм}$ ;  $R_2 = 4 \text{ кОм}$ ;  $R_3 = 5 \text{ кОм}$ ), а повышение измеряемого тока требует уменьшения сопротивления шунта ( $R_{ш1} = 3,75 \text{ Ом}$ ;  $R_{ш2} = 0,63 \text{ Ом}$ ;  $R_{ш3} = 0,3 \text{ Ом}$ ).

2. Сопротивление обмотки дросселя измерено косвенным методом с помощью вольтметра и амперметра (рис. 5.33). При измерении на постоянном токе вольтметр показал 9 В, амперметр — 300 мА. При измерении на переменном токе промышленной частоты показания приборов составили соответственно 20 В и 50 мА. Вычислите активное сопротивление и индуктивность дросселя.

*Решение.* При измерении на постоянном токе индуктивное сопротивление дросселя равно нулю ( $X_L = 2\pi fL$ , а  $f = 0$ ), поэтому показания приборов позволяют вычислить активное сопротивление дросселя:  $R_{\text{дп}} = U/I = 9/0,3 = 30 \text{ Ом}$ . На переменном токе дроссель помимо активного сопротивления обладает индуктивным. Показания приборов позволяют вычислить полное сопротивление дросселя:  $Z = U/I = 20/0,05 = 400 \text{ Ом}$ . На основании выражения для полного сопротивления (треугольника сопротивлений)  $Z = \sqrt{R_{\text{дп}}^2 + X_L^2}$  можно вычислить индуктивное сопротивление дросселя:  $X_L = \sqrt{Z^2 - R_{\text{дп}}^2} = 398,9 \text{ Ом}$ . Отсюда индуктивность дросселя  $L = X_L/(2\pi f) = 398,9/314 = 1,27 \text{ Гн}$ .

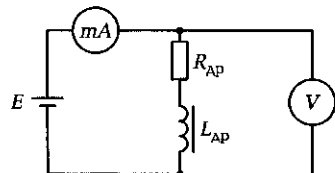


Рис. 5.33. Схема измерения сопротивления к задаче 2 подразд. 5.4

*Ответ.* Активное сопротивление дросселя равно 30 Ом, индуктивность — 1,27 Гн.

3. Какое сопротивление должен иметь вольтметр:

- а) малое; б) очень малое; в) большое; г) очень большое; д) среднее, е) не имеет значения?

*Ответ.* Вольтметр должен иметь очень большое сопротивление. Он включается параллельно нагрузке, которая может иметь значительное сопротивление. Если сопротивление вольтметра не достаточно велико, то он будет шунтировать нагрузку и оказывать влияние на режим работы ЭЦ, в которой проводятся измерения. Результаты измерений будут искажены.

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

4. Амперметр с номинальной величиной 0,3 А имеет внутреннее сопротивление  $R_A = 0,008$  Ом. Определите сопротивление шунта, обеспечивающего расширение предела измерения до 1,5 А.

5. Вольтметр с номинальной величиной 30 В и внутренним сопротивлением 3 кОм используется для измерения напряжения 210 В. Какое минимальное сопротивление должен иметь добавочный резистор, который необходимо подключить к вольтметру для расширения предела измерения до нужного значения?

6. Вычислите ток в нагрузке  $I_H$  (рис. 5.34, а), если миллиамперметр с внутренним сопротивлением  $R_A = 1$  Ом, включенный в цепь вместе с шунтом сопротивлением  $R_{ш} = 0,1$  Ом, показал ток  $I_A = 80$  мА.

7. Вычислите напряжение питания ЭЦ (рис. 5.34, б), если вольтметр с внутренним сопротивлением  $R_V = 5000$  Ом, включенный последовательно с добавочным резистором сопротивлением  $R_A = 10000$  Ом, показал напряжение  $U_V = 300$  В.

8. Сопротивление датчика температуры типа ТПК-620, построенного на основе полупроводникового материала, составило 546,47 Ом. Определите с помощью тарировочной таблицы температуру, соответствующую полученному значению сопротивления.

$T, K$	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6
$R, \text{ Ом}$	585,99994	557,50552	530,65078	502,54355	469,89546

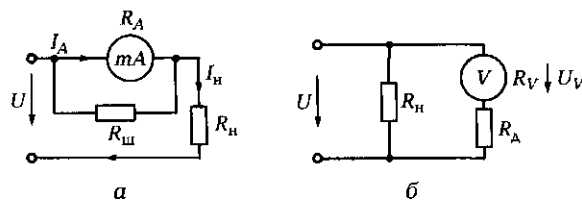


Рис. 5.34. Схемы ЭЦ к задачам 6 (а) и 7 (б) подразд. 5.4

9. Вольтметр на выходе датчика скорости, построенного на основе индукционного преобразователя, показал напряжение 8,4 В. Определите скорость объекта, если номинальная величина вольтметра, равная 30 В, соответствует скорости 150 км/ч.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Как включается в ЭЦ вольтметр и какое внутреннее сопротивление он должен иметь:
  - а) параллельно, большое;
  - б) параллельно, малое;
  - в) последовательно, малое;
  - г) последовательно, большое?
2. Как включается в ЭЦ амперметр и какое внутреннее сопротивление он должен иметь:
  - а) параллельно, большое;
  - б) параллельно, малое;
  - в) последовательно, малое;
  - г) последовательно, большое?
3. Можно ли измерить сопротивление с помощью вольтметра и амперметра:
  - а) можно, разделив показание вольтметра на показание амперметра;
  - б) можно, сложив показания вольтметра и амперметра;
  - в) можно, разделив показание амперметра на показание вольтметра;
  - г) нельзя?
4. Как подключается добавочный резистор к вольтметру постоянного тока для расширения пределов измерения прибора:
  - а) параллельно;
  - б) смешанно;
  - в) звездой;
  - г) последовательно?
5. Как подключается шунт к амперметру постоянного тока для расширения пределов измерения прибора:
  - а) параллельно;
  - б) смешанно;
  - в) звездой;
  - г) последовательно?
6. Можно ли измерить мощность в ЭЦ постоянного тока с помощью вольтметра и амперметра:

- а) можно, разделив показание вольтметра на показание амперметра;
  - б) можно, перемножив показания вольтметра и амперметра;
  - в) можно, разделив показание амперметра на показание вольтметра;
  - г) нельзя?
7. В генераторных (активных) датчиках неэлектрическая величина преобразуется в изменение:
- а) сопротивления, емкости, индуктивности;
  - б) ЭДС;
  - в) направления тока;
  - г) мощности.
8. В параметрических (пассивных) датчиках неэлектрическая величина преобразуется в изменение:
- а) сопротивления, емкости, индуктивности;
  - б) ЭДС, напряжения, тока;
  - в) силы тока, проводимости;
  - г) мощности.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13**

### **Изучение электронной измерительной аппаратуры**

#### **1. Цель работы**

1.1. Изучить структурные схемы основных электронных измерительных и задающих приборов (рис. Л13.1).

1.2. Изучить методы работы с электронной измерительной аппаратурой.

#### **2. Объект и средства испытаний**

Объектом испытаний является комплект электронной измерительной и задающей аппаратуры, включающий в себя электронные осциллограф, вольтметр и генератор напряжений специальной формы.

Электронный осциллограф ОСУ-10-А (или ОСУ-10-Б) имеет следующие основные характеристики:

- полоса пропускания (диапазон рабочих частот) — 0... 10 МГц;
- максимальная чувствительность — 10 мВ/дел.;
- длительность развертки — от 0,4 мкс/дел. до 2 с/дел.;

погрешность измерения — 4 %;  
входное сопротивление — 1 МОм.

Основные характеристики применяемого в работе электронного вольтметра ВЗ-40:

диапазон измеряемых напряжений —  $10^{-4}$ ... 100 В;  
диапазон измеряемых частот — от 20 Гц до 1 МГц;  
основная погрешность — 6 %;  
входное сопротивление — 5 МОм.

В работе также используются:

мультиметр МУ-60 (МУ-62, МУ-64) в режиме вольтметра совместно с мини-блоком «Измерительный преобразователь» для измерения высокочастотных сигналов. Необходимость в этом мини-блоке обусловлена тем, что диапазон частот мультиметров, входящих в состав стенда, составляет от 40 до 400 Гц. Преобразователь представляет собой выпрямитель, на вход которого подается синусоидальное измеряемое напряжение частотой от 26 Гц до 100 кГц. К выходу выпрямителя подключается мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения. (Аналогично работает электронный вольтметр.) При этом постоянное выходное напряжение равно действующему значению переменного входного напряжения;

генератор напряжений специальной формы, входящий в состав стенда. Переключатель «ФОРМА» устанавливается в положение «~». Частота сигнала регулируется десятиоборотным потенциометром «ЧАСТОТА» с цифровой индикацией и переключателем диапазонов «МНОЖИТЕЛЬ». Имеются три диапазона регулирования частоты:  $\times 1$  — от 25 до 1 025 Гц;  $\times 10$  — от 250 до 10 250 Гц;  $\times 100$  — от 2 500 до 102 500 Гц. Амплитуда выходного сигнала генератора регулируется потенциометром «АМПА.» в диапазоне от 0 до 6,5... 12,5 В.

### **3. Задание к лабораторной работе**

#### ***Выполняется при подготовке к работе***

3.1. Ознакомиться с порядком выполнения работы, теоретическими сведениями по данной теме. Подготовить в рабочей тетради протокол испытаний.

3.2. В соответствии с табл. Л13.1 для своего варианта заполнить первый и второй столбцы табл. Л13.3 (в протоколе испытаний приведен пример заполнения таблицы для варианта № 8).

#### ***Выполняется в лаборатории***

3.3. Включить осциллограф с помощью переключателя «Сеть» и, используя проводники со штекерами, подать сигнал с зажимов

Таблица Л13.1

Параметр	Номер варианта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$f$ , Гц	32 5860	56 4860	126 6750	523 2260	982 3880	220 6820	110 5240	55 3680
$U$ , В	0,184 2,82	0,232 3,17	0,386 1,36	0,482 2,24	0,546 1,55	0,166 2,63	0,323 1,06	0,28 3,62

$A$  и  $N$  ( $U = 2$  В, 50 Гц) на вертикальный вход  $Y$  осциллографа (рис. Л13.2, а). Ручками «Яркость», «Фокус», «Вверх-вниз», «Влево-вправо», «Усиление  $Y$ » установить изображение сигнала в рабочей части экрана. С помощью ручек «Длительность развертки» и «Синхронизация» получить устойчивое изображение сигнала на экране с двумя-тремя периодами колебаний. Используя калибровку по амплитуде и длительности, измерить амплитуду и период исследуемого сигнала, вычислить действующее значение и частоту сигнала. Результаты занести в табл. Л13.2.

С помощью электронного вольтметра (мультиметра) измерить действующее значение напряжения на зажимах  $A$  и  $N$ . Результаты занести в табл. Л13.2.

Нажатием кнопки  $X$  (срабатывает переключатель  $P2$  — см. рис. Л13.1, а) перевести осциллограф в режим  $X—Y$ . Подать на горизонтальный вход осциллографа  $X$  синусоидальный сигнал с выхода генератора напряжений специальной формы (см. рис. Л13.2, а) и с помощью потенциометра «АМПА.» получить симметричную фигуру в центре экрана. Пользуясь методом фигур Лиссажу, измерить частоту сигнала, снимаемого с зажимов  $A$  и  $N$ . Результат занести в табл. Л13.2.

3.4. В целях изучения методов работы с комплектом электронной измерительной аппаратуры собрать схему, приведенную на рис. Л13.2, б. Поочередно устанавливая на выходе генератора напряжение, значение и частота которого показаны в первых двух столбцах табл. Л13.3, добиться устойчивого изображения на экране осциллографа двух-трех периодов исследуемых колебаний.

Указать в табл. Л13.3 положения ручек осциллографа «Усиление  $Y$ » и «Длительность развертки».

Измерить сигналы на выходе генератора с помощью электронного вольтметра (мультиметра).

Результаты измерений занести в шестой столбец табл. Л13.3, а в пятом столбце указать диапазон прибора, в котором проводилось измерение каждого из сигналов.

3.5. После согласования протокола испытаний с преподавателем ЭЦ обесточить и разобрать, приборы, проводники и мини-блоки убрать на место, рабочее место привести в порядок.

#### 4. Протокол испытаний и отчет о работе № 13

##### Изучение электронной измерительной аппаратуры

##### 4.1. Цель работы \_\_\_\_\_

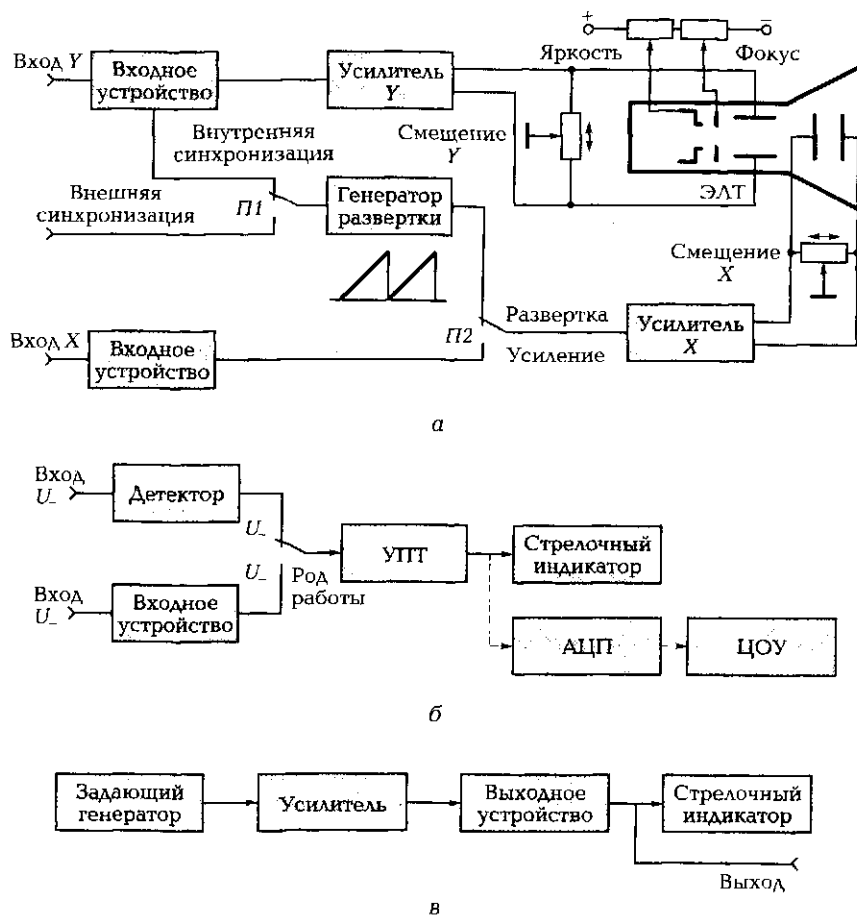


Рис. П13.1. Структурные схемы электронных измерительных приборов:  
 а — осциллограф, б — вольтметр; в — генератор сигналов; ЭЛТ — электронно-лучевая трубка; УПТ — усилитель постоянного тока; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ЦОУ — цифровое отсчетное устройство

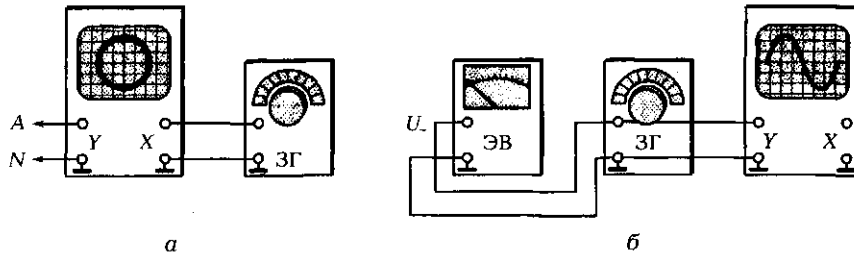


Рис. Л13.2. Схемы соединения электронных измерительных приборов:  
*а* — для определения частоты сети по фигуре Лиссажу; *б* — для измерения частоты и величины исследуемого сигнала; ЗГ — задающий генератор; ЭВ — электронный вольтметр

#### 4.2. Структурные схемы электронных приборов и таблицы.

Таблица Л13.2			
Измеряемый параметр	Метод измерения		
	Осциллографом	Вольтметром	По фигуре Лиссажу
Напряжение $U$ , В			—
Частота $f$ , Гц		—	

Таблица Л13.3					
$f$ , Гц	$U$ , В	Положение ручек осциллографа		Положение переключателя вольтметра «Предел измерений»	Измеренное вольтметром напряжение, В
		«Усиление Y»	«Длительность развертки»		
55	0,28				
	3,62				
3 680	0,28				
	3,62				

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_  
 Преподаватель \_\_\_\_\_

4.3. Краткие выводы \_\_\_\_\_



---

---

---

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Назовите основные преимущества электронных измерительных приборов по сравнению с электромеханическими.
2. Объясните принцип работы осциллографа по его структурной схеме.
3. Объясните принцип работы электронного вольтметра по его структурной схеме.
4. Объясните принцип работы генератора сигналов по его структурной схеме.
5. Каким образом по фигуре Лиссажу на экране осциллографа можно определить частоту сигнала?
6. Как с помощью осциллографа определить амплитуду сигнала?

# ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

## 6.1. ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

---

### ТЕОРИЯ

#### 6.1.1. Общие сведения

Промышленная электроника представляет собой область науки и техники, связанную с применением в промышленности различных электронных, ионных, полупроводниковых приборов: электронных ламп, диодов, транзисторов, микросхем, индикаторов и ряда других, а также устройств на их основе (выпрямителей, усилителей, генераторов, стабилизаторов и др.).

Наиболее прогрессирующим направлением электроники является полупроводниковая техника, вытеснившая в большинстве областей электронные и ионные приборы благодаря более высокому КПД, значительно меньшим габаритным размерам, большему сроку службы, меньшей потребляемой мощности. Поэтому в данной главе рассматривается работа основных электронных устройств, построенных на полупроводниковых приборах.

Современные электронные устройства помимо активных нелинейных элементов (полупроводниковых приборов) содержат значительное число пассивных линейных элементов.

#### 6.1.2. Линейные элементы промышленной электроники

К линейным элементам относятся резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности. Они обеспечивают заданные ре-

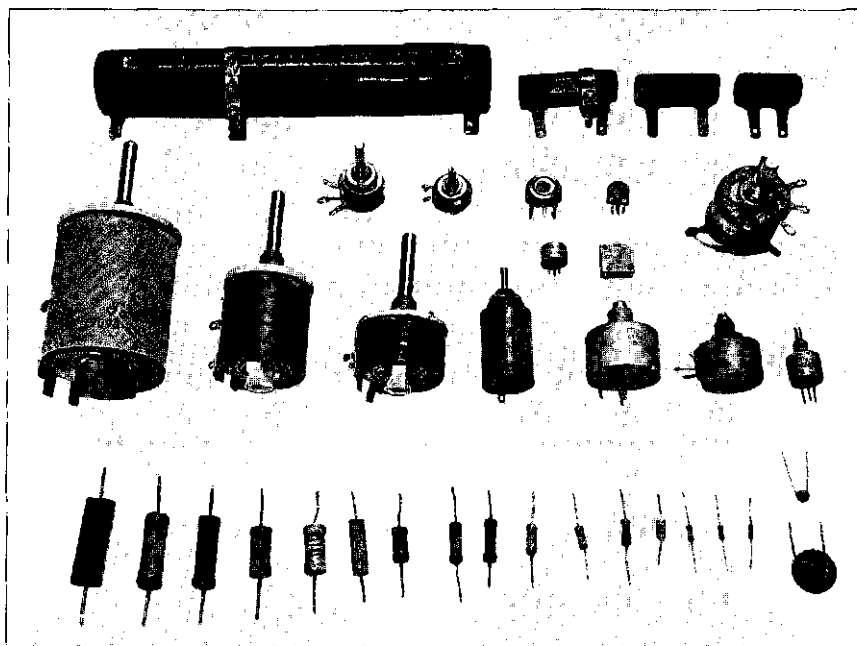


Рис. 6.1. Внешний вид наиболее распространенных типов резисторов

жимы работы электронных устройств и взаимосвязь их отдельных узлов.

**Резисторы** (рис. 6.1) являются необратимыми преобразователями электрической энергии в тепловую. Они подразделяются на постоянные и переменные. Для расчета сопротивления любого резистора используется выражение  $R = \rho l / S$ , где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление материала;  $l$  — длина проводника;  $S$  — площадь поперечного сечения проводника. Единицей измерения сопротивления резистора является ом.

*Постоянные проволочные резисторы* отличаются высокой стабильностью и способностью рассеивать большую мощность. Выпускаются они номиналом от 0,9 Ом до 50 кОм и рассеивают мощность от 2,5 до 150 Вт.



*Переменные проволочные резисторы* имеют сопротивление до 10 кОм и мощность рассеяния до 100 Вт.




*Постоянные пленочные резисторы* — самые распространенные в технике. В основу их изготовления положен технологический процесс нанесения на керамическую трубку слоя углерода толщиной от 0,001 до 0,2 мкм. Выводы резистора изготавливаются из луже-

ных латунных хомутиков. Поверхность углеродного слоя покрывают различными лаками. Резисторы выпускаются сопротивлением от 1 Ом до 10 МОм и мощностью рассеяния от 0,05 до 10 Вт.

*Переменные пленочные резисторы* в основе своей имеют гетинаксовую дужку с нанесенным на нее токопроводящим слоем. Съем сигнала осуществляется посредством латунной пружинной щетки. Угол поворота щетки составляет  $250^\circ$ , сопротивление резистора — до 4,7 МОм, мощность рассеяния — до 2 Вт.

☛ В спецификациях к схемам должны быть указаны: тип резистора, его мощность, номинал сопротивления, класс точности (например, МАТ-2-11кОм-I).

Условные графические изображения резисторов на схемах:  
 — постоянный;  — переменный.

**Конденсаторы** (рис. 6.2) являются накопителями электрической энергии. Их подразделяют на три группы: постоянные — , подстроечные —  и переменные — . Для расчета емкости конденсатора используется выражение  $C = \epsilon_0 \epsilon S/d$ , где  $\epsilon_0 = 8,86 \times 10^{-12}$  Ф/м — диэлектрическая постоянная;  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика;  $S$  — площадь обкладок конденсатора;  $d$  — расстояние между обкладками.

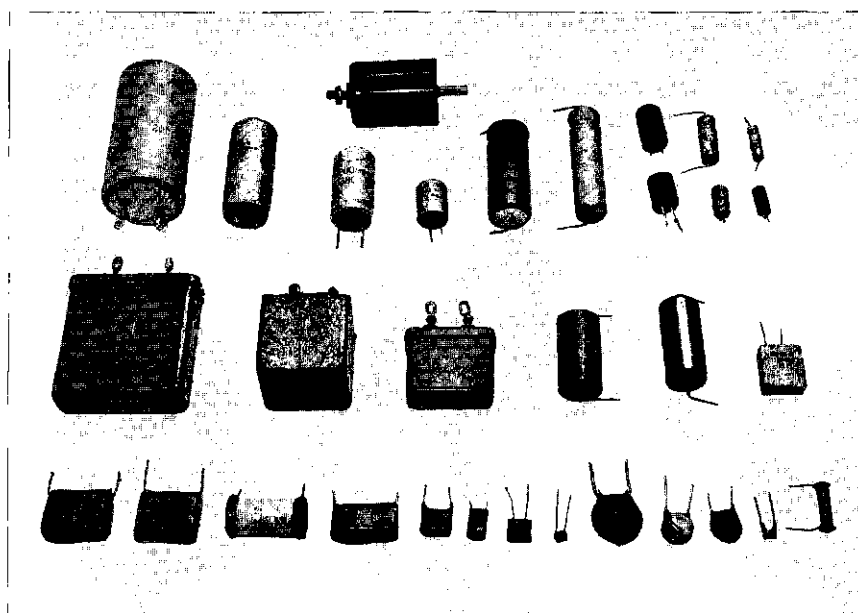


Рис. 6.2. Внешний вид наиболее распространенных типов конденсаторов

Единицей измерения емкости конденсатора является фарад (Ф);  $1 \text{ Ф} = 10^6 \text{ мкФ} = 10^9 \text{ нФ} = 10^{12} \text{ пФ}$ . В промышленной электронике применяются конденсаторы емкостью от 1 пФ до 2 000 мкФ.

Наибольшее применение находят конденсаторы *постоянной емкости*. Роль обкладок в них выполняют ленты из алюминиевой (свинцовой) фольги толщиной 7...8 мкм. В качестве диэлектрика между обкладками используются конденсаторная бумага, слюда, керамика, фторопласт, стиролфлекс и др. В соответствии с этим конденсаторы подразделяются на бумажные, слюдяные, керамические, электролитические. В электролитических конденсаторах роль диэлектрика выполняет слой оксида алюминия, нанесенный электролитическим способом. Его толщина — 0,01...1,5 мкм. При малых габаритных размерах емкость таких конденсаторов достигает 4 000 мкФ.

Конденсаторы *подстроечные* и *переменной емкости* представляют собой систему из неподвижных и подвижных пластин, имеющих ось вращения. В качестве диэлектрика в них используется керамика либо воздух. Емкость их небольшая: до 30 пФ у подстроечных и до 1 000 пФ у переменных.

☛ В спецификациях к схемам должны быть указаны: тип конденсатора, его номинальная емкость, рабочее напряжение и класс точности (например, КСО-470-600-I).

**Катушки индуктивности** (рис. 6.3) являются накопителями магнитной энергии. Их основной параметр — индуктивность  $L$ , представляющая собой коэффициент пропорциональности между потоком сцепления  $\Psi$  и током  $i$ .

Значение индуктивности определяется габаритными размерами и формой катушки, числом витков и материалом сердечника.

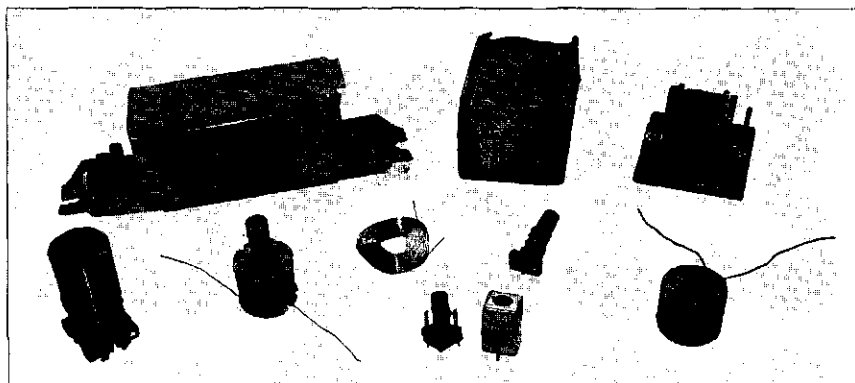




Рис. 6.3. Внешний вид катушек индуктивности

Единицей измерения индуктивности является генри (Гн). В радиотехнических схемах используются катушки с индуктивностью в несколько микрогенри, а дроссели газоразрядных ламп имеют индуктивность в несколько генри. Условное графическое изображение катушки индуктивности без сердечника — , с ферромагнитным сердечником — .

### 6.1.3. Физика проводимости полупроводников

К полупроводникам относят твердые вещества, удельное сопротивление которых при комнатной температуре находится между удельным сопротивлением металлов ( $10^{-6} \dots 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ) и диэлектриков (не менее  $10^{18} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ) и составляет  $10^{-3} \dots 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .

Наибольшее применение в полупроводниковой технике находят германий (Ge) и кремний (Si). Это четырехвалентные элементы, у которых на внешней оболочке имеются четыре электрона. Связь валентных электронов с ядром непрочная, поэтому электроны под действием внешней энергии (тепловой, электрического поля, лучистой) могут покинуть свой атом, становясь свободными. Освободившееся место, называемое дыркой, может заполниться электроном с соседнего атома, а образовавшаяся там дырка заполняется соседним электроном и т.д.

☛ Таким образом, полупроводниковые материалы способны к электронной и дырочной проводимостям под действием внешней энергии.

Главным признаком полупроводниковых материалов является сильная зависимость их удельного сопротивления от примесей.

Если в кристаллическую решетку чистого германия или кремния ввести примесь пятивалентной сурьмы, то в кристалле германия или кремния появляются свободные электроны.

☛ Такой полупроводник будет обладать электронной проводимостью, поэтому его называют полупроводником *n*-типа (negative).

Если в кристаллическую решетку чистого германия или кремния ввести примесь трехвалентного индия или вольфрама, то одна ковалентная связь останется свободной.

☛ В таком полупроводнике имеет место дырочная проводимость, поэтому его называют полупроводником *p*-типа (positive).

### 6.1.4. Приборы на основе полупроводников *n*- и *p*-типа

На основе полупроводниковых материалов с *n*- или *p*-проводимостью могут быть построены нелинейные приборы, изменяющие свое сопротивление под действием температуры, электрического поля, света и т. д.

☛ Терморезисторы — это приборы, изменяющие свое сопротивление под действием температуры.

Среди терморезисторов основное применение нашли *термисторы* — резисторы с большим отрицательным температурным коэффициентом. В отличие от металлических терморезисторов, сопротивление которых растет с увеличением температуры, у термисторов сопротивление резко падает (рис. 6.4, *a*).

Эти приборы применяют для измерения и регулирования температуры, а также для параметрической стабилизации напряжения при изменении температуры. Именно термисторы используются для измерения сверхнизких температур, близких к абсолютному нулю.

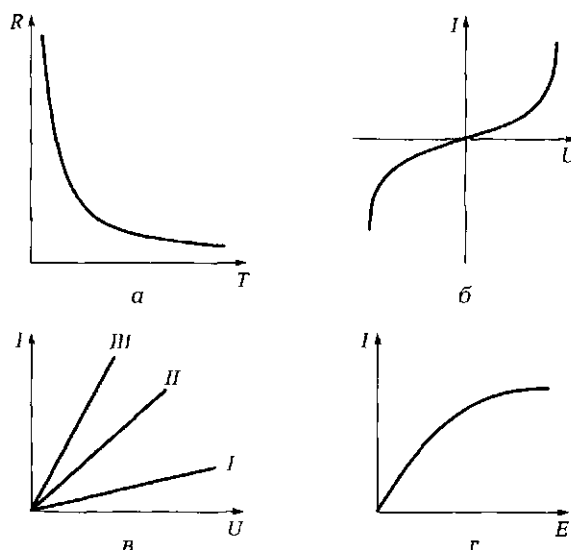



Рис. 6.4. Характеристики приборов на основе полупроводников *n*- и *p*-типа:


*a* — зависимость сопротивления термистора от температуры; *б* — ВАХ варистора; *в* — ВАХ фоторезистора; *г* — зависимость тока фоторезистора от освещенности

Условное графическое изображение терморезистора — .

☛ Варисторы — это резисторы, сопротивление которых зависит от величины приложенного напряжения.


Вольт-амперная характеристика варисторов имеет участки, где напряжение почти не зависит от тока (рис. 6.4, б).

Основное применение варисторов — стабилизация напряжения в схемах автоматического управления и регулирования.

Условное графическое изображение варистора — .

☛ Фоторезисторы — это приборы, сопротивление которых зависит от светового излучения.

Вольт-амперные характеристики фоторезистора показаны на рис. 6.4, в. Характеристика *I* соответствует темновому потоку ( $\Phi_1 = 0$ ), характеристики *II* и *III* — световым потокам  $\Phi_2 > 0$  и  $\Phi_3 > \Phi_2$ . Зависимость тока фоторезистора от освещенности  $E$ , измеряемой в люксах, носит нелинейный характер (рис. 6.4, г).

Условное графическое изображение фоторезистора — .

### 6.1.5. Свойство электронно-дырочного перехода

☛ При соединении двух полупроводников *n*- и *p*-типа между ними образуется *n*—*p*-переход, ширина зоны которого зависит от величины и направления вектора напряженности внешнего электрического поля.

При отсутствии внешнего поля на границе *n*—*p* часть электронов из полупроводника *n*-типа переходит в полупроводник *p*-типа, а часть дырок, наоборот, — из *p*- в *n*-типа. В этом случае у границы со стороны полупроводника *n*-типа скапливаются положительно заряженные ионы, а со стороны полупроводника *p*-типа — отрицательно заряженные ионы (рис. 6.5, а). Образуется так называемый запирающий слой. На границе перехода возникает внутреннее электрическое поле напряженностью  $E_{вн}$ . При этом сопротивление перехода весьма значительно.

Если к *n*—*p*-переходу приложить внешнее поле ( $E_{внеш}$ ) так, чтобы направление вектора его напряженности совпало с направлением вектора напряженности внутреннего поля, ширина запирающего слоя увеличится, вырастет потенциальный барьер и основные носители (электроны и дырки) не смогут пройти через переход (рис. 6.5, б). Через него будут проходить лишь неосновные носители, наличие



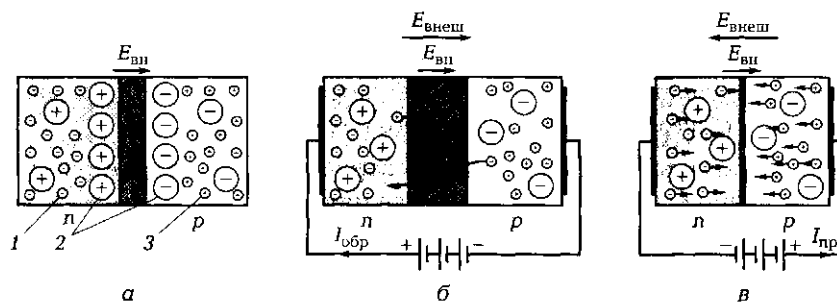


Рис. 6.5. Схемы  $n-p$ -перехода:

$a$  — при отсутствии внешнего электрического поля;  $b, v$  — соответственно при одинаковом и встречном направлении векторов напряженности внутреннего и внешнего электрических полей; 1 — свободные электроны; 2 — положительные и отрицательные ионы; 3 — свободные дырки

которых обусловлено присутствием примесей в полупроводниках. Неосновные носители создадут незначительный обратный ток  $I_{обр}$ .

Если же внешнее поле приложить к переходу так, чтобы векторы напряженности внутреннего и внешнего полей были направлены встречно и при этом выполнялось неравенство  $E_{внеш} > E_{вн}$ , ширина запирающего слоя уменьшится и через  $n-p$ -переход будет проходить значительный прямой ток  $I_{пр}$  (рис. 6.5,  $v$ ).

Из вольт-амперной характеристики  $n-p$ -перехода (см. далее рис. 6.7,  $a$ ) следует, что  $n-p$ -переход обладает свойством односторонней проводимости (вентильным свойством), т. е. хорошо проводит ток в прямом направлении и практически не проводит в обратном.

### 6.1.6. Диоды

На основе одного  $n-p$ -перехода построены различные по технологии изготовления и назначению диоды (рис. 6.6) — высокочастотные, силовые, опорные, фотодиоды, светодиоды.

☛ **Высокочастотные диоды** имеют кристаллодержатель, на котором крепится кристалл германия или кремния. С кристаллом соприкасается вольфрамовая проволока, образующая на границе  $n-p$ -переход (вольфрам трехвалентен).

Высокочастотные диоды являются точечными диодами. Они обладают незначительной площадью перехода, а значит, и небольшой его емкостью, поэтому используются при частотах до 100 МГц. Промышленность выпускает высокочастотные диоды на выпрямленный ток от 10 до 100 мА и обратное напряжение (при котором происходит пробой диода) от 10 до 100 В.

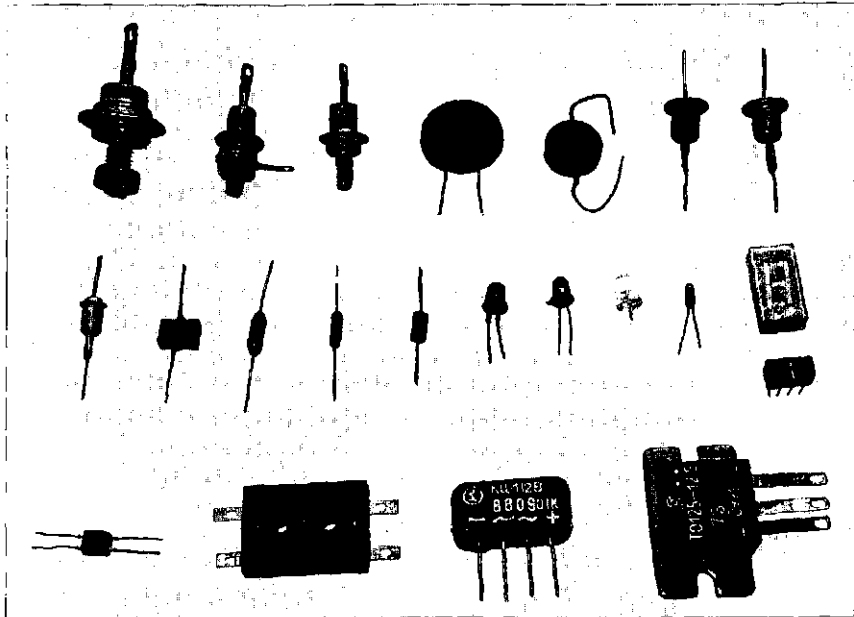


Рис. 6.6. Внешний вид некоторых типов диодов

➤ *Силовые выпрямительные диоды* изготавливаются в виде сплавной конструкции, имеющей значительную площадь  $n-p$ -перехода.

На пластину германия или кремния накладывают пластину индия, после чего обе пластины нагревают в вакууме. Индий плавляется в германий, образуя  $n-p$ -переход. Полученный кристалл помещают в корпус с двумя электродами.

Силовые диоды работают в основном на звуковых частотах, так как обладают значительной емкостью  $n-p$ -перехода. Вольт-амперная характеристика этих диодов показана на рис. 6.7, а. Промышленность выпускает силовые диоды с самыми различными параметрами, например:

диоды Д226 на выпрямленный ток до 0,3 А и обратное напряжение до 400 В;

диоды Д302—Д305 на выпрямленный ток до 10 А и обратное напряжение до 50 В;

диоды Д1004—Д1008 на выпрямленный ток 100 мА и обратное напряжение до 10 000 В;

диоды ВКВ-1000 — мощные германиевые с воздушным охлаждением, работающие при токах до 1 000 А.

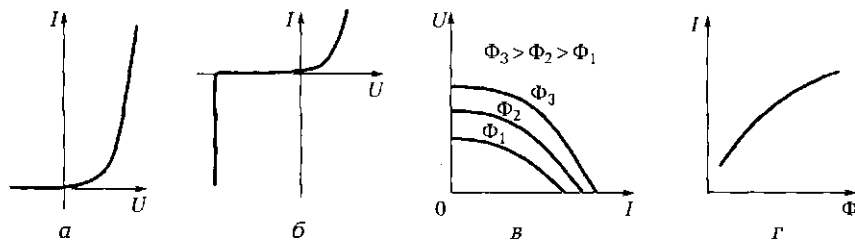


Рис. 6.7. Характеристики:

а — ВАХ силового диода; б — ВАХ стабилитрона; в — ВАХ фотодиода; г — генераторного режима работы фотодиода

Для силовых диодов характерно наличие допустимого обратного напряжения, превышение которого ведет к тепловому нагреву  $n-p$ -перехода и его разрушению (*тепловому пробоя*).

Условное графическое изображение диода —

Для *опорных диодов (стабилитронов)*, обладающих прямой ВАХ, аналогичной ВАХ силовых диодов, при обратном напряжении характерно наличие *лавинообразного пробоя*, поскольку в них примесей в 15—20 раз больше, чем у обычного диода. Это вызывает лавинообразный процесс ионизации атомов и высвобождения электронов, способных идти через  $n-p$ -переход. Обратный ток в данном случае также растет лавинообразно, и даже незначительные изменения напряжения приводят к значительному изменению тока (рис. 6.7, б).

Лавинообразный пробой — явление обратимое, после снятия внешнего поля характеристики диода восстанавливаются.

Промышленность выпускает стабилитроны с напряжением стабилизации от 2 (КС133, КС156) до 200 В (КС650, КС680), с током стабилизации от 20 мА до 1,5 А и мощностью рассеяния до 50 Вт.

Кремниевые опорные диоды нашли широкое применение в схемах стабилизаторов напряжения радиоэлектронной аппаратуры.


Условное графическое изображение стабилитрона —


Фотодиоды — это приборы, проводимость  $n-p$ -перехода которых зависит от его освещенности.


Вольт-амперные характеристики фотодиода при различных световых потоках  $\Phi$ , измеряемых в люменах, показаны на рис. 6.7, в.

При отсутствии внешнего источника питания фотодиоды под действием света способны вырабатывать фототок, совпадающий по направлению с обратным током диода и в определенной области


пропорциональный световому потоку  $\Phi$  (рис. 6.7, г). Такой режим работы фотодиода, называемый генераторным, широко используется для преобразования световой энергии в электрическую в солнечных батареях (например, в солнечных крышах, на космических кораблях, в калькуляторах).

Условное графическое изображение фотодиода — .

 Светодиод — прибор на основе  $n-p$ -перехода, способный под действием электрического сигнала излучать световые кванты характерной длины волны (красный, зеленый, голубой). В отличие от ламп накаливания и других источников света светодиоды безынерционны. Основное применение они нашли в схемах индикации (своящиеся буквы, цифры), устройствах освещения. Условное графическое изображение

светодиода — .

### 6.1.7. Полевые транзисторы

 Полевые (униполярные) транзисторы — приборы с одним  $n-p$ -переходом, способные усиливать электрические сигналы.

Свое название они получили потому, что, во-первых, управляются полем, а не током, как биполярные транзисторы (см. подразд. 6.1.8), во-вторых, используют лишь один тип основных носителей: либо электроны, либо дырки.

Конструктивно полевой транзистор представляет собой кристалл с  $n$ - или  $p$ -проводимостью, окруженный со всех сторон полупроводником соответственно с  $p$ - или  $n$ -проводимостью (рис. 6.8, а).

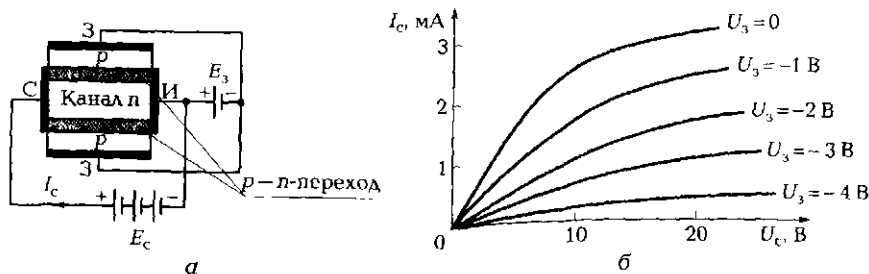


Рис. 6.8. Конструктивная схема (а) и вольт-амперные характеристики (б) полевого транзистора

К торцам кристалла с  $n$ -проводимостью подсоединены электроды, называемые истоком (И) и стоком (С). От  $p$ -области выведен электрод, называемый затвором (З).

Если между затвором и истоком включить батарею  $E_z$ , так, как показано на рис. 6.8, а, то, изменяя ее ЭДС, можно управлять шириной зоны  $n$ — $p$ -перехода, а значит, площадью сечения канала  $n$  и его сопротивлением.

Чем больше напряженность электрического поля, приложенного в непроводящем направлении, тем шире зона  $n$ — $p$ -перехода и тем меньше площадь сечения  $S$  канала  $n$  и больше его сопротивление ( $R = \rho l/S$ ).

Если между электродами сток—исток включить батарею  $E_c$ , то потечет ток  $I_c$ , определяемый как ЭДС батареи  $E_c$ , так и сопротивлением канала  $n$ . Поскольку  $n$ — $p$ -переход смещен в обратном направлении и ток затвора ничтожно мал, входное сопротивление полевого транзистора достигает  $10^6$  Ом. Рабочие частоты доходят до 150 МГц.

Вольт-амперные характеристики полевого транзистора показаны на рис. 6.8, б. Это управляемые ВАХ с усилительными свойствами, что позволяет использовать полевые транзисторы в схемах усилителей.

Разработка полевых транзисторов с изолированным затвором — МОП-транзисторов (металл—оксид—полупроводник) — позволила увеличить входное сопротивление до  $10^{15}$  Ом, а рабочие частоты — до 1 000 МГц. Изменение сопротивления сток—исток осуществляется в таких транзисторах за счет изменения удельного электрического сопротивления  $\rho$  полупроводника. Коэффициент усиления по напряжению может достигать 100.

Условные графические изображения полевых транзисторов показаны на рис. 6.9, а; схема усилителя на полевом транзисторе показана на рис. 6.9, б.

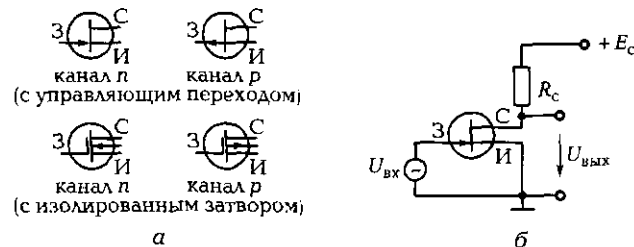


Рис. 6.9. Условные графические изображения полевого транзистора (а) и схема усилителя на нем (б)

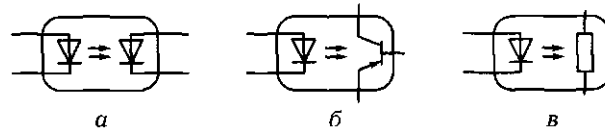


Рис. 6.10. Схемы оптронов:  
 а — с фотодиодом; б — с фототранзистором; в — с фоторезистором

- Основные достоинства полевых транзисторов:
  - высокое входное сопротивление;
  - высокие частотные свойства (работают при частотах до 1 000 МГц).
- Оптроны — это полупроводниковые приборы, содержащие в одном корпусе источник излучения (светодиод) и приемник излучения (фотодиод, фототранзистор, фоторезистор) (рис. 6.10).

Конструктивно эти элементы располагаются таким образом, чтобы обеспечивались хорошая связь между ними по световому потоку и максимальная гальваническая развязка. Оптроны имеют переходное сопротивление до  $10^{11}$  Ом, поэтому основное применение находят в схемах, где необходимо электрически развязать отдельные элементы. Эти приборы могут использоваться как в линейных, так и в дискретных (релейных) схемах.

### 6.1.8. Биполярные транзисторы

- Биполярные транзисторы — это приборы с двумя  $n-p$ -переходами, предназначенные для усиления электрических сигналов. Они бывают  $p-n-p$ - или  $n-p-n$ -типа (рис. 6.11). Изготавливают их путем сплавления с двух сторон в кристалл германия с  $n$ -проводимостью (или кремния с  $p$ -проводимостью) кусочков индия с  $p$ -проводимостью (или сурьмы с  $n$ -проводимостью).

Биполярный транзистор имеет три электрода: эмиттер, коллектор, база.

Свое название он получил из-за того, что в нем присутствуют одновременно два типа носителей (электроны и дырки) и строится он на базе двух  $n-p$ -переходов.

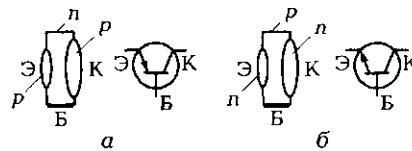


Рис. 6.11. Конструктивные схемы и условные графические изображения биполярных транзисторов:  
 а —  $p-n-p$ -типа; б —  $n-p-n$ -типа

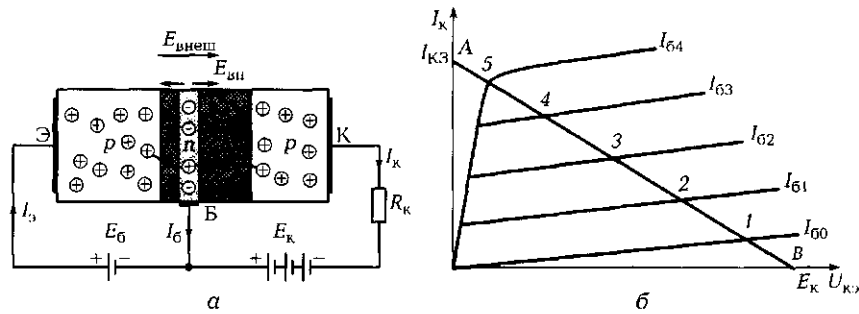


Рис. 6.12. Биполяный транзистор:

а — схема, поясняющая принцип работы  $p-n-p$ -транзистора; б — ВАХ транзистора в схеме с общим эмиттером

Процессы, проходящие в транзисторах обоих типов, аналогичны, поэтому ограничимся рассмотрением работы  $p-n-p$ -транзистора (рис. 6.12, а).

Пусть на один из  $n-p$ -переходов (Б—К) подается напряжение батареи  $E_k$  так, что переход оказывается смещенным в обратном направлении (направления векторов напряженности  $E_{вн}$  и  $E_{внеш}$  совпадают). В этом случае через нагрузку в коллекторной цепи течет ток неосновных носителей  $I_{к0}$  (в базе это дырки), равный нескольким микроамперам. Если ко второму  $n-p$ -переходу (Э—Б) подключить батарею  $E_б$  так, чтобы переход был смещен в прямом направлении ( $E_{вн}$  направлен встречно  $E_{внеш}$ ), то дырки эмиттера устремятся к базе и далее под действием внешнего поля второго  $n-p$ -перехода будут переходить в коллектор. В силу закона электрической нейтральности заряды дырок, прошедших от эмиттера к коллектору, будут компенсироваться свободными электронами, поступающими в коллектор из внешней цепи (от батареи  $E_k$ ) и создающими ток коллектора  $I_k$ . Электроны, являющиеся основными носителями в области базы, под действием ЭДС батареи  $E_б$  создадут ток базы  $I_б$ .

Возможны три схемы включения транзистора (рис. 6.13): с общей базой, с общим эмиттером и общим коллектором. В них вход-

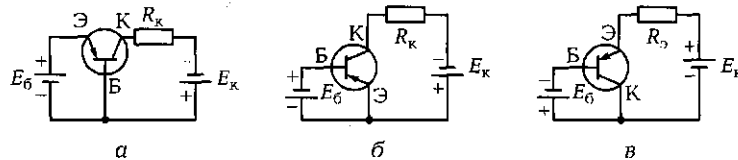


Рис. 6.13. Схемы включения транзистора:

а — с общей базой; б — с общим эмиттером; в — с общим коллектором

ное и выходное напряжения измеряются относительно одного электрода: базы, эмиттера или коллектора.

В усилителях напряжения наиболее распространена схема с общим эмиттером.

Вольт-амперная характеристика транзистора с общим эмиттером представляет собой зависимость тока коллектора от напряжения перехода коллектор—эмиттер при постоянном токе базы (рис. 6.12, б). При разных токах базы получаем семейство нелинейных управляемых характеристик, называемых *выходными характеристиками транзистора*. На выходных характеристиках транзистора можно построить так называемую опрокинутую ВАХ резистора  $R_k$ , т. е. линию нагрузки АВ. Строится она по точке холостого хода В ( $U = E_k, I_k = 0$ ) и точке короткого замыкания А ( $I_k = I_{k3} = E_k/R_k, U = 0$ ). Такое построение упрощает анализ работы усилителя, так как по точкам пересечения ВАХ транзистора и опрокинутой ВАХ резистора (точкам 1—5) можно определить ток коллектора и выходное напряжение при заданном токе базы.

☛ В зависимости от величины входного сигнала различают следующие режимы:

1. Усилительный режим работы (активный), когда рабочая точка перемещается между точками 1 и 5 на линии нагрузки, — линейный режим работы усилителя. В данном режиме работают усилители гармонических колебаний. При этом синусоидальному напряжению на входе усилителя соответствует синусоидальное напряжение на выходе;

2. Режим отсечки, соответствующий току базы  $I_b < 0$  (ниже точки 1). Происходит закрытие транзистора и снижение тока коллектора до  $I_{k0} = 0$ . Сопротивление транзистора  $R_{k3}$  велико, поэтому напряжение  $U_k$  стремится к ЭДС  $E_k$ , а мощность на транзисторе  $P_k = U_k I_{k0}$  стремится к нулю;

3. Режим насыщения, соответствующий максимальному току базы  $I_{b\max}$  (выше точки 5). При этом ток  $I_k$  становится  $I_{k\max}$  и не изменяется при дальнейшем увеличении тока базы. Выходное сопротивление транзистора  $R_{k3}$  мало (стремится к нулю), напряжение  $U_k = I_k R_{k3}$  стремится к нулю. Мощность  $P_k = U_k I_k$ , рассеиваемая на переходе коллектор—эмиттер, также стремится к нулю.

☛ Переход транзистора из режима отсечки в режим насыщения и обратно происходит практически мгновенно, что позволяет в подобном ключевом режиме переключать цепи, в которых циркулируют значительные мощности, без опасения вывести из строя транзистор.



Таблица 6.1

Мощность	Частота		
	низкая	средняя	высокая
Малая	101 — 199	201 — 299	301 — 399
Средняя	401 — 499	501 — 599	601 — 699
Большая	701 — 799	801 — 899	901 — 999

Режимы отсечки и насыщения нашли применение в логических устройствах автоматики и в усилителях мощности, в том числе работающих в ключевом режиме.

Широкое применение нашла также схема включения транзистора с общим коллектором. При такой схеме транзистор называют *эмиттерным повторителем*, так как коэффициент усиления по напряжению у него близок к единице и напряжение на нагрузке практически равно напряжению на базе транзистора. При этом фаза выходного сигнала равна фазе входного.

Выходное сопротивление эмиттерного повторителя мало, а входное достаточно велико, что позволяет использовать такую схему для согласования выхода усилителя с низкоомной нагрузкой.

В паспортных данных транзистора указываются предельно-допустимые параметры:

максимальный ток коллектора  $I_{k\max}$ ;

максимальное напряжение перехода коллектор — эмиттер  $U_{кэ}$ ;

максимальная мощность, рассеиваемая коллектором,  $P_k$ ;

предельная частота усиления  $f_{\max}$ .

Промышленность выпускает транзисторы двух исполнений: германиевые и кремниевые.

Условные обозначения полупроводниковых приборов состоят из ряда букв и цифр:

Первая буква (или цифра) указывает на материал полупроводника: Г или 1 — германий; К или 2 — кремний.

Вторая буква — тип прибора: Д — диод; С — стабилитрон, Ф — фотоприбор; У — управляемый вентиль, Т — транзистор биполярный, П — полевой транзистор.

Третий элемент (трехзначное число) характеризует мощность и частоту прибора (табл. 6.1).

Четвертый элемент (буквенный) означает модификацию. Например, ГТ108А — германиевый маломощный низкочастотный биполярный транзистор модификации А.

### 6.1.9. Тиристоры

На основе трех и более  $n-p$ -переходов строятся *тиристоры* — полупроводниковые приборы, обладающие вентильным свойством и управляемой ВАХ.

Напряжение источника  $E_a$  подводят к выходным электродам тиристора (аноду А и катоду К) таким образом, чтобы крайние переходы (П1, П3) были смещены в прямом направлении (открыты), а средний переход П2 — в обратном (закрит) (рис. 6.14, а). Если  $E_y = 0$ , то повышение напряжения между анодом и катодом до определенного значения  $U_{np}$  ведет к незначительному увеличению тока  $I_a$ . При  $E_a = U_{np}$  начинается лавинообразный пробой перехода П2 (как в стабилитроне) и переход П2 открывается. Ток  $I_a$  резко возрастает, а напряжение на тиристоре падает до 0,5 ... 1,0 В.

Этот пробой не вызывает разрушения перехода, т. е. является обратимым. Подводя напряжение  $E_y$  через управляющий электрод (УЭ) к переходу П2, можно управлять с помощью тока  $I_y$  величиной  $U_{np}$  (рис. 6.14, б).

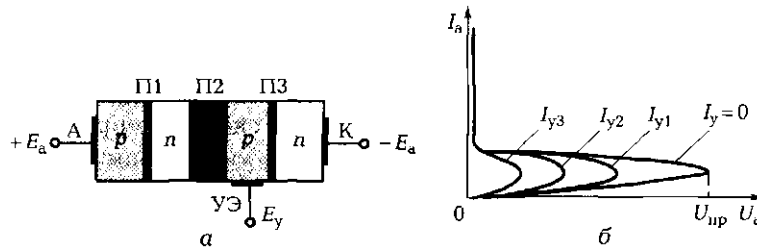
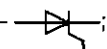



Рис. 6.14. Схема, поясняющая принцип работы тиристора (а), и его вольт-амперная характеристика (б)

Условные графические изображения тиристора:

с управлением по катоду — ;

с управлением по аноду — .

Промышленность выпускает тиристоры на токи до 2 000 А и рабочее напряжение до 4 000 В.

Выпрямители (см. далее подразд. 6.2), построенные на тиристорах, позволяют плавно изменять выпрямленное напряжение на нагрузке путем изменения напряжения, подводимого к управляющему электроду. Такие выпрямители используют для управления мощными двигателями постоянного тока.

### 6.1.10. Интегральные микросхемы

Увеличение сложности устройств промышленной электроники, т. е. числа входящих в их состав пассивных и активных элементов, ведет к увеличению габаритных размеров и стоимости устройства, а также потребляемой ими энергии.

Такая ситуация обусловила появление функционально сложных элементов, построенных на основе элементной интеграции.

☛ **Элементная интеграция** — это объединение в одном сложном миниатюрном элементе многих простых элементов (резисторов, конденсаторов, диодов, транзисторов), выполненных по определенной технологии и соединенных между собой тонкими проводниками.

Полученный таким образом элемент называется *интегральной микросхемой* (ИМС). Она представляет собой законченную электрическую схему, способную выполнять определенные функции. Микросхемы используются при создании сложных электронных приборов, таких как усилители, коммутаторы, счетчики, запоминающие устройства, аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, микропроцессоры.

☛ **Малые габаритные размеры микросхем и использование в них полевых транзисторов** существенно снижают потребляемую ими мощность и повышают скорость обработки информации. Стандартная технология, унификация и автоматизация изготовления микросхем обеспечивают их высокую надежность и низкую стоимость.

По технологии изготовления интегральные микросхемы подразделяются на гибридные и полупроводниковые.

*Гибридные* микросхемы состоят из пленок, наносимых на подложку из диэлектрического материала, и навесных бескорпусных элементов: транзисторов, диодов. В качестве резисторов используются тонкие пленки никрома, а в качестве диэлектрика в конденсаторах — пленки керамики титаната бария. Проводники для соединения элементов между собой и подключения к выводным концам выполняют в виде тонкой пленки золота, меди или алюминия. Навесные элементы — диоды, транзисторы — присоединяют к пленочной микросхеме пайкой или сваркой. Собранный гибридную микросхему помещают в металлический или пластмассовый корпус.

В *полупроводниковых* интегральных микросхемах используются отдельные области кристалла. Каждая из этих областей выполня-

ет функцию транзистора, диода, резистора или конденсатора. Все элементы полупроводниковых микросхем получают в ходе единого технологического процесса в кристалле полупроводника. Такой процесс базируется на травлении исходного поликристаллического кремния с применением защитных масок, последующем окислении и напылении соответствующих полупроводниковых материалов с различной проводимостью.

Микросхемы обоих типов обладают весьма высокой надежностью. Даже в предельно нагруженных режимах среднее время их безотказной работы по расчетам должно достигать  $10^6$  ч (более 100 лет непрерывной работы).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Какую функцию выполняют резисторы и конденсаторы в устройствах промышленной электроники:
  - а) обеспечение заданных режимов работы электронных устройств;
  - б) обеспечение нагрева отдельных узлов;
  - в) обеспечение связи между каскадами электронных схем;
  - г) обеспечение запасов электрической энергии?
2. Какие основные характеристики резистора указываются в спецификации:
  - а) рабочий ток;
  - б) мощность рассеяния и класс точности;
  - в) тип и номинальное сопротивление;
  - г) рабочее напряжение?
3. Какие основные характеристики конденсатора указываются в спецификации:
  - а) тип и рабочее напряжение;
  - б) номинальная емкость и класс точности;
  - в) рассеиваемая мощность и номинальное сопротивление;
  - г) номинальный ток и условия эксплуатации?
4. Какие два основных материала используются в полупроводниковой технике:
  - а) индий;
  - б) германий;
  - в) сурьма;
  - г) кремний?
5. Укажите основное свойство  $n-p$ -перехода:
  - а) вентильное;
  - б) двусторонней проводимости;

- в) переходное;  
 г) односторонней проводимости.
6. Укажите основные приборы, построенные на основе одного или нескольких  $p-n$ -переходов:
- а) диоды и полевые транзисторы;  
 б) термо- и фоторезисторы;  
 в) тиристоры и биполярные транзисторы;  
 г) варисторы и термисторы.










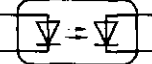

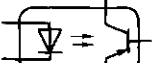

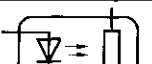








			
			
			
			
			
			
			
			
			
			
			


Рис. 6.15. Условные графические изображения полупроводниковых элементов (к тесту 9 подразд. 6.1)

7. Укажите основные режимы работы транзистора:
- разделительный;
  - усилительный;
  - ключевой;
  - объединительный.
8. Укажите существующие виды интегральных микросхем:
- гибридные;
  - интегральные;
  - полупроводниковые;
  - дифференциальные.
9. На рис: 6.15 рядом с условным графическим изображением каждого элемента поставьте соответствующее ему число исходя из приведенного списка:
- |  |   |
|--|---|
| 1 — конденсатор;   | 12 — светодиод;                             |
| 2 — варистор;  | 13 — биполярный                             |
| 3 — полевой транзистор с <i>n</i> -каналом;                | <i>p</i> — <i>n</i> — <i>p</i> -транзистор; |
| 4 — фоторезистор;  | 14 — оптрон «светодиод — фоторезистор»;     |
| 5 — резистор;  | 15 — дроссель;                              |
| 6 — тиристор с управлением по аноду;                       | 16 — диод;                                  |
| 7 — биполярный <i>n</i> — <i>p</i> — <i>n</i> -транзистор; | 17 — стабилитрон;                           |
| 8 — фотодиод;  | 18 — конденсатор переменной емкости;        |
| 9 — тиристор с управлением по катоду;                      | 19 — оптрон «светодиод — фототранзистор»;   |
| 10 — полевой транзистор с <i>p</i> -каналом;               | 20 — резистор переменного сопротивления;    |
| 11 — оптрон «светодиод — фотодиод»;                        | 21 — терморезистор;                         |
|  | 22 — дроссель с ферромагнитным сердечником. |

## 6.2. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

### ТЕОРИЯ

#### 6.2.1. Состав и назначение элементов выпрямительного устройства

-  Выпрямительные устройства предназначены для преобразования переменного тока в ток одного направления.

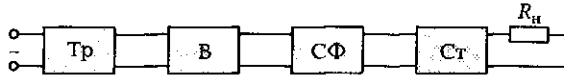


Рис. 6.16. Структурная схема выпрямительного устройства:  
Тр — трансформатор; В — вентиль; СФ — сглаживающий фильтр; Ст — стабилизатор

В общем случае выпрямительное устройство включает в себя силовой трансформатор, вентиль, сглаживающий фильтр и стабилизатор (рис. 6.16).

Существуют два основных типа выпрямителей: однополупериодный и двухполупериодный.

В зависимости от числа фаз питающей сети выпрямители подразделяют на однофазные и трехфазные.

Выпрямители могут быть управляемыми и неуправляемыми. В управляемых выпрямителях значение выпрямленного напряжения может регулироваться. Для питания большинства электронных устройств используются более простые неуправляемые выпрямители.

*Трансформатор* предназначен для преобразования переменного напряжения, например 220 В, в переменное напряжение такого значения, которое обеспечивает необходимое постоянное напряжение на выходе выпрямителя, например 20 В. *Вентиль* преобразует переменное напряжение в пульсирующее, *сглаживающий фильтр* уменьшает пульсации выпрямленного напряжения, *стабилизатор* поддерживает неизменным напряжение на нагрузке.

Основными элементами выпрямителя являются вентили — нелинейные элементы, проводимость которых зависит от полярности

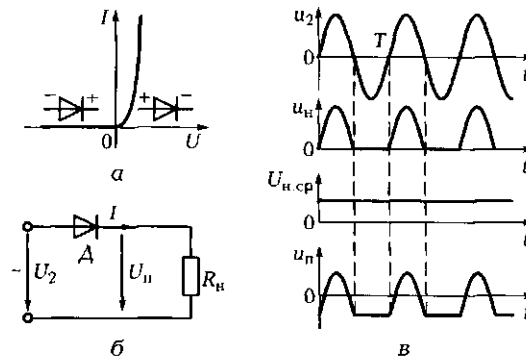


Рис. 6.17. Однополупериодный выпрямитель:  
а — ВАХ диода; б — схема выпрямителя; в — временные диаграммы напряжений

приложенного напряжения. Как правило, в качестве вентилях используются полупроводниковые диоды. Вольт-амперная характеристика диода показана на рис. 6.17, а.

Основными параметрами выпрямителей являются:

$U_{н.ср}$  — среднее выпрямленное напряжение на нагрузке;

$I_{н.ср}$  — средний выпрямленный ток в нагрузке;

$p = U_{осн\max}/U_{н.ср}$  — коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения (здесь  $U_{осн\max}$  — амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения);

$f_{п}$  — частота основной гармоники выпрямленного напряжения (напряжения пульсации).

### 6.2.2. Однополупериодный однофазный выпрямитель

Схема однополупериодного выпрямителя показана на рис. 6.17, б.

Переменное напряжение с вторичной обмотки трансформатора  $u_2$  подается на цепь из последовательно соединенных диода  $D$  и нагрузочного резистора  $R_n$ . При положительном полупериоде напряжения диод открыт и через нагрузку течет ток. При отрицательном полупериоде диод закрыт и ток в нагрузке отсутствует.

Выпрямленное напряжение  $u_n$  можно представить в виде суммы постоянной  $U_{н.ср}$  и переменной  $u_{п}$  составляющих (рис. 6.17, в).

Среднее выпрямленное напряжение на нагрузке  $U_{н.ср} = 0,45U_2$ .

Амплитуда основной гармоники  $U_{осн\max} = 0,7U_2$ .

Коэффициент пульсаций  $p = U_{осн\max}/U_{н.ср} = 1,57$ .

Частота пульсаций  $f_{п} = f$ .

Как правило, однополупериодные выпрямители применяются для питания нагрузки малой мощности.

### 6.2.3. Двухполупериодные однофазные выпрямители

Среди двухполупериодных однофазных выпрямителей наиболее широкое применение находят выпрямитель на базе трансформатора со средней точкой и мостовой выпрямитель.

**Выпрямитель на базе трансформатора со средней точкой.** Схема такого выпрямителя представляет собой две схемы однополупе-



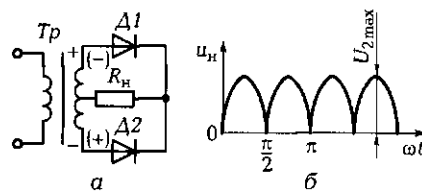


Рис. 6.18. Двухполупериодный выпрямитель на базе трансформатора со средней точкой:

а — схема выпрямителя; б — временная диаграмма напряжения на нагрузке

риодного выпрямителя, построенные на диодах  $D1$  и  $D2$  и работающие на общую нагрузку  $R_n$  (рис. 6.18, а).

В положительный полупериод ток в нагрузку поступает через диод  $D1$ , а в отрицательный — через диод  $D2$ . В итоге за период к нагрузке подводятся две полуволны напряжения (рис. 6.18, б).

Недостатком выпрямителя являются сложная конструкция трансформатора и его неэкономичность. Этому недостатка лишен мостовой выпрямитель.

**Мостовой выпрямитель.** Выпрямитель состоит из четырех диодов, включенных по мостовой схеме (рис. 6.19, а). Изменения напряжения  $U_2$  питающей сети, токов диодов, напряжения на нагрузке показаны на рис. 6.19, б.

☛ При положительном полупериоде напряжения в мостовой схеме диоды  $D2$  и  $D4$  открыты и пропускают ток в нагрузку. Диоды  $D1$  и  $D3$  в этот момент закрыты. При отрицательном полупериоде напряжения диоды  $D2$  и  $D4$  закрываются, но открываются диоды  $D1$  и  $D3$  и пропускают ток в нагрузку в том же направлении.

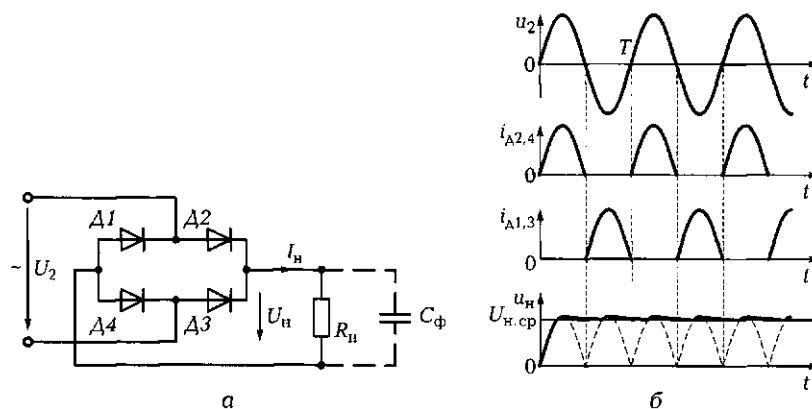


Рис. 6.19. Двухполупериодный мостовой выпрямитель:

а — схема выпрямителя; б — временные диаграммы напряжений и токов

По сравнению с однополупериодным выпрямителем однофазный двухполупериодный выпрямителем обеспечивает большее среднее напряжение на нагрузке, меньшую амплитуду пульсаций и большую их частоту, что облегчает задачу подавления пульсаций сглаживающими фильтрами.

Среднее выпрямленное напряжение на нагрузке  $U_{н.ср} = 0,9U_2$ .

Амплитуда основной гармоники  $U_{осн\ max} = 4U_{2\ max}/(3\pi) = 0,6U_2$ .

Коэффициент пульсации  $p = U_{осн\ max}/U_{н.ср} = 2/3 = 0,67$ .

Частота пульсаций  $f_{п} = 2f$ .

### 6.2.4. Схемы трехфазных выпрямителей

Для выпрямления трехфазного напряжения широко применяются трехфазные выпрямители. Простейшая схема однополупериодного выпрямителя показана на рис. 6.20, а. Это схема с нейтральной точкой. Фазы вторичной обмотки трансформатора соединены звездой. В каждую фазу последовательно с обмоткой включен диод. Катоды диодов соединены вместе. Между общей точкой катодов и нейтральной точкой включается нагрузка  $R_n$ .

Токи через диоды текут лишь в те моменты времени, когда потенциал анода выше потенциала нейтральной точки. Результирующий ток через нагрузку является суммой всех трех токов. Его изменение отражает огибающая на рис. 6.20, б.

Среднее выпрямленное напряжение на нагрузке  $U_{н.ср} = 1,17U_{2ф}$ .

Амплитуда основной гармоники  $U_{осн\ max} = 0,29U_{2ф}$ .

Коэффициент пульсаций  $p = 0,25$ .

Частота пульсаций  $f_{п} = 3f$ .

Другая схема трехфазного выпрямителя известна как схема Ларионова. Она представляет собой три мостовые схемы, работающие на единую нагрузку (рис. 6.21, а).

В трехфазном двухполупериодном выпрямителе диоды каждой фазы пропускают ток в нагрузку в обе пополюсы питающего на-

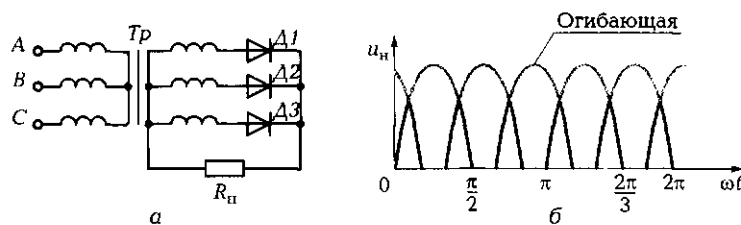


Рис. 6.20. Трехфазный однополупериодный выпрямитель:

а — схема выпрямителя; б — временная диаграмма напряжения на нагрузке

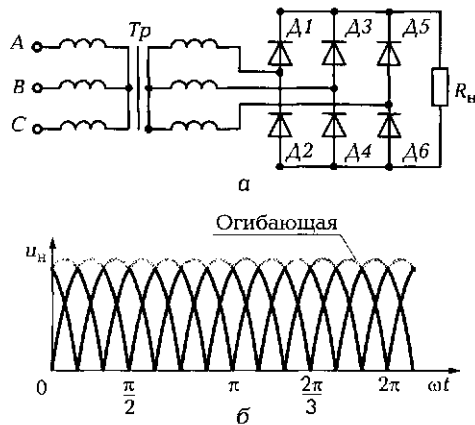


Рис. 6.21. Трехфазный двухполупериодный выпрямитель: а – схема выпрямителя; б – временная диаграмма напряжения на нагрузке

пряжения. Это позволяет существенно снизить пульсации выпрямленного напряжения (см. огибающую на рис. 6.21, б).

Среднее выпрямленное напряжение на нагрузке  $U_{н,ср} = 2,34U_{2ф}$ .

Амплитуда основной гармоники  $U_{осн,макс} = 0,13U_{2ф}$ .

Коэффициент пульсаций  $p = 0,057$ .

Частота пульсаций  $f_{п} = 6f$ .

В табл. 6.2 представлены основные параметры рассмотренных схем выпрямителей. Значения показаны по отношению к напряжению на входе выпрямителя  $U_2$  и частоте питающего напряжения  $f$ .

В мощных трехфазных выпрямителях, собранных по мостовой схеме, широкое применение нашли управляемые вентили — тиристоры. Такие выпрямители называют управляемыми. Регулируя моменты открытия тиристоров, можно сравнительно легко и экономично регулировать среднее значение выпрямленного напряжения.

Таблица 6.2				
Выпрямитель	$U_{н,ср}/U_2$	$U_{осн,макс}/U_2$	$p$	$f_{п}/f$
Однофазный однополупериодный	0,45	0,7	1,57	1
Однофазный двухполупериодный	0,9	0,6	0,67	2
Трехфазный однополупериодный	1,17	0,29	0,25	3
Трехфазный двухполупериодный	2,34	0,13	0,057	6

### 6.2.5. Сглаживающие фильтры

Для подавления переменной составляющей выпрямленного напряжения между вентилем и нагрузкой устанавливают сглаживающие фильтры.

Основным параметром сглаживающего фильтра является коэффициент сглаживания  $S_{\phi}$ . Он определяется отношением коэффициентов пульсаций на его входе и выходе:

$$S_{\phi} = \frac{P_{вх}}{P_{вых}}$$

В одних устройствах сглаживающие фильтры не нужны вообще (например, в выпрямителях для питания электрических двигателей постоянного тока, поскольку ротор двигателя не в состоянии реагировать на высокочастотные пульсации в силу значительного момента инерции), тогда как в других коэффициент пульсаций на выходе блока питания не должен превышать  $10^{-6}$  (устройство питания привода электронного микроскопа), что требует установки фильтров с очень высоким коэффициентом сглаживания.

Простейшими сглаживающими фильтрами являются индуктивный и емкостный.

*Индуктивный фильтр* (рис. 6.22, а) представляет собой дроссель, который включается последовательно с нагрузкой.

Значительное индуктивное сопротивление  $X_L = 2\pi f_n L$  существенно снижает переменную составляющую напряжения, практически

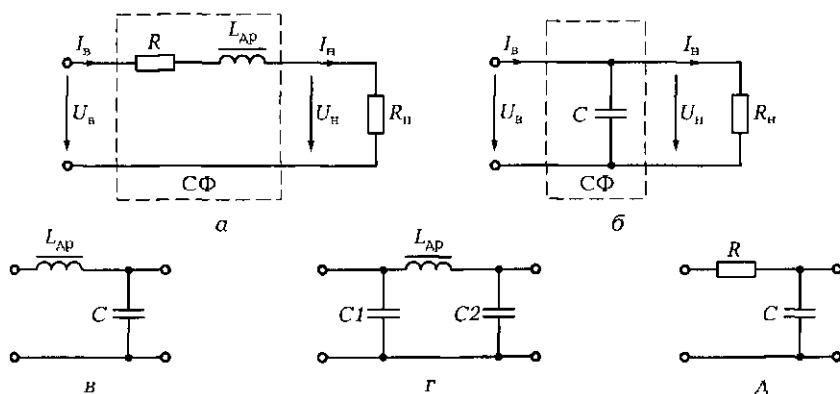


Рис. 6.22. Схемы фильтров:

а — индуктивный; б — емкостный; в — Г-образный LC-фильтр; г — П-образный LC-фильтр; д — Г-образный RC-фильтр

не изменяя постоянной, так как активное сопротивление  $R$  дросселя невелико.

С достаточной точностью можно принять  $S_{\phi} = 2\pi f_n L / R_n$ .

Индуктивные фильтры применяются обычно в мощных низкочастотных цепях.

*Емкостный фильтр* (рис. 6.22, б) представляет собой конденсатор, включенный параллельно нагрузке. При значительной емкости сопротивление для переменной составляющей выпрямленного тока мало ( $X_C = 1/(2\pi f_n C) \ll R_n$ ) и она проходит через конденсатор, минуя нагрузку. В нагрузку поступает лишь постоянная составляющая выпрямленного тока.

Можно также понять принцип сглаживания пульсаций, приняв во внимание, что при возрастании напряжения на нагрузке диод открыт и в связи с его малым сопротивлением конденсатор заряжается практически мгновенно. При уменьшении напряжения диод закрывается и конденсатор разряжается сравнительно медленно через большее, чем у диода, сопротивление нагрузки.

С достаточной точностью для двухполупериодного выпрямителя с емкостным фильтром можно принять  $S_{\phi} = 1,34 f_n C R_n$ .

Основное применение емкостные фильтры нашли в маломощных высокоомных цепях.

Для обеспечения высококачественного сглаживания индуктивный и емкостный фильтры объединяют, получая Г-образный (рис. 6.22, в) или П-образный (рис. 6.22, г) LC-фильтры. Коэффициент сглаживания в этом случае равен произведению коэффициентов сглаживания звеньев фильтра.

В маломощных источниках применяют Г-образный RC-фильтр (рис. 6.22, д).

## 6.2.6. Инверторы

Наряду с выпрямительными устройствами широкое применение в технике нашли инверторы — устройства, преобразующие постоянный ток в переменный требуемой частоты. Они используются в системах передачи энергии постоянного тока для преобразования постоянного напряжения одной величины (например, низкой) в постоянное напряжение другой величины (например, высокой). Преобразование осуществляется за счет бесконтактных электронных ключей, в качестве которых используются транзисторы или тиристоры.

В электронной аппаратуре небольшой мощности обычно применяется транзисторная схема. На рис. 6.23, а показана схема инверто-

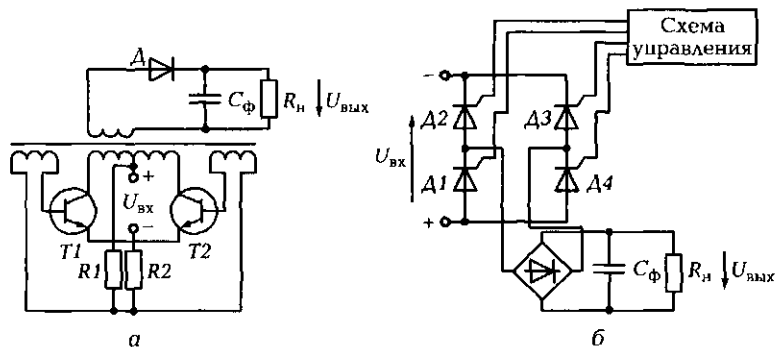


Рис. 6.23. Схемы инверторов:  
а — на транзисторах; б — на тиристорах

ра на транзисторах с положительной трансформаторной обратной связью. Последняя приводит к самовозбуждению инвертора и появлению на его выходе двухполярных прямоугольных импульсов. При этом транзисторы работают в ключевом режиме: если один из них открыт, то второй закрыт. Включенный в выходную обмотку трансформатора выпрямитель с фильтром обеспечивает на выходе инвертора постоянное напряжение  $U_{\text{вых}}$  другого значения, чем на входе.

В мощных схемах в качестве переключающих элементов используются тиристоры, включенные по мостовой схеме (рис. 6.23, б). Схема управления обеспечивает поочередное открытие соответствующих пар тиристоров (A1 — A3 или A2 — A4), тем самым преобразуя постоянное напряжение на одной диагонали моста в переменное напряжение на второй диагонали. Полученное переменное напряжение может быть вновь с помощью выпрямителя преобразовано в постоянное, но другой величины, определяемой углами открытия тиристоров.

### 6.2.7. Стабилизаторы постоянного напряжения

**Общие сведения.** Для целого ряда потребителей требуется довольно стабильное питающее напряжение. Например, для питания радиовещательных и связных радиостанций допускается нестабильность напряжения 2...3%, а для усилителей постоянного тока и некоторых измерительных приборов высокого класса точности — не более 0,001%.

Дестабилизирующими факторами являются изменение напряжения питающей сети, тока нагрузки, температуры окружающей среды и др. Для обеспечения заданной стабильности постоянного напряжения используются специальные устройства — стабилизаторы постоянного напряжения.

По принципу действия стабилизаторы подразделяют на параметрические и компенсационные.

☛ В *параметрических* стабилизаторах стабилизация напряжения обеспечивается за счет особой нелинейности вольт-амперной характеристики регулирующего элемента.

Наиболее широко в качестве таких нелинейных регулирующих элементов используются полупроводниковые стабилитроны.

☛ В *компенсационных* стабилизаторах стабилизация обеспечивается использованием отрицательной обратной связи по напряжению. Такие стабилизаторы представляют собой систему автоматического регулирования выходного напряжения.

При изменении входного напряжения  $U_{вх}$  или тока нагрузки  $I_{н}$  выходное напряжение стабилизатора  $U_{вых}$  практически не изменяется. Характер изменения  $U_{вых}$  при изменении  $U_{вх}$  показан на рис. 6.24, а, а при изменении  $I_{н}$  — на рис. 6.24, б.

Основным параметром, характеризующим качество стабилизации напряжения, является коэффициент стабилизации  $K_{ст}$ .

Коэффициент стабилизации по входному напряжению определяется отношением величин относительного изменения входного и выходного напряжений при  $I_{н} = \text{const}$ :

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх.ном}}{\Delta U_{вых} / U_{вых.ном}} = \frac{\delta U_{вх}}{\delta U_{вых}},$$

где  $\delta U_{вх}$ ,  $\delta U_{вых}$  — относительные изменения входного и выходного напряжений.

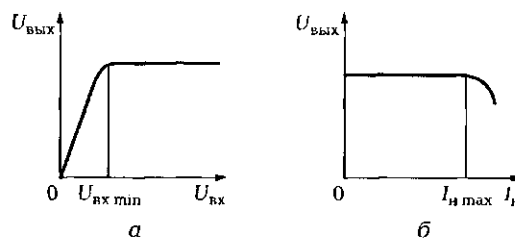
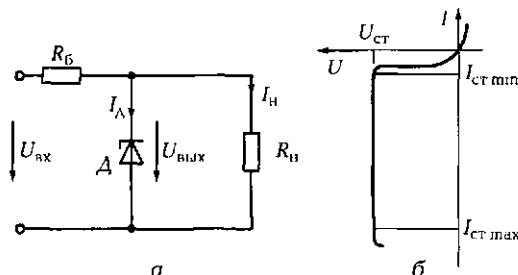


Рис. 6.24. Изменение напряжения на выходе стабилизатора:  
а — при изменении входного напряжения; б — при изменении тока нагрузки

Рис. 6.25. Схема (а) и вольт-амперная характеристика (б) параметрического стабилизатора



Коэффициент стабилизации по току определяется отношением величин относительного изменения тока нагрузки  $\delta I_H$  и выходного напряжения  $\delta U_{\text{ВЫХ}}$  при  $U_{\text{ВХ}} = \text{const}$ :

$$K_{\text{ст}2} = \frac{\Delta I_H / I_{\text{H.НОМ}}}{\Delta U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВЫХ.НОМ}}} = \frac{\delta I_H}{\delta U_{\text{ВЫХ}}}$$

**Параметрический стабилизатор.** Простейшая схема стабилизатора показана на рис. 6.25, а.

▶▶▶ Параметрический стабилизатор состоит из балластного резистора  $R_B$  и полупроводникового стабилитрона  $D$ . Выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  стабилизатора равно напряжению стабилизации  $U_{\text{СТ}}$  стабилитрона  $D$ .

Рабочим участком ВАХ стабилитрона является участок электрического пробоя на ее обратной ветви, где при изменении тока в широких пределах напряжение изменяется незначительно (рис. 6.25, б).

Важнейшими параметрами стабилитрона являются:

$U_{\text{СТ}}$  — напряжение стабилизации;

$I_{\text{СТ min}}$  — минимальный ток стабилитрона;

$I_{\text{СТ max}}$  — максимальный ток стабилитрона.

Для параметрических стабилизаторов значение  $K_{\text{СТ}}$  не превышает, как правило, нескольких десятков.

**Компенсационный стабилизатор.** Структурная схема стабилизатора показана на рис. 6.26, а.

▶▶▶ Компенсационный стабилизатор состоит из регулирующего элемента (РЭ), усилителя (У), сравнивающего устройства (СУ) и источника опорного (эталонного) напряжения  $U_{\text{оп}}$ .

Некоторые из этих элементов часто объединяют. Например, усилитель может одновременно выполнять функции сравнивающего устройства.

При работе стабилизатора его выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  сравнивается с опорным напряжением  $U_{\text{оп}}$ . При отклонении  $U_{\text{ВЫХ}}$  от задан-



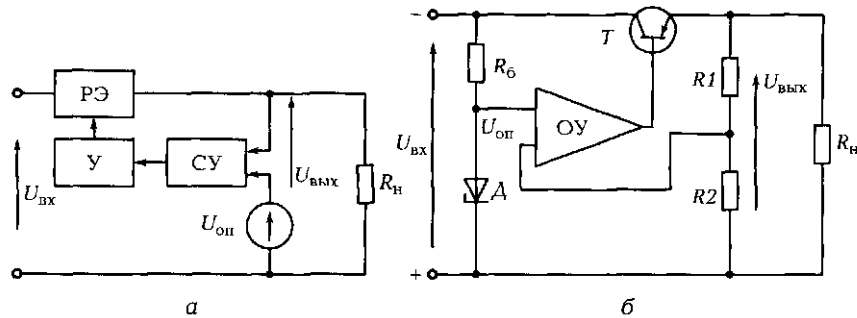


Рис. 6.26. Структурная (а) и электрическая (б) схемы компенсационного стабилизатора

ного уровня на выходе сравнивающего устройства появляется электрический сигнал разбаланса. Этот сигнал усиливается и поступает на вход регулирующего элемента, изменяя соответствующим образом его сопротивление. При увеличении входного напряжения сопротивление регулирующего элемента растет, а значит, растет и падение напряжения на нем, при уменьшении — падает. Процесс продолжается до тех пор, пока сигнал разбаланса не становится равен нулю. При этом выходное напряжение возвращается на заданный уровень.

Электрическая схема компенсационного стабилизатора показана на рис. 6.26, б. В качестве регулирующего элемента используется транзистор  $T$ , а в качестве сравнивающего устройства и усилителя — операционный усилитель (ОУ), на один вход которого поступает сигнал от источника опорного напряжения — параметрического стабилизатора ( $R_0 - A$ ), а на другой — часть выходного напряжения, снимаемого с делителя  $R1 - R2$ .

По сравнению с параметрическими стабилизаторами компенсационные обладают большим выходным сопротивлением и более высоким коэффициентом стабилизации, который может достигать нескольких тысяч.

Чем больше коэффициент усиления усилителя, тем больше коэффициент стабилизации и меньше выходное сопротивление стабилизатора.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. Согласно справочным данным выпрямительный столб 2Ц103А имеет при токе 40 мА прямое падение напряжения 7 В, а при обрат-

ном напряжении 2 000 В обратный ток составляет 0,1 мкА. Вычислите прямое и обратное сопротивления диода.

*Решение.* Приведенные данные позволяют определить статическое сопротивление для прямой и обратной ветвей высоковольтного выпрямительного столба в соответствии с законом Ома. Прямое сопротивление  $R_{пр} = U_{пр}/I_{пр} = 7 \text{ В}/0,04 \text{ А} = 175 \text{ Ом}$ , обратное сопротивление  $R_{обр} = U_{обр}/I_{обр} = 2000 \text{ В}/(0,1 \cdot 10^{-6} \text{ А}) = 2 \cdot 10^{10} \text{ Ом}$ . Расчеты показывают, что прямое сопротивление высоковольтного выпрямительного столба может составлять сотни ом, в то время как обратное сопротивление исчисляется десятками гигаом ( $1 \text{ ГОм} = 10^9 \text{ Ом}$ ).

*Ответ.* Прямое сопротивление выпрямительного столба 2Ц103А равно 175 Ом, обратное сопротивление —  $2 \cdot 10^{10}$  Ом. Таким образом, обратное сопротивление более чем в  $10^8$  раз больше прямого.

2. Для работы электродвигателя постоянного тока ДПМ-30-Н2 от промышленной сети напряжением 220 В и частотой 50 Гц используется выпрямитель. Двигатель с возбуждением от постоянных магнитов имеет следующие основные электрические параметры:  $U_n = 27 \text{ В}$ ;  $I_n = 0,7 \text{ А}$ .

Выберите схему выпрямителя и рассчитайте параметры его основных элементов.

*Решение.* В данном случае для питания электродвигателя достаточно иметь лишь два элемента: трансформатор и вентиль. Это связано с тем, что при значительном моменте инерции ротора высокая частота пульсаций выпрямленного напряжения практически не оказывает влияния на рабочие характеристики двигателя. Он реагирует лишь на среднее выпрямленное напряжение  $U_{н.ср}$ .

Исходя из характеристик двигателя выбираем в качестве вентиля выпрямительный блок КЦ402 с мостовой схемой соединения, имеющий следующие параметры:  $U_{обр\max} = 100 \text{ В}$ ,  $I_{пр\max} = 1000 \text{ мА}$ . Двигатель может быть включен непосредственно в диагональ моста с пульсирующим напряжением, в то время как вторая диагональ подключается к вторичной обмотке трансформатора (рис. 6.27).

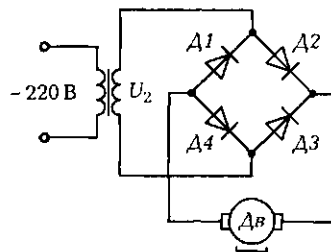


Рис. 6.27. Схема питания электродвигателя постоянного тока к задаче 2 подразд. 6.2

Поскольку для двухполупериодного однофазного выпрямителя  $U_{н.ср} = 0,9U_2$ , действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $U_2 = U_{н.ср}/0,9 = 27/0,9 = 30$  В.

Таким образом, для работы выпрямителя необходим трансформатор с первичным напряжением  $U_1 = 220$  В и вторичным  $U_2 = 30$  В. Номинальная мощность трансформатора  $P_{ном} = U_2 I_n = 30 \cdot 0,7 = 21$  Вт.

*Ответ.* Для работы двигателя постоянного тока от источника переменного напряжения 220 В целесообразно использовать выпрямительный блок КЦ402, работающий в комплексе с трансформатором, вторичное напряжение которого составляет 30 В, а номинальная мощность — 21 Вт.

**3.** Вычислите коэффициент стабилизации по току, если при номинальном выходном токе 5 А номинальное выходное напряжение равно 20 В. При этом изменение тока нагрузки в диапазоне от 3 до 7 А приводит к изменению выходного напряжения на 0,4 В.

*Решение.* Коэффициент стабилизации по току, определяющий диапазон изменения выходного напряжения  $\Delta U_{вых}$  при изменении тока нагрузки  $\Delta I_n$ ,  $K_{ст2} = (\Delta I_n / I_{н.ном}) / (\Delta U_{вых} / U_{вых.ном}) = (4/5) / (0,4/20) = 40$ .

*Ответ.* Коэффициент стабилизации по току равен 40.

**4.** Для обеспечения стабильного напряжения  $U_{вых} = 4$  В на нагрузке сопротивлением  $R_n = 120$  Ом используется параметрический стабилизатор напряжения (см. рис. 6.25, а). Диапазон изменения входного напряжения 6...10 В. Определите сопротивление балластного резистора  $R_б$  и его мощность рассеяния, а также выберите тип стабилитрона.

*Решение.* Вычисляем ток нагрузки:  $I_n = U_{вых} / R_n = 4/120 = 0,033$  А.

Находим сопротивление балластного резистора:  $R_б = (U_{вх.мин} - U_{вых}) / I_n = (6 - 4) / 0,033 = 61$  Ом.

Определяем максимальный ток, потребляемый ЭЦ:  $I_{max} = (U_{вх.макс} - U_{вых}) / R_б = (10 - 4) / 61 = 0,1$  А.

Вычисляем максимальный ток через стабилитрон:  $I_{л.макс} = I_{max} - I_n = 0,1 - 0,033 = 0,067$  А.

По справочнику выбираем тип стабилитрона, обеспечивающего выходное напряжение 4 В и рассчитанного на максимальный ток не менее 0,067 А.

Этим требованиям удовлетворяет стабилитрон КС139А с параметрами  $E_{ст} = 3,9$  В и  $I_{ст.макс} = 70$  мА.

Вычисляем максимальную мощность балластного резистора:  $P = I_{max}^2 R_б = 0,01 \cdot 61 = 0,61$  Вт.

*Ответ.* Для стабилизации выходного напряжения 4 В на нагрузке сопротивлением 120 Ом может быть использован стабилитрон КС139А совместно с балластным резистором, например МЛТ-1-62.

## Задачи и вопросы для самостоятельного решения

5. По вольт-амперным характеристикам диодного моста КЦ407А (рис. 6.28) для температур  $-60$ ,  $+25$  и  $+85$  °С определите значения статического сопротивления диода в прямом направлении при  $I_{пр} = 40$  мА. Сравните эти значения.

6. По вольт-амперным характеристикам диодного моста КЦ407А (см. рис. 6.28, б) определите значения его статического сопротивления для трех температур при включении в обратном направлении, если к диоду приложено обратное напряжение  $U_{обр} = 150$  В. Сравните эти значения.

7. Как соединяют полупроводниковые диоды в схемах с токами, превышающими прямой ток применяемых диодов?

8. Как соединяют полупроводниковые диоды в схемах с напряжением, превышающим максимально допустимое обратное напряжение применяемых диодов?

9. Определите ток, протекающий через нагрузочный резистор сопротивлением  $R_n = 140$  Ом мостового выпрямителя, если на первичную обмотку трансформатора поступает напряжение  $U_{1max} = 160$  В, коэффициент трансформации  $K_{21} = 0,1$ , а сопротивление каждого полупроводникового диода в схеме равно 10 Ом.

10. Вычислите коэффициент пульсаций на выходе индуктивного фильтра индуктивностью 0,8 Гн, работающего на нагрузку сопротивлением 50 Ом, если напряжение на вход фильтра поступает от двухполупериодного выпрямителя, питаемого переменным напряжением частотой 50 Гц.

11. Вычислите коэффициент пульсаций на выходе емкостного фильтра емкостью 200 мкФ, работающего на нагрузку сопротивлением 1 кОм, если напряжение на вход фильтра поступает от двухпо-

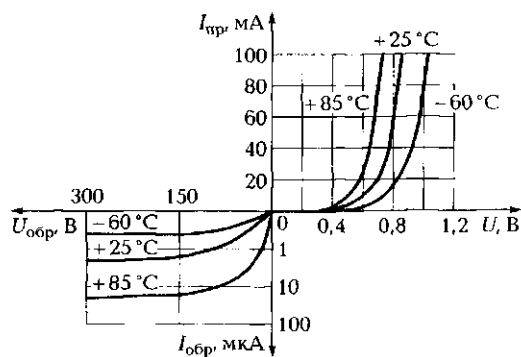


Рис. 6.28. Вольт-амперные характеристики диодного моста КЦ407А (к задачам 5 и 6 подразд. 6.2)

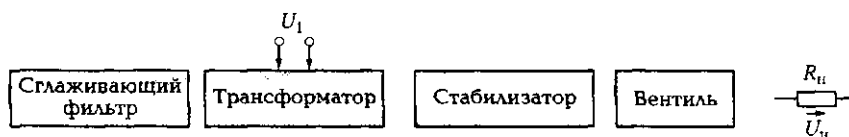


Рис. 6.29. Структурная схема выпрямительного устройства (к задаче 13 подразд. 6.2)

дупериодного выпрямителя, питаемого переменным напряжением частотой 50 Гц.

12. Стабилитрон с идеальной вольт-амперной характеристикой используется в цепи параметрического стабилизатора напряжения. Известно, что  $U_{вх} = (16 \pm 1,6)$  В,  $U_{ст} = 9$  В,  $I_{ст} = 10$  мА, ток нагрузки  $I_{н} = 8$  мА. Определите ток на входе стабилизатора  $I_{вх}$  и сопротивление балластного резистора  $R_{б}$ .

13. На рис. 6.29 соедините между собой в требуемой последовательности отдельные блоки структурной схемы выпрямительного устройства.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

- Укажите основные элементы выпрямительного устройства:
  - стабилизатор;
  - трансформатор;
  - диод;
  - усилитель;
  - фильтр;
  - генератор.
- Укажите основные параметры выпрямителя:
  - выпрямленное напряжение;
  - входное сопротивление;
  - коэффициент пульсаций;
  - выпрямленный ток;
  - выходное сопротивление;
  - частота пульсаций.
- Укажите основные преимущества двухполупериодного выпрямителя по сравнению с однополупериодным:
  - большее выпрямленное напряжение;
  - меньшая амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения;

- в) меньший коэффициент пульсаций;
  - г) большее напряжение на входе выпрямителя;
  - д) меньшее выходное сопротивление;
  - е) бóльшая частота пульсаций.
4. Какие элементы могут использоваться в выпрямителях в качестве вентилей:
- а) силовые диоды;
  - б) светодиоды;
  - в) высокочастотные диоды;
  - г) тиристоры;
  - д) фотодиоды;
  - е) опорные диоды при  $U_{2\max} < U_{ст}$ ?
5. Что лежит в основе работы индуктивного фильтра:
- а) увеличение индуктивного сопротивления при возрастании частоты пульсаций;
  - б) падение переменной составляющей напряжения на индуктивном сопротивлении;
  - в) значительно большее индуктивное сопротивление фильтра по сравнению с сопротивлением нагрузки;
  - г) увеличение индуктивного сопротивления при повышении индуктивности;
  - д) значительно меньшее индуктивное сопротивление фильтра по сравнению с сопротивлением нагрузки;
  - е) увеличение частоты пульсаций?
6. Что лежит в основе работы емкостного фильтра:
- а) увеличение емкостного сопротивления при возрастании частоты пульсаций;
  - б) шунтирование конденсатором сопротивления нагрузки;
  - в) значительно большее емкостное сопротивление фильтра по сравнению с сопротивлением нагрузки;
  - г) зарядка конденсатора в период открытия диода;
  - д) значительно меньшее емкостное сопротивление фильтра по сравнению с сопротивлением нагрузки;
  - е) разрядка конденсатора на нагрузку?
7. Что входит в состав компенсационного стабилизатора напряжения:
- а) источник опорного напряжения;
  - б) регулирующий элемент;
  - в) индикатор питания;
  - г) сравнивающее устройство;
  - д) выпрямитель;
  - е) усилитель?

## 6.3. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

### ТЕОРИЯ

#### 6.3.1. Назначение и классификация усилителей

➤ **Усилитель** — это устройство, усиливающее мощность электрических сигналов за счет энергии источника электропитания.

**По роду работы** усилители подразделяют: на линейные (пропорциональные), у которых сигнал на выходе пропорционален входному сигналу (рис. 6.30, а);

релейные, у которых форма сигнала на выходе отличается от формы входного сигнала, при этом выходной сигнал появляется лишь при достижении входным сигналом заданного уровня (рис. 6.30, б).

**В зависимости от назначения** различают:

- усилители тока;
- усилители напряжения;
- усилители мощности.

**По характеру спектра сигналов** усилители подразделяют следующим образом:

усилители постоянного тока (УПТ) — усиливают электрические сигналы постоянного тока, а также переменного частотой от долей герца до нескольких килогерц;

усилители низкой частоты (УНЧ) — от 10 Гц до 20 кГц;

широкополосные усилители (ШУ) — от единиц герца до десятков мегагерц;

избирательные усилители (ИУ) — усиливают электрические сигналы только одной частоты.

Связь между каскадами усилителя может быть:

реостатно-емкостной (RC-связь) — применяется в УНЧ и ШУ;

трансформаторной — применяется в УНЧ и ИУ;

гальванической (только с помощью резисторов) — применяется в УПТ.

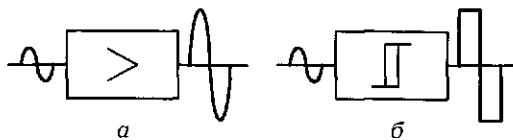


Рис. 6.30. Линейный (а) и релейный (б) усилители

### 6.3.2. Параметры и характеристики усилителя

Одним из основных параметров, характеризующих усилительные свойства усилителя, является коэффициент усиления.

Различают коэффициент усиления по напряжению  $K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$  — отношение переменной составляющей напряжения на выходе к переменной составляющей напряжения на входе, а также коэффициенты усиления по току  $K_I$  и по мощности  $K_P$  — отношения выходных и входных токов и мощностей.

Коэффициент усиления многокаскадных усилителей равен произведению коэффициентов усиления каждого из каскадов:  $K = \prod K_n$ .

Свойства усилителей также оцениваются:

- амплитудной характеристикой  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ , которую снимают при средней частоте (рис. 6.31, а). Точка А соответствует  $U_{\text{вх}} = 0$ , когда на выходе  $U_{\text{вых}} = U_{\text{ш}}$  (напряжение шума); точка В —  $U_{\text{вх min}}$ ; отрезок ВС соответствует линейному диапазону работы усилителя и определяет коэффициент усиления на средней частоте  $K_0 = \text{tg } \alpha$ ; точка D — максимальному напряжению на входе, при котором нелинейные искажения не превышают заданного уровня (например, 5%);
- частотной характеристикой  $K/K_0 = \psi(f)$ , которая снимается в линейном диапазоне при неизменном входном сигнале и обычно изображается в логарифмическом масштабе (рис. 6.31, б). Частотная характеристика показывает, что постоянным отношение  $K/K_0$  остается только в определенной области частот. Диапазон между нижней ( $f_n$ ) и верхней ( $f_b$ ) частотами определяет полосу пропускания усилителя  $\Delta f = f_b - f_n$ , которая находится на уровне 0,7 от максимального отношения  $K/K_0$ .

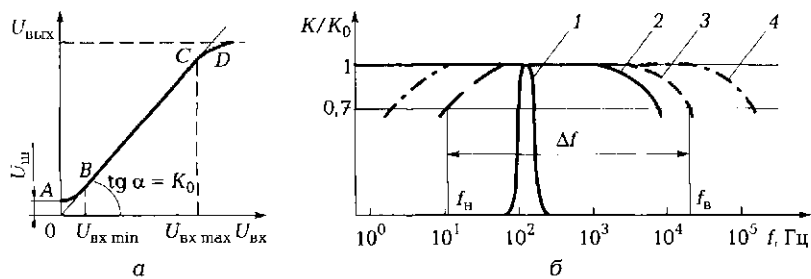


Рис. 6.31. Характеристики усилителя:

а — амплитудная; б — частотные для ИУ (кривая 1), УПТ [2], УНЧ [3] и ШУ [4]



### 6.3.3. Принцип и режимы работы усилителя

Основными элементами полупроводникового усилителя (рис. 6.32, а) являются:

- транзистор  $T$  — активный элемент с управляемой ВАХ, способный усиливать электрические сигналы  $u_c$ ;
- нагрузка  $R_k$ , включаемая последовательно с активным элементом;
- источник питания  $E_k$  (как правило, постоянного тока).

На рис. 6.32, б показана эквивалентная схема замещения усилителя, в которой транзистор  $T$  представлен нелинейным резистором  $R_T$ . Анализ такой схемы можно выполнить, используя ВАХ транзистора и опрокинутую ВАХ нагрузки (рис. 6.32, в). Последняя строится по двум точкам: холостого хода ( $I_k = 0$ ;  $U_{\text{вых}} = E_k$  — точка  $B$ ) и короткого замыкания ( $I_k = I_{k3} = E_k/R_k$ ;  $U_{\text{вых}} = 0$  — точка  $A$ ).

В зависимости от амплитуды входного сигнала и положения рабочей точки на нагрузочной прямой  $AB$  усилитель может работать:

- в *линейном* режиме (класс А) — рабочая точка находится в средней части нагрузочной прямой и  $2I_{\text{вых max}} \leq (I_{\text{бн}} - I_{\text{б0}})$ . При  $U_c = 0$  напряжение на выходе  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых.п}} = E_k/2$ . Рабочая точка находится посередине нагрузочной прямой (в точке покоя  $P_{\text{п}}$ ). Появление на входе усилителя гармонического сигнала, изменяющегося по синусоидальному закону, заставляет рабочую точку перемещаться от точки  $P_{\text{п}}$  вначале, например, вверх по нагрузочной прямой, а затем на такое же расстояние от точки  $P_{\text{п}}$  вниз по нагрузочной прямой. При этом выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  вначале убывает (стремится к нулю), а затем на такую же величину возрастает (стремится к  $E_k$ ). Таким образом, на выходе усилителя появляется

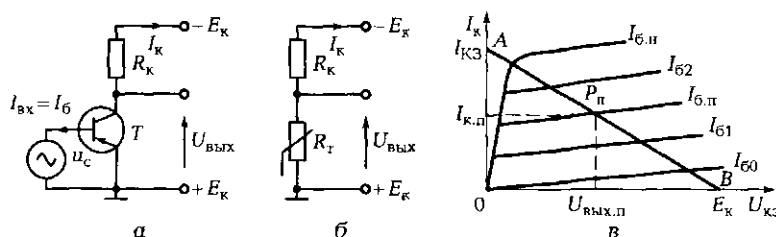


Рис. 6.32. Иллюстрации к пояснению работы усилителя:

а — электрическая схема усилителя; б — схема замещения; в — ВАХ транзистора опрокинутая ВАХ и нагрузки

гармонический сигнал, усиленный по сравнению с сигналом на входе в  $K$  раз. Данный режим является основным для усилителей напряжения. КПД в этом режиме около 25 %:

- в режиме отсечки (класс В), когда рабочая точка находится в нижней части нагрузочной прямой (совпадает с точкой В), а  $I_{\text{вх max}} \ll (I_{\text{б.н}} - I_{\text{б0}})$ . В этом случае транзистор работает как диод, пропуская ток в одном направлении и не пропуская в обратном. На выходе транзистора формируются сигналы, аналогичные сигналам на выходе однополупериодного выпрямителя. КПД в этом режиме около 70 %. Данный режим используется в двухтактных усилителях мощности;
- в ключевом режиме (класс D), когда  $I_{\text{вх max}} \gg (I_{\text{б.н}} - I_{\text{б0}})$ . В этом случае транзистор работает попеременно то в режиме отсечки, то в режиме насыщения. Сопротивление его изменяется соответственно от бесконечности до нуля, а выходное напряжение — от  $E_{\text{к}}$  до нуля. Выходной сигнал имеет прямоугольную форму. КПД в данном режиме около 95 %. Используется этот режим в импульсных устройствах автоматики.

Пусть в исходном состоянии  $I_{\text{б}} = I_{\text{б.п}}$ . Тогда  $I_{\text{к}} = I_{\text{к.п}}$  и  $U_{\text{вых}} = E_{\text{к}} - I_{\text{к.п}}R_{\text{к}}$ . Увеличение тока базы  $I_{\text{б}}$  приводит к увеличению тока коллектора  $I_{\text{к}}$ , а следовательно, к увеличению  $U_{\text{рк}} = I_{\text{к}}R_{\text{к}}$  и уменьшению  $U_{\text{вых}} = E_{\text{к}} - I_{\text{к}}R_{\text{к}}$ . Уменьшение тока базы  $I_{\text{б}}$  ведет к уменьшению  $I_{\text{к}}$  и соответственно к увеличению  $U_{\text{вых}}$ . Таким образом, напряжения на входе и выходе изменяются в противофазе.

Как же зафиксировать рабочую точку  $P$  на нагрузочной прямой в нужном месте? Требующийся для этого ток базы может обеспечить автономный источник, включенный между базой и эмиттером (см. рис. 6.12, а). Однако основное применение нашли схемы с использованием единого коллекторного источника питания  $E_{\text{к}}$ .

☛ Фиксация рабочей точки в этом случае может быть выполнена двумя способами:

- изменением потенциала базы с помощью базового делителя;
- изменением тока базы за счет включения резистора в цепь базы.

Базовый делитель  $R_{\text{б1}} - R_{\text{б2}}$  включают параллельно источнику  $E_{\text{к}}$  (рис. 6.33, а). Это позволяет получить на базе транзистора потенциал относительно корпуса, изменяющийся от 0 до  $-E_{\text{к}}$  в зависимости от соотношения сопротивлений резисторов  $R_{\text{б1}}$  и  $R_{\text{б2}}$ . Рабочая точка в этом случае может быть расположена на нагрузочной прямой в любом месте между точками А и В (см. рис. 6.32, в).

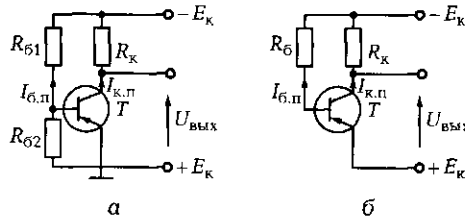


Рис. 6.33. Схемы фиксации рабочей точки:  
 а — с помощью базового делителя; б — с помощью тока базы

Ток базы покоя  $I_{б.п}$  обеспечивается также включением резистора  $R_б$  между базой транзистора и зажимом  $-E_к$  (рис. 6.33, б). Изменение сопротивления резистора  $R_б$  позволяет изменять ток базы.

### 6.3.4. Обратная связь в усилителях

⚡ Недостаток транзистора — одного из основных элементов усилителя — существенная зависимость характеристик от температуры. Это требует применения в усилителях специальных схем термостабилизации за счет введения обратной связи (ОС) по постоянным составляющим тока или напряжения. Обратной связью в усилителе называется воздействие части выходного сигнала на вход усилителя.

Обратная связь может быть последовательной (рис. 6.34, а) и параллельной (рис. 6.34, б), причем как по постоянной составляющей сигнала, так и по переменной.

Коэффициент передачи цепи ОС определяется по формуле  $\beta = U_{ОС} / U_{ВЫХ}$ , т.е. представляет собой отношение напряжения  $U_{ОС}$ , подаваемого на вход усилителя, к выходному напряжению усилителя  $U_{ВЫХ}$ . Он показывает, какая часть выходного сигнала передается на вход усилителя.

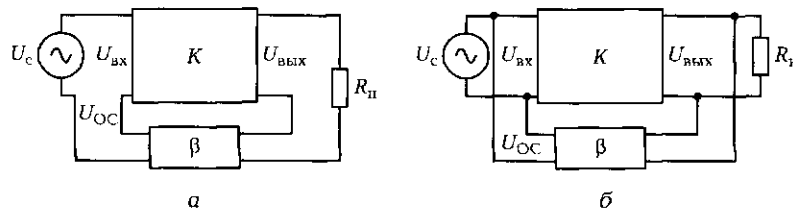


Рис. 6.34. Обратная связь в усилителях:  
 а — последовательная; б — параллельная

☛ Если сигнал ОС на вход подается в фазе с входным сигналом ( $\beta > 0$ ), то ОС положительна, если в противофазе ( $\beta < 0$ ) — отрицательна.

Обратная связь оказывает влияние на коэффициент усиления усилителя.

В усилителе без ОС коэффициент усиления

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_c} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$$

При наличии положительной ОС ( $\beta > 0$ ) напряжение на входе усилителя  $U_{\text{ВХ}} = U_c + U_{\text{ОС}}$ . Тогда коэффициент усиления усилителя с положительной обратной связью

$$K_{\text{ОС}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_c} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ОС}}} = \frac{\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}}{1 - \frac{U_{\text{ОС}}}{U_{\text{ВХ}}}} = \frac{\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}}{1 - \frac{U_{\text{ОС}}}{U_{\text{ВЫХ}}} \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}}$$

Поскольку  $\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = K$  и  $\frac{U_{\text{ОС}}}{U_{\text{ВЫХ}}} = \beta$ ,

$$K_{\text{ОС}} = \frac{K}{1 - \beta K}$$

Положительная ОС вызывает увеличение коэффициента усиления усилителя. При  $\beta K = 1$  обратная связь называется критической, так как в этот момент  $K_{\text{ОС}} \rightarrow \infty$ , т. е. усилитель даже при  $U_{\text{ВХ}} = 0$  имеет  $U_{\text{ВЫХ}} \neq 0$ , а следовательно, переходит в режим самовозбуждения (генерации).

В усилителях положительная ОС не применяется, она используется лишь в автогенераторах.

При наличии отрицательной обратной связи ( $\beta < 0$ ) напряжение на входе усилителя  $U_{\text{ВХ}} = U_c - U_{\text{ОС}}$ .

Отсюда

$$K_{\text{ОС}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_c} = \frac{K}{1 + \beta K}$$

☛ Отрицательная обратная связь (ООС) вызывает уменьшение коэффициента усиления усилителя, что позволяет повысить устойчивость его работы, т. е. исключить самовозбуждение в различных эксплуатационных условиях (при изменении напряжения питания, температуры окружающей среды, замене элементов в случае их выхода из строя и т. д.). Наличие

ООС дает возможность уменьшить выходное сопротивление усилителя и увеличить его входное сопротивление, что также является положительным фактором.

Введение ООС по постоянному току позволяет повысить стабильность работы усилителя при изменении температуры окружающей среды.

### 6.3.5. Принцип термостабилизации

При увеличении температуры, например, от 20 до 50 °С ВАХ транзистора (рис. 6.35, а) смещается вверх (+50 °С без ООС), рабочая точка  $P$  перемещается по нагрузочной прямой в точку  $P'$ , ток коллектора увеличивается до  $I'_k$ . Это ведет к уменьшению выходного напряжения до  $U'_{\text{вых}}$ . Для исключения подобных явлений в цепь эмиттера включают резистор  $R_3$  (рис. 6.35, б). Он обеспечивает ООС по току коллектора, так как напряжение ООС, снимаемое с резистора  $R_3$ , пропорционально выходному току. Увеличение тока коллектора ведет к увеличению падения напряжения на резисторе  $R_3$ . Поскольку падение напряжения  $U_6$  на резисторе  $R_{62}$  не зависит от температуры, то напряжение между базой и эмиттером транзистора  $U_{6-3} = U_6 - U_3$  уменьшается. Это приводит к уменьшению тока базы до  $I''_6$ , в результате чего рабочая точка перемещается в точку  $P''$ , близкую к точке  $P$  (см. рис. 6.35, а). Таким образом, выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  остается практически неизменным.

Отрицательная обратная связь позволяет также улучшить частотные характеристики усилителя, т. е. увеличить его полосу пропускания, уменьшить нелинейные искажения выходного напряжения, увеличить входное и уменьшить выходное сопротивления усилителя в  $(1 + \beta K)$  раз.

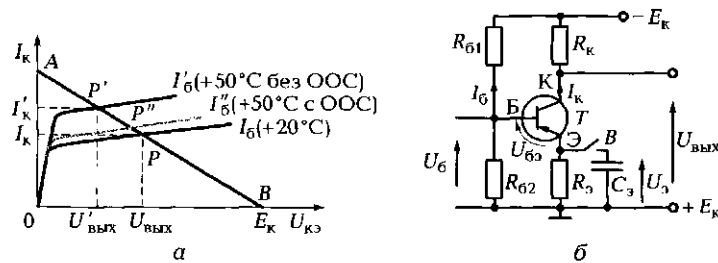


Рис. 6.35. Вольт-амперные характеристики, поясняющие принцип термостабилизации (а), и схема усилителя с термостабилизацией (б)

В схеме, показанной на рис. 6.35, б, ООС обеспечивается как по постоянному току, так и по переменному. Цепь ООС по постоянному току является цепью термостабилизации. Обратная связь по переменному току применяется для повышения устойчивости усилителя.

Если по каким-либо причинам ООС по переменному току не нужна (схема работает устойчиво, а коэффициент усиления  $K$  и так мал), то резистор  $R_3$  шунтируют конденсатором  $C_3$ , через который проходит переменная составляющая тока эмиттера. Для шунтирования резистора  $R_3$  служит выключатель  $B$ .

На нижней граничной частоте  $f_n$  емкостное сопротивление конденсатора должно быть на порядок меньше сопротивления резистора  $R_3$ . Емкость шунтирующего конденсатора определяется выражением

$$C_3 = \frac{10 \dots 20}{2\pi f_n R_3}.$$

### 6.3.6. Многокаскадные усилители напряжения

Рассмотренные однокаскадные усилители имеют, как правило, коэффициент усиления по напряжению в пределах нескольких десятков. Однако во многих устройствах промышленной электроники часто требуется гораздо больший коэффициент усиления (до нескольких сотен и даже тысяч). В этом случае применяются многокаскадные усилители, общий коэффициент усиления которых равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов:

$$K = K_1 K_2 \dots K_n.$$

Отдельные каскады между собой могут быть соединены посредством реостатно-емкостной ( $RC$ ), трансформаторной или гальванической связи.

**Усилители с  $RC$ -связью.** Многокаскадные усилители с  $RC$ -связью (рис. 6.36) получили наибольшее распространение в усилителях напряжения. Связь между каскадами в них осуществляется за счет разделительных конденсаторов и базовых делителей.

Конденсатор  $C_{p1}$  отделяет переменную составляющую выходного напряжения первого каскада  $U_{вых1}$  от постоянной составляющей коллекторного питания, т. е. напряжение  $U_{вых1}$  поступает на вход следующего каскада через конденсатор  $C_{p1}$ .

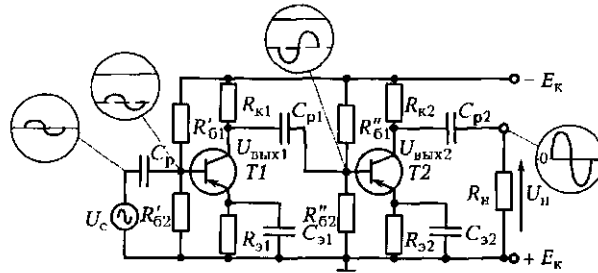


Рис. 6.36. Схема двухкаскадного усилителя с RC-связью между каскадами

Конденсатор  $C_{п2}$  не пропускает постоянную составляющую на выход усилителя (в нагрузку  $R_{н}$ ), а конденсатор  $C_{п}$  исключает влияние выходного сопротивления источника сигнала на входную цепь усилителя. Форма сигнала в отдельных точках усилителя показана на выносках в окружностях.

**Усилители с трансформаторной связью.** В данных усилителях напряжения связь между каскадами осуществляется с помощью трансформатора (рис. 6.37).

При отсутствии входного напряжения  $U_{вх}$  по первичным обмоткам трансформаторов  $Tr2$  и  $Tr3$  проходят постоянные коллекторные токи транзисторов соответственно  $T1$  и  $T2$ . Во вторичных обмотках трансформаторов напряжение равно нулю (трансформатор не передает постоянное напряжение во вторичную обмотку).

Если ко входу подводится переменное напряжение  $U_{вх}$ , то во вторичной обмотке трансформатора  $Tr1$  также появляется переменное напряжение, передаваемое на вход первого каскада. В первичной, а значит, и вторичной обмотках трансформатора  $Tr2$  в свою очередь появляется переменное напряжение, которое передается на вход следующего каскада, и т. д.

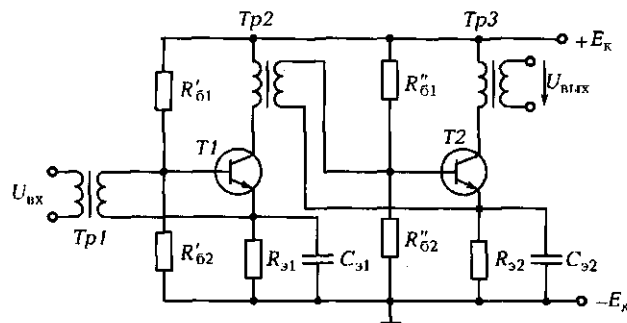


Рис. 6.37. Схема усилителя с трансформаторной связью

Благодаря применению трансформатора постоянная составляющая коллекторного питания не попадает на вход следующего каскада.

**Усилители с гальванической связью.** В тех случаях, когда необходимо усилить сигналы частотой в доли герца, использование реактивных элементов в цепях связи между каскадами невозможно (емкость  $C$  должна быть очень большой). В цепи связи в этом случае используют резисторы. Построенные по такому принципу усилители называются усилителями с гальванической связью. Они являются усилителями постоянного тока (УПТ).

Разделение постоянной и переменной составляющих в таких усилителях осуществляется *компенсационным методом* (при отсутствии сигнала на входе ток в нагрузке должен быть равен нулю). При этом используются балансные схемы УПТ, построенные по принципу четырехплечего моста (рис. 6.38).

Нагрузка включается между коллекторами транзисторов  $T1$  и  $T2$ , исполняющих роль двух плеч моста. Двумя другими плечами моста являются коллекторные резисторы  $R_{к1}$  и  $R_{к2}$ . Если потенциалы на коллекторах транзисторов  $T1$  и  $T2$  одинаковы ( $\varphi_a = \varphi_b$ ), то ток в нагрузке отсутствует.

Резистор  $R_6$  служит для балансировки схемы, т. е. для выравнивания потенциалов на коллекторах. Температурная стабилизация осуществляется за счет общего для обоих транзисторов резистора  $R_3$ .

Входной сигнал  $U_{вх1}$  подается на базу транзистора  $T1$ ; потенциал базы транзистора  $T2$  постоянен и определяется делителем  $R'_{61} - R''_{62}$ . В этом случае в нагрузке появляется ток, пропорциональный амплитуде входного сигнала и имеющий такой же знак. Если на базу транзистора  $T2$  подается входной сигнал  $U_{вх2}$ , то сигнал на выходе будет пропорционален разности входных сигналов:

$$U_{вых} = K_U(U_{вх1} - U_{вх2}).$$

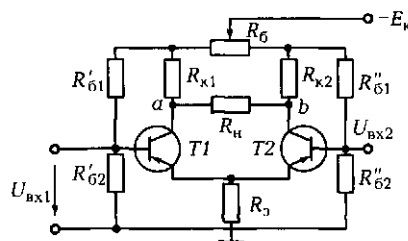


Рис. 6.38. Схема усилителя с гальванической связью



Усилитель с двумя входами называют *усилителем с дифференциальным входом*. Как правило, такой усилитель имеет несколько каскадов, что позволяет получить значительный коэффициент усиления.

### 6.3.7. Операционные усилители

Широкое применение в качестве усилителей постоянного тока получили операционные усилители, выполняемые на микросхемах.

➤ **Операционные усилители** — это усилители с очень высоким коэффициентом усиления (сотни тысяч), имеющие два входа — прямой (+) и инверсный (-). Выходной сигнал пропорционален разности напряжений на этих входах.

Так как напряжение всегда передается по двухпроводной линии, то его можно подводить или к двум входам усилителя, или к одному из входов относительно нулевой точки усилителя. Выходной сигнал также снимается относительно этой нулевой точки. Если напряжение подается только на прямой вход (+), то  $U_{\text{вых}} = K_U U_{\text{вх1}}$ , а если только на инверсный (-), то  $U_{\text{вых}} = -K_U U_{\text{вх2}}$ .

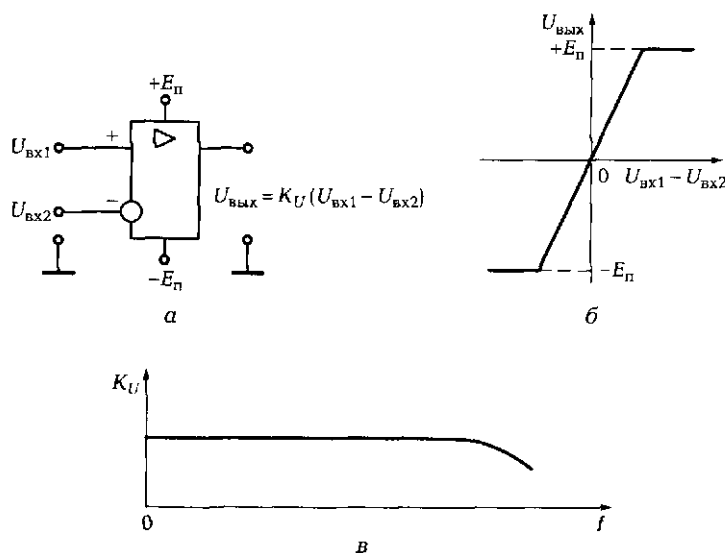


Рис. 6.39. Операционный усилитель:  
 а — условное изображение на схеме; б — амплитудная характеристика; в — частотная характеристика

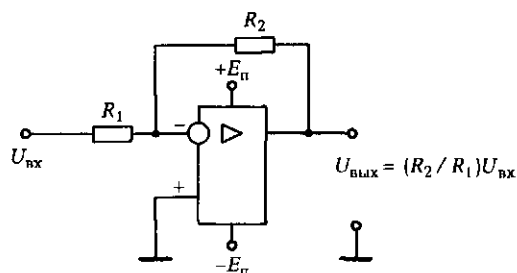


Рис. 6.40. Операционный усилитель с отрицательной обратной связью

На рис. 6.39 показаны условное изображение операционного усилителя на принципиальных схемах, его амплитудная и частотная характеристики. В зависимости от входного сигнала выходное напряжение операционного усилителя может быть как положительным, так и отрицательным, что обеспечивается питанием усилителя от двух источников напряжения  $+E_{п}$  и  $-E_{п}$ . Когда выходное напряжение приближается к этим значениям, начинается насыщение усилителя, и его амплитудная характеристика искажается (рис. 6.39, б).

Операционный усилитель может применяться для усиления электрических сигналов, например от датчиков автоматических систем управления. В этом случае используется один из входов усилителя, как правило, инверсный. Другой вход усилителя (прямой) соединяется с корпусом. Поскольку коэффициент усиления операционного усилителя слишком высок, необходимы дополнительные меры для его уменьшения до нужного значения.

☛ Коэффициент усиления операционного усилителя можно легко регулировать, если ввести отрицательную обратную связь между выходом усилителя и его инверсным входом (рис. 6.40).

Изменение напряжения на выходе усилителя всегда противоположно по знаку изменению напряжения на инверсном входе, т. е. эти напряжения всегда находятся в противофазе. Подав часть напряжения с выхода на вход, можно частично подавить входной сигнал, уменьшив тем самым коэффициент усиления. Поэтому такая обратная связь и называется отрицательной. Нужный коэффициент усиления устанавливается за счет изменения сопротивления одного из резисторов в цепи обратной связи (обычно резистора  $R_2$ ). С достаточной точностью можно считать, что коэффициент усиления операционного усилителя с обратной связью  $K_{от} = R_2/R_1$ .

### 6.3.8. Усилители мощности

Усилитель напряжения позволяет увеличить одновременно и мощность электрического сигнала. Однако в случае необходимости выделения на нагрузке значительной мощности применяются специальные схемы выходных каскадов усилителя напряжения. В них устанавливаются транзисторы, рассчитанные на большие токи и напряжения и способные рассеивать значительную мощность на коллекторе.

Для увеличения допустимой мощности рассеяния, а следовательно, выходной мощности должен быть обеспечен хороший отвод теплоты от коллекторного  $p-n$ -перехода. С этой целью корпус транзистора надежно соединяют с корпусом усилителя (его массой) либо со специальным радиатором, способным хорошо рассеивать теплоту.

Поскольку сопротивление нагрузки, подключаемой к выходу усилителя мощности, обычно невелико (например, динамики с сопротивлением до 4 Ом), применяется трансформаторная связь, позволяющая за счет соответствующего коэффициента трансформации провести согласование малого сопротивления нагрузки с большим выходным сопротивлением усилителя.

☛ Усилители мощности могут быть построены по одноконтурной и двухконтурной схемам.

Одноконтурная схема, при которой усилитель работает в режиме класса А (см. подразд. 6.3.3), применяется относительно редко из-за низкого КПД и возможности получения незначительной выходной мощности.

Этих недостатков лишены двухконтурные схемы усилителей мощности, работающих в режиме класса В (рис. 6.41, а). Их КПД достигает 70 %, мощность более 10 Вт, ток покоя при  $U_{\text{вх}} = 0$  равен нулю, т. е. сердечник трансформатора не насыщен.

Для управления двухконтурными схемами усилителя мощности необходим фазоинверсный каскад, т. е. устройство, позволяющее подать на вход усилителя (базы транзисторов  $T1$  и  $T2$ ) одновременно два одинаковых по величине, но противоположных по фазе напряжения. В нашем случае таким устройством является входной трансформатор  $Tr1$ , вторичная обмотка которого имеет средний вывод.

Делитель напряжения  $R_{\text{б1}} - R_{\text{б2}}$  обеспечивает требуемый режим работы транзисторов — режим класса В. Трансформатор  $Tr2$  служит для согласования выходного сопротивления усилителя с низкоомной нагрузкой.

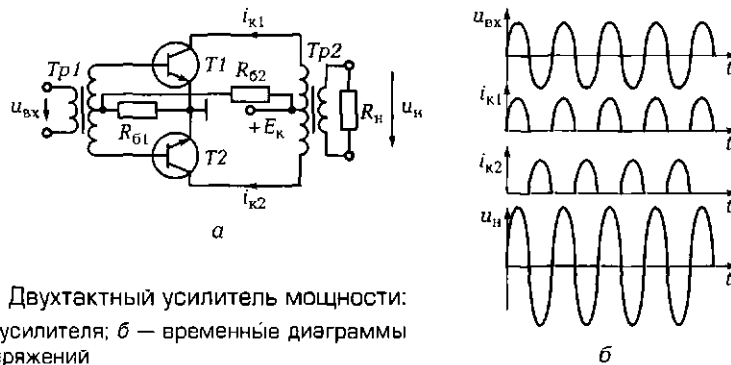


Рис. 6.41. Двухтактный усилитель мощности:  
 а — схема усилителя; б — временные диаграммы токов и напряжений

Работу усилителя можно проанализировать с помощью временных диаграмм, приведенных на рис. 6.41, б. Входной сигнал  $u_{вх}$ , подаваемый через трансформатор  $Tr1$ , поступает на базы транзисторов  $T1$  и  $T2$  в противофазе. Транзисторы работают в режиме класса В, поэтому если  $T1$  во время полуволны входного напряжения пропускает коллекторный ток  $i_{к1}$ , то  $T2$  закрыт и ток не пропускает. Во время следующей полуволны транзисторы меняются ролями:  $T2$  проводит ток  $i_{к2}$ , а  $T1$  закрыт. Токи  $i_{к1}$  и  $i_{к2}$  протекают через первичную обмотку трансформатора  $Tr2$  в противоположных направлениях. В результате напряжение во вторичной обмотке пропорционально разности коллекторных токов  $i_{к1} - i_{к2}$ . Форма разностного тока, а следовательно, и форма напряжения на нагрузке  $u_{н}$  повторяют форму входного напряжения. При этом мощность сигнала на нагрузке может во много раз превышать мощность входного сигнала.

☛ В качестве усилителя мощности может также использоваться транзисторный усилитель, собранный по схеме с общим коллектором — *эмиттерный повторитель* (рис. 6.42).

Его коэффициент усиления по напряжению равен единице, фаза выходного сигнала совпадает с фазой входного, выходной сигнал снимается с эмиттера (отсюда и название «эмиттерный повторитель»). В то же время коэффициент усиления по току, а значит, и по мощности может достигать значительной величины.

Входное сопротивление в такой схеме находится в пределах 0,5... 1,0 МОм (тогда как в схеме с общим эмиттером — 0,1... 1,0 кОм). Это позволяет подключать к входу усилителя электрические цепи с высоким выходным со-

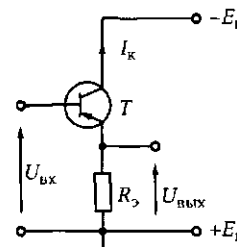


Рис. 6.42. Эмиттерный повторитель

противлением. В то же время выходное сопротивление усилителя невелико (единицы ом), что позволяет подключать к его выходу низкоомную нагрузку. В связи с этим эмиттерный повторитель применяется также в качестве согласующего элемента между высокоомным выходом усилителя и низкоомной нагрузкой.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. У трехкаскадного усилителя напряжения коэффициент усиления каждого из первых двух каскадов равен 30, а третий каскад собран по схеме эмиттерного повторителя. Чему равен общий коэффициент усиления усилителя?

*Решение.* Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов. Третий каскад усилителя собран по схеме эмиттерного повторителя, поэтому его коэффициент усиления по напряжению равен 1. Тогда общий коэффициент усиления  $K = K_1 K_2 K_3 = 30 \cdot 30 \cdot 1 = 900$ .

*Ответ.* Общий коэффициент усиления трехкаскадного усилителя равен 900.

2. По частотной характеристике усилителя, показанной на рис. 6.43, а, определите нижнюю и верхнюю частотные границы, а также полосу пропускания усилителя. К какому виду усилителей по спектру частот он относится?

*Решение.* Нижняя  $f_n$  и верхняя  $f_v$  частотные границы определяются на уровне 0,7 от максимального значения коэффициента усиления. В нашем случае максимальное значение равно 1. По характеристике находим, что  $f_n$  составляет около 9 Гц, а  $f_v$  — около 19,69 кГц. Эти частоты характерны для усилителя низкой частоты. Полоса пропускания усилителя  $\Delta f = 19,68$  кГц.

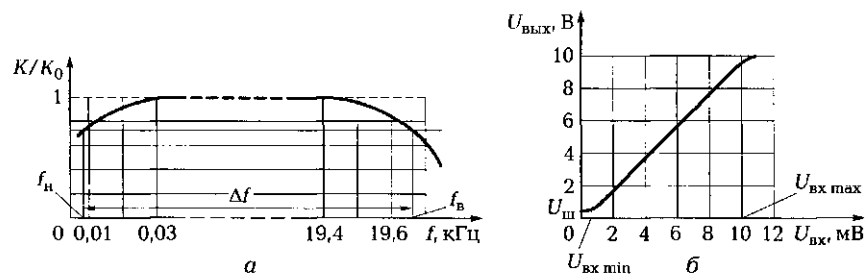


Рис. 6.43. Частотная (а) и амплитудная (б) характеристики усилителя (к задачам соответственно 2 и 3 подразд. 6.3)

*Ответ.* Показанная на рис. 6.43, а частотная характеристика присуща усилителю низкой частоты;  $f_n \approx 9$  Гц,  $f_v \approx 19,69$  кГц,  $\Delta f = 19,68$  кГц.

3. По амплитудной характеристике усилителя, показанной на рис. 6.43, б, определите его коэффициент усиления, уровень шумов, максимальный входной сигнал, при котором появляются нелинейные искажения, а также линейный диапазон работы усилителя.

*Решение.* Коэффициент усиления определяется тангенсом угла наклона амплитудной характеристики к оси. В нашем случае  $K_U = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = 6 \text{ В}/6 \text{ мВ} = 1000$  или в децибелах:  $10 \lg K_U = 10 \lg 1000 = 30$  дБ. Уровень шумов  $U_{\text{ш}} = 0,5$  В; нелинейные искажения появляются при  $U_{\text{вх max}} = 10$  мВ; линейный диапазон работы усилителя по входному сигналу — от 1 до 10 мВ.

4. В усилителе с отрицательной обратной связью коэффициент усиления  $K_{\text{ОС}} = 40$ , коэффициент обратной связи  $\beta = 0,02$ . Как изменится коэффициент усиления, если коэффициент обратной связи станет равен 0,005?

*Решение.* Коэффициент усиления усилителя с отрицательной обратной связью  $K_{\text{ОС}} = K/(1 + \beta K)$ . Из этого выражения можно определить коэффициент усиления усилителя без отрицательной обратной связи (коэффициент  $K$ ). Подставив известные значения, получим  $40 = K/(1 + 0,02K)$ . Откуда  $K = 200$ .

Зная  $K$  и новое значение  $\beta$ , вычислим новый коэффициент усиления:  $K_{\text{ОС}} = K/(1 + \beta K) = 200/(1 + 0,005 \cdot 200) = 100$ .

*Ответ.* Уменьшение коэффициента обратной связи  $\beta$  в 4 раза увеличивает коэффициент усиления усилителя с отрицательной обратной связью  $K_{\text{ОС}}$  в 2,5 раза.

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

5. Определите в относительных единицах и децибелах общий коэффициент усиления трехкаскадного усилителя, если  $K_1 = 100$ ;  $K_2 = 10$ ;  $K_3 = 10$ .

6. Определите коэффициент полезного действия усилителя, если мощность нагрузки составляет 0,3 Вт, мощность, рассеиваемая на транзисторе, — 120 мВт, а мощность, рассеиваемая в остальных цепях усилителя, — 80 мВт.

7. Определите ЭДС источника питания  $E_k$  усилителя, схема которого изображена на рис. 6.44, а, если  $U_{\text{кз}} = 6$  В,  $I_k = 100$  мА,  $R_k = 100$  Ом.

8. Определите сопротивление резистора, который необходимо включить в коллекторную цепь усилителя (см. рис. 6.44, а), чтобы ток коллектора  $I_k$  составлял 3 мА при  $U_{\text{кз}} = 7$  В,  $E_k = 16$  В.

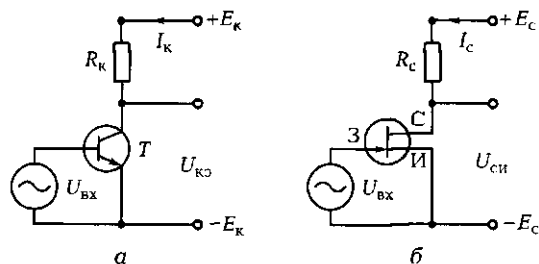


Рис. 6.44. Схемы усилителей:

а — к задачам 7, 8, 9; б — к задаче 10 подразд. 6.3

9. Определите ток в цепи коллектора  $I_k$  в усилительном каскаде (см. рис. 6.44, а) со следующими параметрами:  $E_k = 12$  В,  $U_{кэ} = 6$  В,  $R_k = 3$  кОм.

10. Определите напряжение  $U_{си}$  усилителя на полевом транзисторе (рис. 6.44, б), если падения напряжения на резисторе  $R_c$  и сопротивлении цепи истока составляют соответственно 2,4 и 0,2 В. Напряжение источника питания  $E_c = 6$  В.

11. Определите напряжение на выходе усилителя, питаемого от источника постоянного напряжения 5 В, если напряжение на входе  $U_{вх} = 20$  мВ, а коэффициент усиления  $K_U = 1000$ .

12. Какой коэффициент обратной связи  $\beta$  необходимо установить в усилителе с коэффициентом усиления  $K = 500$ , чтобы при максимальном входном сигнале  $U_{вх} = 50$  мВ иметь на выходе максимальный сигнал  $U_{вых} = 5$  В?

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

- Укажите основные режимы работы усилителя:
  - входной;
  - отсечки;
  - линейный;
  - нелинейный;
  - ключевой;
  - выходной.
- Укажите основные элементы усилителя:
  - трансформатор;
  - транзистор;
  - конденсатор;
  - источник питания;
  - резистор в цепи коллектора или эмиттера;
  - дроссель.
- Укажите основные способы фиксации рабочей точки на нагрузочной прямой:


- а) питанием от автономного источника;
  - б) питанием от сети;
  - в) с помощью конденсатора;
  - г) помощью базового делителя;
  - д) помощью транзистора;
  - е) помощью тока базы.
4. Укажите основные виды межкаскадных связей:
- а) гальваническая;
  - б) дроссельная;
  - в) реостатно-емкостная;
  - г) транзисторная;
  - д) диодная;
  - е) трансформаторная.
5. Что позволяет сделать отрицательная обратная связь в усилителях:
- а) уменьшить входное сопротивление;
  - б) повысить устойчивость работы;
  - в) расширить полосу частот;
  - г) увеличить выходное сопротивление;
  - д) повысить коэффициент усиления;
  - е) снизить нелинейные искажения?
6. Почему усилитель с общим коллектором называют эмиттерным повторителем:
- а) его входное сопротивление невелико;
  - б) он позволяет повысить устойчивость работы;
  - в) его выходной сигнал снимается с эмиттера;
  - г) фаза его выходного сигнала равна фазе входного;
  - д) он позволяет повысить коэффициент усиления;
  - е) его коэффициент усиления по напряжению равен единице?

## 6.4. ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

---

### ТЕОРИЯ

#### 6.4.1. Классификация электронных генераторов

 Электронные генераторы — это устройства, в которых энергия постоянного тока преобразуется с помощью электронных



или полупроводниковых приборов в энергию электрических колебаний определенной частоты и формы.

Электронные генераторы подразделяют по разным признакам. **В зависимости от частотного диапазона** — на генераторы:

- низкой частоты (от долей герца до 100 кГц);
- высокой частоты (100 кГц... 100 МГц);
- сверхвысокой частоты (более 100 МГц).

**По форме колебаний** — на генераторы:

- синусоидальные;
- релаксационные (несинусоидальные).

**По режиму работы** — на генераторы:

- с независимым возбуждением — высокочастотные усилители мощности;
- с самовозбуждением (автогенераторы).

Анализ обратных связей в усилителях показывает (см. подразд. 6.3.4), что положительная ОС с коэффициентом  $\beta = 1/K$  ведет к самовозбуждению усилителя и превращению его в генератор. На этом принципе построены все генераторы как синусоидальных, так и несинусоидальных (релаксационных) колебаний.

### 6.4.2. LC-генераторы синусоидальных колебаний

Рассмотрим полупроводниковый автогенератор синусоидальных колебаний с параллельным контуром  $L_k C_k$  в коллекторной цепи транзистора и трансформаторной положительной обратной

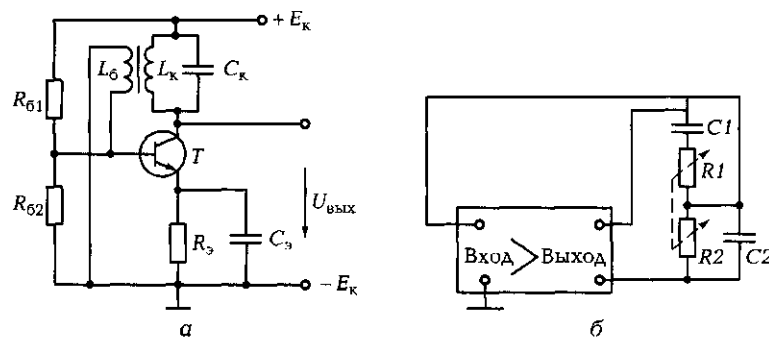


Рис. 6.45. Генераторы синусоидальных колебаний:  
 а — LC-генератор; б — RC-генератор с мостом Вина

связью по базе (рис. 6.45, а). При включении источника питания конденсатор  $C_k$  заряжается по цепи: « $+E_k$ » —  $C_k$  —  $T$  —  $R_3$  — « $-E_k$ ». Зарядившись до значения  $E_k$ , конденсатор  $C_k$  начинает разряжаться на катушку индуктивности  $L_k$ . При этом электрическая энергия конденсатора преобразуется в магнитную энергию катушки. Затем катушка индуктивности разряжается на конденсатор, т. е. магнитная энергия преобразуется вновь в электрическую, и т. д. В контуре возникают затухающие колебания с частотой  $f = 1/(2\pi\sqrt{L_k C_k})$ . Быстрота затухания колебаний определяется активным сопротивлением катушки  $R_k$ , на котором выделяется теплота, представляющая собой невосполнимые потери энергии. Если бы их не было, колебания не затухли бы.

Для устранения затуханий часть напряжения колебательного контура  $L_k C_k$  с помощью вторичной обмотки трансформатора  $L_6$  в фазе подается на базу транзистора. Благодаря этому колебания на резонансной частоте могут стать незатухающими. На выходе каскада также будут незатухающие колебания.

☛ Для возбуждения колебаний должно быть выполнено два условия:

- баланс амплитуд —  $\beta = 1/K$  ( $\beta K = 1$  — критическая положительная обратная связь);
- баланс фаз —  $\varphi_{\text{вых}} + \varphi_{\text{вх}} = 0$ , где  $\varphi_{\text{вых}}$  — фаза напряжения на выходе контура;  $\varphi_{\text{вх}}$  — фаза напряжения на базе транзистора.

Если эти условия будут выполнены для одной частоты, то на выходе генератора установятся синусоидальные колебания. Если балансы амплитуд и фаз имеют место для нескольких частот, то на выходе возникают несинусоидальные колебания. Изменение частоты генератора достигается за счет изменения параметров элементов контура:  $L_k$  или  $C_k$ .

Генераторы с параллельным  $LC$ -контуром нашли применение на высоких частотах.

### 6.4.3. $RC$ -генераторы синусоидальных колебаний

При низких частотах в  $LC$ -генераторах должны использоваться элементы контура со значительными индуктивностью и емкостью. Это усложняет конструкцию генератора.

Поэтому в низкочастотных цепях нашли применение  $RC$ -генераторы. В них используется частотно-зависимая положитель-

ная ОС, т. е. такая связь, у которой коэффициент ОС  $\beta$  и фаза сигнала  $\varphi$  зависят от частоты  $f$ .

Эта обратная связь может быть получена, если выходной сигнал с усилителя будет поступать на вход через фильтр, смещающий фазу на  $180^\circ$  и ослабляющий сигнал в  $\beta$  раз (рис. 6.45, б). Таковым может быть, например, фильтр, состоящий из спаренных резисторов  $R_1$  и  $R_2$  ( $R_1 = R_2$ ) и конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  ( $C_1 = C_2$ ). Он получил название моста Вина. На некоторой частоте  $f_p = 1/(2\pi RC)$  (резонансной) коэффициент  $\beta$  имеет максимальное значение ( $\beta = 1/3$ ), а  $\varphi_{\text{вых}} + \varphi_{\text{вх}} = 0$ .

На других частотах, отличных от  $f_p$ , коэффициент  $\beta$  резко падает, а фаза  $\varphi$  — увеличивается. Таким образом, мост Вина позволяет получить автоколебания на одной частоте, а следовательно, колебания синусоидальной формы. Для изменения частоты гармонических колебаний необходимо изменить резонансную частоту  $f_p$ . Это можно сделать, например, за счет одновременного изменения сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_2$ .

#### 6.4.4. Релаксационные генераторы

Часто на практике используются генераторы, форма колебаний на выходе которых резко отличается от синусоидальной. Она может быть пилообразной, прямоугольной, трапецеидальной и т. д. В основу работы таких генераторов наряду с положительной ОС положены зарядка и разрядка конденсаторов схемы. Данные генераторы называются релаксационными.

☛ В качестве генератора колебаний *пилообразной формы* может быть использована схема, состоящая из транзистора  $T$  с коллекторной нагрузкой  $R_k$  и конденсатора  $C$ , включенного между коллектором и эмиттером транзистора (рис. 6.46, а).

В исходном состоянии транзистор  $T$  закрыт и конденсатор  $C$  заряжается током  $i_3$  от источника  $E_k$  по цепи « $+E_k$ » —  $R_k$  —  $C$  — « $-E_k$ »

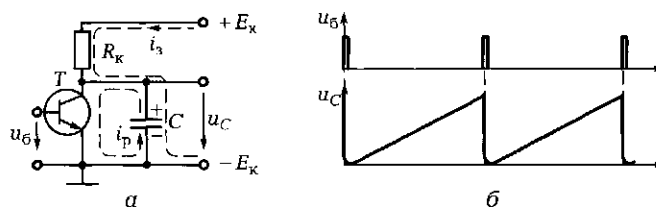


Рис. 6.46. Генератор пилообразного напряжения:

а — электрическая схема; б — временные диаграммы напряжений

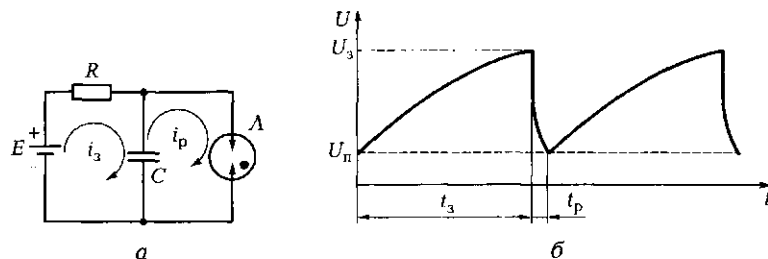


Рис. 6.47. Автогенератор пилообразного напряжения:  
 а — электрическая схема; б — временные диаграммы напряжений

по экспоненциальному закону. Начальный участок экспоненты, описывающей зависимость  $u_c(t)$ , является практически линейным. В момент прихода положительного импульса на базу транзистора  $T$  последний открывается и конденсатор  $C$  практически мгновенно разряжается (ток разрядки  $i_p$ ) через малое сопротивление открытого транзистора. После окончания действия положительного импульса транзистор вновь закрывается и начинается зарядка конденсатора  $C$  (рис. 6.46, б). Рассмотренная схема есть схема генератора с независимым возбуждением.

Если параллельно конденсатору  $C$ , заряжаемому от источника  $E$  через резистор  $R$ , подключить неоновую лампу  $A$ , то получим схему автогенератора (рис. 6.47, а). Пока неоновая лампа не зажглась, конденсатор заряжается по цепи « $+E_k$ » —  $R$  —  $C$  — « $-E_k$ ». Напряжение на конденсаторе плавно растет (по экспоненте) до тех пор, пока не достигнет напряжения зажигания неоновой лампы  $U_3$  (рис. 6.47, б). Сопротивление лампы в этот момент невелико, поэтому конденсатор быстро разряжается через нее до напряжения потухания  $U_n$ . Затем напряжение на конденсаторе вновь начинает расти, и процесс повторяется. На зажимах конденсатора устанавливаются незатухающие пилообразные колебания, частота которых определяется значениями емкости конденсатора и сопротивления резистора.

Наиболее широкое применение генераторы пилообразного напряжения, называемые также генераторами линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН), нашли в электронно-лучевых осциллографах. Они служат для перемещения электронного луча по горизонтали и быстрого его возврата в исходное положение (горизонтальная развертка). Кроме того, ГЛИН используют в схемах аналого-цифровых преобразователей, схемах широтно-импульсной модуляции и др.

## 6.4.5. Мультивибратор

➤ Генератор *прямоугольных* колебаний может быть построен по схеме мультивибратора, представляющего собой автогенератор, условие самовозбуждения которого выполняется в широком диапазоне частот. В связи с этим сигнал на выходе генератора содержит большое число гармоник и, как результат, является *прямоугольным*.

На рис. 6.48 изображена результирующая колебаний лишь для трех гармоник. Как видно, даже в этом случае форма сигнала приближается к *прямоугольной*.

В основу мультивибратора положен двухкаскадный усилитель со 100%-ной положительной обратной *RC*-связью (выходное напряжение полностью приложено к его входу) (рис. 6.49, а). Напряжение  $U_{\text{вых1}}$  через конденсатор *C1* подводится к базе транзистора *T2*, а напряжение  $U_{\text{вых2}}$  через конденсатор *C2* — к базе транзистора *T1*. Транзисторы работают в противофазе: если *T1* открыт, то *T2* закрыт, и наоборот.

Процесс перехода транзистора *T1* из открытого состояния в закрытое, а транзистора *T2* из закрытого в открытое происходит практически мгновенно в связи с тем, что схема усилителя имеет большой коэффициент усиления (положительная обратная связь повышает коэффициент усиления).

С выхода мультивибратора снимаются *прямоугольные* импульсы, длительность которых определяется параметрами *C* и  $R_6$ . Изменяя эти параметры, можно менять частоту колебаний в широких пределах.

Если  $C_1 = C_2$ ,  $R_{61} = R_{62}$ ,  $R_{к1} = R_{к2}$  и транзисторы идентичны, то на выходе мультивибратора будут *симметричные* импульсы (рис. 6.49, б),

при которых длительности импульса и паузы равны ( $T_{и} = T_{п}$ ).

Такой мультивибратор называется *симметричным*. Период колебаний  $T = T_{и} + T_{п}$  можно

приблизительно определить как  $T = 0,7R_{62}C_1 + 0,7R_{61}C_2$ .

Если необходимо получение коротких импульсов, следующих с большим промежутком

(рис. 6.49, в), то используется *несимметричный* мультиви-

братор, у которого  $C_1 \neq C_2$  или

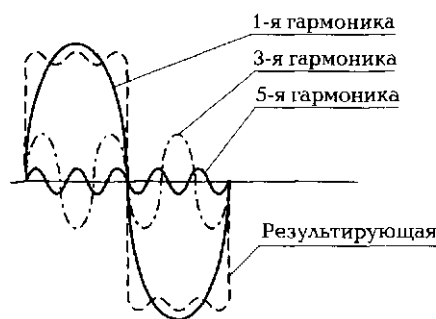


Рис. 6.48. Гармонические составляющие *прямоугольного* сигнала

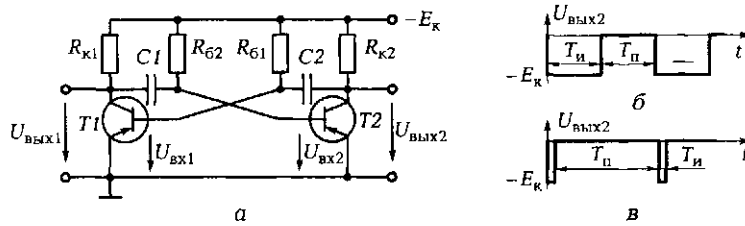


Рис. 6.49. Мультивибратор:  
 а — электрическая схема; б, в — временные диаграммы соответственно для симметричной и несимметричной схем

$R_{б1} \neq R_{б2}$ . Отношение периода колебаний к длительности импульса  $\gamma_{и} = T/T_{и}$  называется скважностью.

### 6.4.6. Триггер

Для сигнализации о том, что контролируемый параметр достиг заданного уровня, используются электронные реле — устройства, имеющие два устойчивых состояния равновесия.

Наиболее часто роль электронных реле выполняют *триггеры* — спусковые устройства с двумя устойчивыми состояниями равновесия (рис. 6.50, а).

В основу триггера положен двухкаскадный усилитель с положительной ОС (как и в мультивибраторе, но здесь отсутствуют зарядка и разрядка конденсаторов). Переход из одного состояния в другое происходит под действием внешних запускающих импульсов.

В рассматриваемом случае ( $n-p-n$ -транзистор) запускающими импульсами являются отрицательные импульсы, поступающие через диоды  $D1$  и  $D2$  на базы транзисторов  $T1$  и  $T2$ . Пусть  $T1$  открыт,

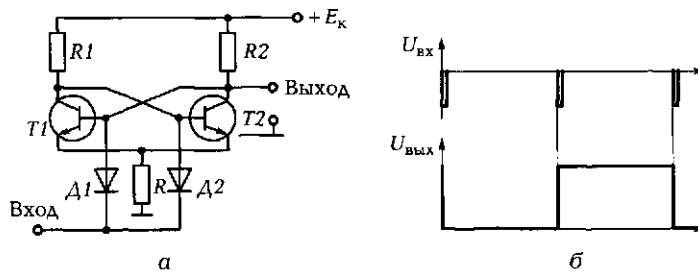


Рис. 6.50. Триггер:  
 а — электрическая схема; б — временные диаграммы напряжений на входе и выходе

а  $T_2$  закрыт. Отрицательный импульс через диод  $D_2$  не действует на транзистор  $T_2$  (он и так закрыт), а импульс через диод  $D_1$  поступает на базу транзистора  $T_1$  и закрывает его. Коллекторный ток через транзистор  $T_1$  уменьшается, и растет положительное напряжение на его коллекторе, которое подводится к базе транзистора  $T_2$  и открывает его. Появляется коллекторный ток через транзистор  $T_2$ , и напряжение на его коллекторе уменьшается, поступающая на базу  $T_1$  в фазе с запускающим импульсом (положительная ОС). Процесс перехода транзисторов  $T_1$  и  $T_2$  из одного устойчивого состояния равновесия в другое происходит практически мгновенно. Это позволяет получать на выходе триггера практически прямоугольные импульсы (рис. 6.50, б).

Триггеры используют также для подсчета электрических импульсов, для осуществления логических и арифметических операций в вычислительных машинах, в качестве устройств памяти и т. д.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. Для получения синусоидальных колебаний частотой 40 Гц используется  $RC$ -генератор с мостом Вина (см. рис. 6.45, б). Вычислите сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_2$  ( $R_1 = R_2$ ), если емкости конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  составляют по 10 мкФ.

*Решение.* Резонансная частота  $RC$ -генератора с мостом Вина  $f_p = 1/(2\pi RC)$ . Отсюда  $R = 1/(2\pi C f_p) = 1/(2\pi \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 40) = 400$  Ом.

*Ответ.* Для обеспечения частоты синусоидальных колебаний 40 Гц достаточно в  $RC$ -генераторе использовать резисторы с номинальной величиной сопротивления 400 Ом. Для точной установки резонансной частоты выбираем двойные переменные резисторы типа СП2-6В с максимальным сопротивлением 470 Ом.

2. На выходе симметричного мультивибратора (см. рис. 6.49, а, б) установились прямоугольные колебания частотой 100 Гц. Как необходимо изменить емкости конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ , чтобы при той же частоте колебаний скважность прямоугольных импульсов стала равна 10?

*Решение.* Период колебаний  $T = 1/f = 0,01$  с. Он определяется суммой емкостей конденсаторов  $C_1 + C_2$ . Для получения скважности  $\gamma_n = 10$  при  $R_{\sigma 1} = R_{\sigma 2}$  длительность импульса должна быть  $T_n = T/\gamma_n = 0,01/10 = 0,001$  с. При этом длительность паузы  $T_p = T - T_n = 0,009$  с. Таким образом, длительность импульса в 9 раз меньше длительности паузы, следовательно,  $C_1 = C_2/9$ .

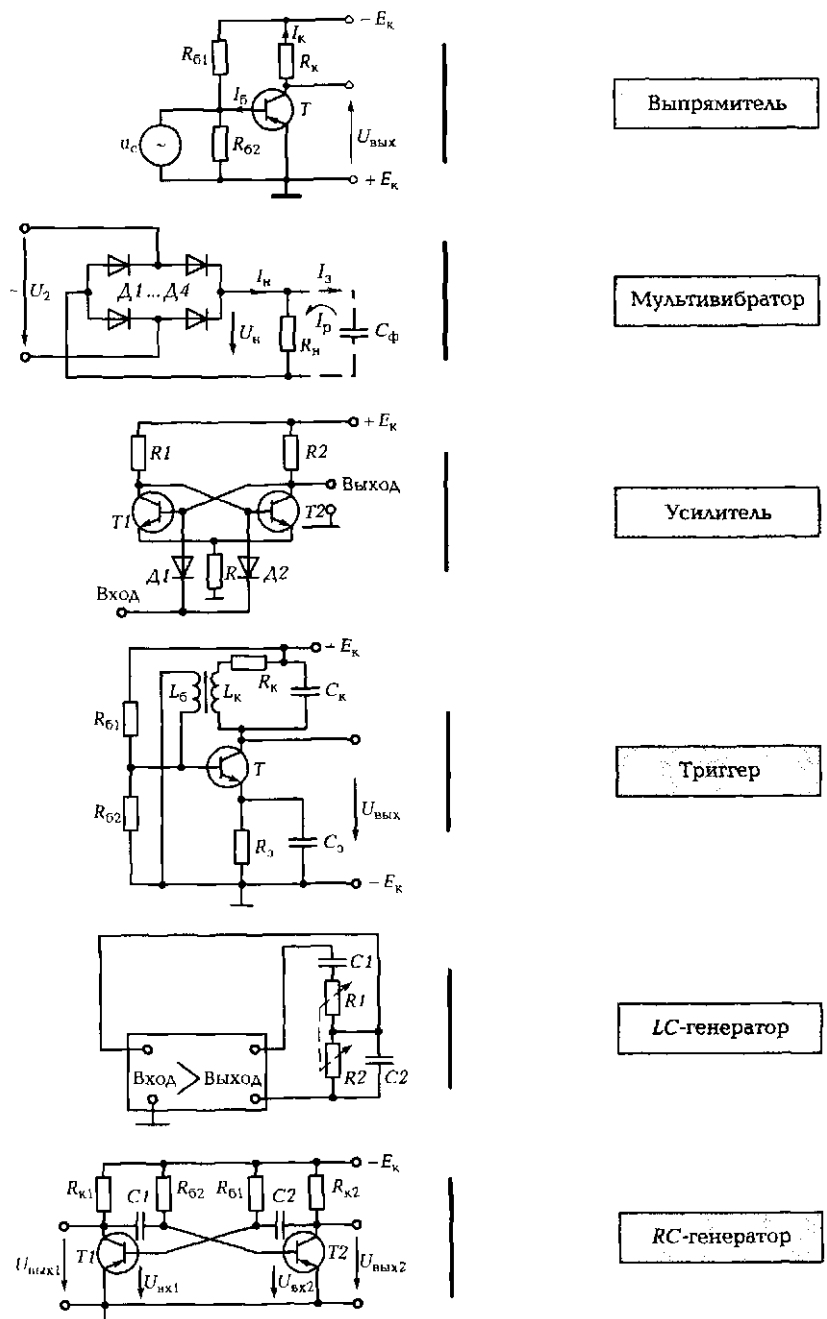


Рис. 6.51. Схемы электронных устройств к задаче 7 подразд. 6.4



*Ответ.* Для получения прямоугольных импульсов частотой 100 Гц со скважностью  $\gamma_n = 10$  емкость конденсатора  $C_1$  должна быть в 9 раз меньше емкости конденсатора  $C_2$ .

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

3. На выходе  $LC$ -генератора установились синусоидальные колебания частотой 12,5 кГц. При этом емкость конденсатора равна 0,16 мкФ. Какой должна быть емкость конденсатора, чтобы частота колебаний на выходе  $LC$ -генератора составляла 50 кГц?

4. В  $RC$ -генераторе с мостом Вина используются конденсаторы емкостью по 1 мкФ и переменные резисторы с номинальной величиной сопротивления 4,7 кОм. Определите диапазон частот на выходе генератора при изменении сопротивления в диапазоне от 2 до 4 кОм.

5. Определите частоту прямоугольных импульсов на выходе симметричного мультивибратора, если емкости конденсаторов составят по 4 700 пФ, сопротивление базового резистора равно 62 кОм, а сопротивление коллекторного резистора — 2,2 кОм.

6. Как изменится частота колебаний мультивибратора с параметрами, приведенными в задаче 5, если конденсаторы одинаковой емкости заменить на конденсаторы емкостями  $C_1 = 2\,200$  пФ и  $C_2 = 7\,200$  пФ? Чему будет равна скважность прямоугольных импульсов?

7. На рис. 6.51 от каждой электрической схемы проведите линию к ее названию.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Какая обратная связь используется в генераторах:
  - а) отрицательная;
  - б) равномерная;
  - в) симметричная;
  - г) положительная?
2. Почему в  $LC$ -генераторе без обратной связи колебания затухают:
  - а) разряжается батарея;
  - б) электрическая энергия преобразуется в теплоту на активном сопротивлении катушки;
  - в) конденсатор стареет;
  - г) индуктивность катушки уменьшается?

3. Можно ли возбудить  $RC$ -генератор при наличии двух  $RC$ -цепочек в обратной связи:
  - а) нельзя, так как сдвиг фаз меньше  $180^\circ$ ;
  - б) можно, так как сдвиг фаз больше  $90^\circ$ ;
  - в) можно при больших значениях емкостей;
  - г) можно при больших значениях сопротивлений?
4. Почему  $LC$ -генераторы используются в основном на высоких частотах:
  - а) на низких частотах велики параметры  $L$  и  $C$ ;
  - б) на высоких частотах велики параметры  $L$  и  $C$ ;
  - в) на высоких частотах проще настройка  $LC$ -контура;
  - г) на высоких частотах конденсаторы могут иметь меньшее рабочее напряжение?
5. В  $RC$ -генераторе емкость конденсатора увеличили в 2 раза. Как изменилась частота колебаний:
  - а) увеличилась в 2 раза;
  - б) уменьшилась в 3 раза;
  - в) увеличилась в 4 раза;
  - г) уменьшилась в 2 раза?
6. В  $LC$ -генераторе емкость конденсатора уменьшили в 4 раза. Как изменилась частота колебаний:
  - а) увеличилась в 2 раза;
  - б) уменьшилась в 3 раза;
  - в) увеличилась в 4 раза;
  - г) уменьшилась в 2 раза?
7. Что формируется на выходе симметричного мультивибратора:
  - а) синусоидальные колебания двойной частоты;
  - б) симметричные треугольные импульсы;
  - в) импульсы пилообразной формы;
  - г) симметричные прямоугольные импульсы?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14

### Испытания выпрямителей

#### 1. Цель работы

- 1.1. Изучить схемы построения выпрямителей и принцип их работы.
- 1.2. Изучить основные характеристики выпрямителей.
- 1.3. Выполнить наблюдение за временными процессами на основных элементах выпрямителей.

## 2. Объект и средства испытаний

Объектом испытаний являются однофазные выпрямители, построенные по схеме однополупериодного и двухполупериодного выпрямления.

Однополупериодный выпрямитель включает в себя вентиль  $D$ , сглаживающий фильтр  $C_{\phi}$  и нагрузочный резистор  $R_n$  (рис. А14.1).

Двухполупериодный выпрямитель содержит те же элементы, за исключением вентиля. В данном случае используются четыре полупроводниковых диода  $D1 — D4$ , включенные по мостовой схеме (рис. А14.2). Одна из диагоналей моста подключается к источнику синусоидального напряжения, а во вторую включается нагрузочный резистор сопротивлением 10 кОм.

Испытания выпрямителей выполняются с помощью электронного универсального вольтметра (мультиметра) и осциллографа, позволяющего наблюдать за временными процессами (осциллограммами напряжения) на основных элементах выпрямителей.

Входной синусоидальный сигнал на каждый из выпрямителей поступает с одной из фаз трехфазного источника напряжения частотой 50 Гц.

## 3. Задание к лабораторной работе

### *Выполняется при подготовке к работе*

3.1. Ознакомиться с порядком выполнения лабораторной работы, теоретическими сведениями по данной теме. Подготовить в рабочей тетради протокол испытаний.

3.2. Вычислить действующее значение основной гармоники ( $U_{осн}$ ) и среднее значение ( $U_{н.ср}$ ) выпрямленного напряжения для обеих схем при  $U_2 = 8$  В,  $f = 50$  Гц. Результаты вычислений занести в протокол испытаний.

### *Выполняется в лаборатории*

3.3. Собрать схему *однополупериодного* выпрямителя в соответствии с рис. А14.1 (без фильтра — конденсатор не подключать). После проверки ЭЦ преподавателем установить автоматы и выключатель УЗО в положение «Вкл.». Подать с помощью выключателя «Сеть» напряжение в ЭЦ, и на мультиметры. При этом должны загореться соответствующие сигнальные лампы.

Подать максимальное напряжение с одной из фаз трехфазного источника, установив ручку потенциометра «АМПЛ.» в крайнее положение, повернув ее до упора по часовой стрелке.

С помощью осциллографа выполнить наблюдение за характером сигналов на входе и выходе однополупериодного выпрямителя, установив на экране два-три периода колебаний. Сравнить результаты наблюдения с теоретическими данными.

3.4. С помощью мультиметра в режиме « $\sim U$ » измерить действующее значение синусоидального напряжения на входе выпрямителя  $U_{\text{вх}}$ . Результат занести в протокол испытаний. Считать  $U_{\text{вх}}$  в дальнейшем неизменным.

3.5. С помощью мультиметра в режиме « $\sim U$ » измерить на нагрузке  $R_{\text{н}}$  действующее значение основной гармоники выпрямленного напряжения  $U_{\text{осн}}$ , а в режиме « $=U$ » — среднее значение выпрямленного напряжения (постоянную составляющую)  $U_{\text{н.ср}}$ . Результаты занести в первую строку табл. А14.1 ( $C_{\text{ф}} = 0$ ).

3.6. Подключить параллельно нагрузочному резистору  $R_{\text{н}}$  сглаживающий фильтр и при каждом из трех значений емкости конденсатора  $C_{\text{ф}}$ , указанных в табл. А14.1, выполнить наблюдение с помощью осциллографа за изменением характера сигналов на выходе выпрямителя.

Руководствуясь п. 3.5, измерить действующее и среднее значения выпрямленного напряжения для каждого из трех значений емкости конденсатора. Результаты занести соответственно во вторую, третью и четвертую строки табл. А14.1.

3.7. Для исследования *двухполупериодного* выпрямителя собрать схему в соответствии с рис. А14.2 и повторить действия, изложенные в п. 3.3 — 3.6. Результаты измерений занести в табл. А14.2.

3.8. После согласования протокола испытаний с преподавателем ЭЦ обесточить и разобрать, проводники и мини-блоки убрать на место, рабочее место привести в порядок.

## 4. Протокол испытаний и отчет о работе № 14

### Испытания выпрямителей

4.1. Цель работы \_\_\_\_\_

---

---

---

---

4.2. Предварительные расчеты.

а)  $U_{\text{осн}} = U_2/2 =$  \_\_\_\_\_ ;  $U_{\text{н.ср}} = 0,45U_2 =$  \_\_\_\_\_ ;

б)  $U_{\text{осн}} = 4U_2/(3\pi) =$  \_\_\_\_\_ ;  $U_{\text{н.ср}} = 0,9U_2 =$  \_\_\_\_\_ .

4.3. Схемы электрических цепей и таблицы.

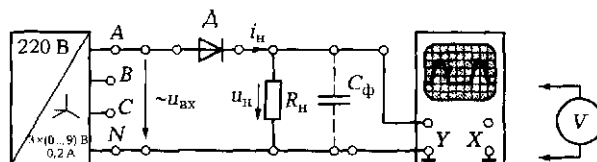


Рис. Л14.1. Схема ЭЦ для испытаний однополупериодного выпрямителя

$U_{вх} = \underline{\hspace{2cm}}$  В.

Таблица Л14.1				
$C_{\phi}$ , мкФ	$U_{осн}$ , В	$U_{н.ср}$ , В	$U_{осн\ макс}$ , В	$\rho$
0 (без фильтра)				
1				
10				
100				

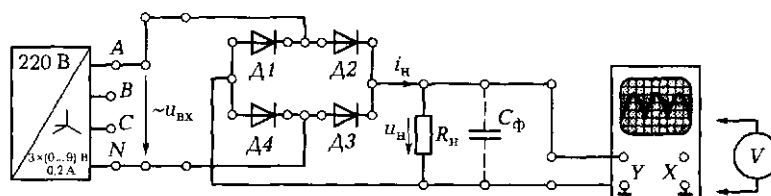


Рис. Л14.2. Схема ЭЦ для испытаний двухполупериодного выпрямителя

Таблица Л14.2				
$C_{\phi}$ , мкФ	$U_{осн}$ , В	$U_{н.ср}$ , В	$U_{осн\ макс}$ , В	$\rho$
0 (без фильтра)				
1				
10				
100				

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

#### 4.4. Расчетно-графическая часть.

Формулы для вычисления амплитуды основной гармоники выпрямленного напряжения и коэффициента пульсаций:

$$U_{\text{осн max}} = \sqrt{2}U_{\text{осн}}; p = U_{\text{осн max}}/U_{\text{н.ср}}$$

#### 4.5. Краткие выводы \_\_\_\_\_

---

---

---

---

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

### 5. Требования к расчетно-графической части отчета

5.1. На основании данных табл. Л14.1 вычислить амплитуду основной гармоники  $U_{\text{осн max}}$  и коэффициент пульсаций  $p$  выпрямленного напряжения для однополупериодной схемы выпрямления без фильтра и с фильтром. Результаты занести в соответствующие столбцы табл. Л14.1.

5.2. На основании данных табл. Л14.2 вычислить амплитуду основной гармоники  $U_{\text{осн max}}$  и коэффициент пульсаций  $p$  выпрямленного напряжения для двухполупериодной схемы выпрямления без фильтра и с фильтром. Результаты занести в соответствующие столбцы табл. Л14.2.

5.3. Сделать краткие выводы по работе.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие элементы входят в состав выпрямителя?
2. Назовите типы выпрямителей однофазного переменного тока.
3. Изобразите схему однополупериодного выпрямителя и поясните принцип его работы.
4. Изобразите схему двухполупериодного выпрямителя и поясните принцип его работы.
5. Назовите и охарактеризуйте основные параметры выпрямителя.
6. Укажите назначение фильтра. Назовите основные типы фильтров и принцип их действия.
7. Назовите основные параметры, определяющие выбор диодов для выпрямителя.

### Испытания двухкаскадного транзисторного усилителя

#### 1. Цель работы

- 1.1. Изучить электрическую схему усилителя и принцип его работы.
- 1.2. Изучить основные параметры и характеристики усилителя (коэффициент усиления, амплитудную и частотную характеристики) и влияние на них отрицательной обратной связи (ООС).

#### 2. Объект и средства испытаний

Объектом испытаний является двухкаскадный транзисторный усилитель с  $RC$ -связью между каскадами, собранный на базе мини-блоков «Усилительный каскад с общим эмиттером» и «Эмиттерный повторитель» (рис. Л15.1). Резистор  $R_k$  является коллекторной нагрузкой транзистора  $T1$ ; резистор  $R_{\beta 1}$  выполняет роль отрицательной обратной связи по току эмиттера  $T1$ ; резисторы  $R_{\beta 1}$  и  $R_{\beta 2}$  образуют базовый делитель, фиксирующий рабочую точку транзистора  $T1$  на линейном участке нагрузочной прямой; резистор  $R_{\beta 2}$  — эмиттерная нагрузка для транзистора  $T2$ ;  $R_6$  — ограничивающий резистор в цепи базы  $T2$ ;  $R_n$  — нагрузочный резистор;  $C_{p1}$ ,  $C_{p2}$  — разделительные конденсаторы;  $C_s$  — конденсатор, исключающий ООС по переменной составляющей;  $KT1$ ,  $KT2$ ,  $KT3$  — контрольные точки.

Входной сигнал относительно корпуса (зажим  $N$ ) подводится к  $KT1$ , выходной сигнал снимается с  $KT3$ .

Средства испытаний усилителя включают в себя электронный осциллограф, мультиметр, работающий совместно с мини-блоком «Измерительный преобразователь», и генератор напряжений специальной формы. Питание усилителя осуществляется постоянным напряжением +15 В, а измерительного преобразователя — напряжением +15 и –15 В. Необходимость присутствия измерительного преобразователя обусловлена тем, что диапазон частот мультиметров, входящих в состав стенда, составляет 40...400 Гц. Преобразователь представляет собой выпрямитель, у которого на вход подается синусоидальное напряжение частотой от 25 Гц до 100 кГц, а к выходу подключен мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения. При этом значение постоянного выходного напряжения равно действующему значению переменного входного

напряжения. Именно такая схема используется в универсальных вольтметрах для измерения переменного напряжения.

### 3. Задание к лабораторной работе

#### *Выполняется при подготовке к работе*

3.1. Ознакомиться с порядком выполнения лабораторной работы, теоретическими сведениями по данной теме. Оформить в рабочей тетради протокол испытаний.

3.2. Вычислить максимальное значение сигнала на входе усилителя  $U_{вх\max}$ , обеспечивающего работу в линейной зоне, если ЭДС источника питания  $E_k = 5$  В. Максимальная амплитуда выходного сигнала  $U_{вых\max}$  в процентах от  $E_k$  и коэффициент усиления  $K$  для различных вариантов показаны в табл. Л15.1.

Таблица Л.15.1								
№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{вых\max}$ , %	20	25	30	35	20	25	30	35
$K$	5	4	3	5	4	3	6	8

#### *Выполняется в лаборатории*

3.3. Собрать ЭЦ в соответствии со схемой, показанной на рис. Л15.1. Корпусные зажимы приборов и мини-блоков, обозначенные знаком  $\perp$ , соединить между собой и подключить к зажиму  $N$  трехфазного источника питания. После проверки ЭЦ преподавателем установить автоматы и выключатель УЗО в положение «Вкл.». Подать с помощью выключателя «Сеть» напряжение на ЭЦ и мультиметры. При этом должны загореться соответствующие сигнальные лампы.

Установить на выходе генератора (входе усилителя) синусоидальное напряжение ( $U_{вх} = 0,1$  В) частотой  $f = 2000$  Гц.

С помощью осциллографа убедиться в наличии сигнала на выходе усилителя. Установить на экране осциллографа устойчивое изображение выходного сигнала с двумя-тремя периодами колебаний. Выполнить наблюдение за формами и значениями сигналов в контрольных точках  $KT1$ ,  $KT2$ ,  $KT3$  и сравнить полученные формы и значения с теоретическими.

3.4. Определить коэффициенты усиления каждого из каскадов и усилителя в целом, для чего с помощью измерительного преобразователя и вольтметра измерить напряжения в контрольных точках



КТ1, КТ2, КТ3. Результаты измерений занести в строку «Без ОС» табл. Л15.2.

Вывести из цепи конденсатор  $C_3$  и вновь измерить напряжения в контрольных точках КТ1, КТ2, КТ3. Результаты измерений занести в строку «С ОС» табл. Л15.2.

3.5. Снять амплитудную характеристику усилителя  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  при постоянной частоте  $f = 2000$  Гц. Для этого, изменяя напряжение на входе усилителя в диапазоне от 0 до 0,3 В (6—8 значений), измерить с помощью вольтметра сигнал на выходе усилителя при наличии конденсатора  $C_3$  в цепи и после его выведения из ЭЦ. Одновременно наблюдать за формой сигнала на выходе усилителя по осциллографу. Результаты измерений занести в соответствующие строки табл. Л15.3 (при наличии конденсатора — в строку «Без ОС», при отсутствии — «С ОС»).

3.6. Снять частотную характеристику усилителя  $K = \psi(f)$  при постоянном напряжении на входе  $U_{\text{вх}} = 0,05$  В. Для этого, последовательно устанавливая частоту сигнала на выходе генератора равной значениям, приведенным в первой строке табл. Л15.4, измерить для каждого значения частоты напряжение на выходе усилителя при наличии конденсатора  $C_3$  в цепи и после его выведения. Результаты измерений занести в соответствующие строки табл. Л15.4 (при наличии конденсатора — в строку «Без ОС», при отсутствии — «С ОС»).

3.7. После согласования протокола испытаний с преподавателем ЭЦ обесточить и разобрать, проводники и мини-блоки убрать на место, рабочее место привести в порядок.

#### 4. Протокол испытаний и отчет о работе № 15

##### *Испытания двухкаскадного транзисторного усилителя*

4.1. Цель работы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

4.2. Формулы и предварительные расчеты.

$E_k = 5$  В;  $K =$  \_\_\_\_\_;  $U_{\text{вых max}} =$  \_\_\_\_\_;  $U_{\text{вх max}} =$  \_\_\_\_\_.

4.3. Схема электрической цепи и таблицы.

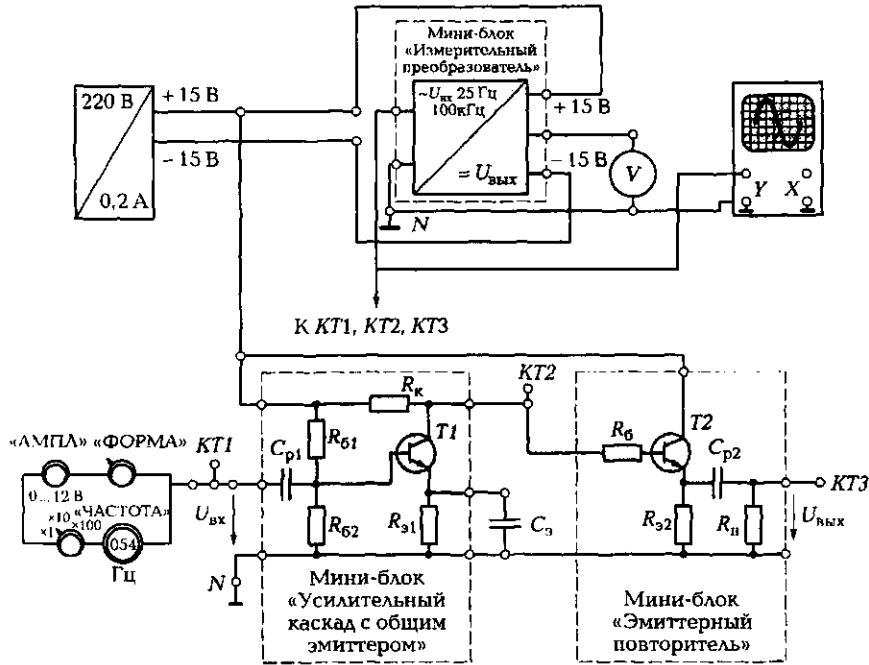


Рис. П15.1. Схема ЭЦ для испытаний усилителя

Таблица П15.2

Режим работы усилителя	$U_{KT1}$ , В	$U_{KT2}$ , В	$U_{KT3}$ , В
С ОС			
Без ОС			

Таблица Л15.3

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{вых}$ , В	0							0,3
$U_{max}$ , В, с ОС								
$U_{max}$ , В, без ОС								

Таблица Л15.4								
№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$f$ , кГц	0,02	0,1	2	10	50	100	150	200
$U_{\text{вых}}$ , В, с ОС								
$U_{\text{вых}}$ , В, без ОС								

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_  
 Преподаватель \_\_\_\_\_

#### 4.4. Расчетно-графическая часть.

Используемые формулы:

$$K_1 = U_{\text{КТ2}}/U_{\text{КТ1}}; K_2 = U_{\text{КТ3}}/U_{\text{КТ2}}; K = U_{\text{КТ3}}/U_{\text{КТ1}} = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$$

Таблица Л15.5				
Режим работы усилителя	$K_1$	$K_2$	$K_1K_2$	$K$
С ОС				
Без ОС				

Таблица Л15.6								
№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$f$ , кГц	0,02	0,1	2	10	50	100	150	200
$K$ с ОС								
$K$ без ОС								

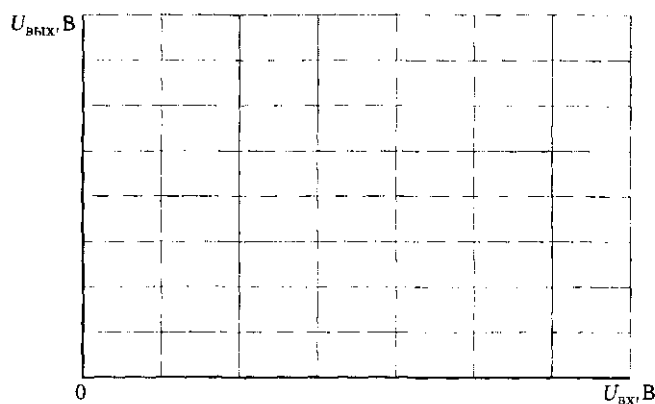


Рис. Л15.2.  
Амплитудные  
характеристи-  
ки усилителя

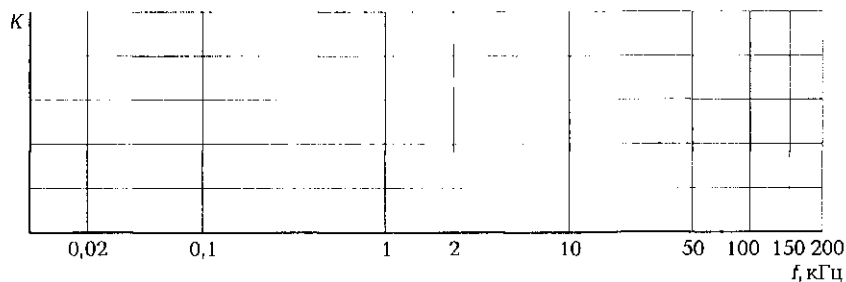


Рис. Л15.3. Частотные характеристики усилителя

4.5. Краткие выводы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

### 5. Требования к расчетно-графической части отчета

5.1. На основании данных табл. Л15.2 вычислить для каждого каскада и усилителя в целом коэффициент усиления. Результаты занести в табл. Л15.5.

5.2. На основании данных табл. Л15.3 построить на рис. Л15.2 амплитудные характеристики усилителя  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  при наличии обратной связи и без нее. Пользуясь построенными характеристиками, определить диапазон линейной работы усилителя и его коэффициент усиления.

5.3. На основании данных табл. Л15.4 вычислить коэффициенты усиления усилителя при наличии обратной связи и без нее для приведенных значений частоты  $f$ . Результаты занести в табл. Л15.6. Пользуясь результатами вычислений, построить в одной системе координат на рис. Л15.3 зависимости  $K = \psi(f)$  при наличии обратной связи и без нее. Значения частот по оси абсцисс откладываются в логарифмическом масштабе. Определить нижнюю и верхнюю границы полосы пропускания для  $K_{\text{в}} = K_{\text{н}} = 0,7K_0$  и полосу пропускания  $\Delta f = f_{\text{в}} - f_{\text{н}}$ .

5.4. Сделать краткие выводы по работе.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Какие основные элементы входят в состав транзисторного усилителя?
2. Объясните назначение элементов в схеме, показанной на рис. П15.1, и принцип работы собранного по этой схеме усилителя.
3. Нарисуйте вольт-амперные характеристики транзистора.
4. Назовите основные параметры и характеристики усилителя.
5. Что такое отрицательная обратная связь в усилителе, какое влияние она оказывает на его характеристики?
6. Назовите виды межкаскадных связей в многокаскадных усилителях.
7. Какой вид связи используется в усилителях постоянного тока и почему?
8. Что такое полоса пропускания усилителя и как она определяется?
9. К чему может привести использование положительной обратной связи в усилителе?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16

---

### Испытания стабилизаторов постоянного напряжения

#### 1. Цель работы

- 1.1. Изучить схемы построения стабилизаторов напряжения и принцип их работы.
- 1.2. Провести испытания параметрического и компенсационного стабилизаторов.

#### 2. Объект и средства испытаний

Объектом испытаний являются параметрический и компенсационный стабилизаторы напряжения постоянного тока.

Параметрический стабилизатор (рис. А16.1) включает в себя полупроводниковый стабилитрон  $D$  и балластный резистор  $R_b$ . Нагрузочные резисторы  $R_{н1}$  и  $R_{н2}$  подключаются параллельно стабилитрону.

Компенсационный стабилизатор, выполненный в виде мини-блока (рис. А16.2), включает в себя регулирующее устройство, роль

которого выполняет транзистор  $T$ , и управляющее устройство, состоящее из параметрического стабилизатора и операционного усилителя  $ОУ$ . На вход усилителя подаются два сигнала: сигнал обратной связи, представляющий собой часть сигнала с выхода стабилизатора, и опорный сигнал со стабилитрона  $D$ . Выход усилителя подключен к входу регулирующего устройства — базе транзистора  $T$ .

Входным напряжением стабилизаторов является регулируемое напряжение от источника постоянного тока  $0 \dots +13 \text{ В}$ .

Измерения напряжений на входе и выходе стабилизаторов выполняются с помощью мультиметра в режиме измерения постоянного напряжения.

### **3. Задание к лабораторной работе**

#### ***Выполняется при подготовке к работе***

3.1. Ознакомиться с порядком выполнения лабораторной работы, теоретическими сведениями по данной теме. Подготовить в рабочей тетради протокол испытаний.

3.2. В соответствии с данными табл. А16.1 для своего варианта рассчитать параметрический стабилизатор, вычислив сопротивление балластного резистора  $R_5$  и максимальное значение тока через стабилитрон  $I_{ст\max}$ . Результаты расчетов привести в протоколе испытаний.

#### ***Выполняется в лаборатории***

##### ***Испытания параметрического стабилизатора***

3.3. Собрать ЭЦ в соответствии со схемой, показанной на рис. А16.1. В качестве нагрузочного резистора  $R_{н1}$  использовать резистор сопротивлением  $22 \text{ Ом}$ , а в качестве  $R_{н2}$  — резистор сопротивлением  $150 \text{ Ом}$ . Тип стабилитрона  $D$  — КС456А. После проверки схемы преподавателем подать на нее электропитание, при этом должны загореться соответствующие сигнальные лампы.

3.4. Изменяя напряжение на входе стабилизатора  $U_{вх}$  от нуля до максимального значения, для шести значений  $U_{вх}$  измерить соответствующие им значения выходного напряжения  $U_{вых}$ . Результаты измерений занести в табл. А16.2.

3.5. Установить максимальное напряжение на входе стабилизатора и, изменяя сопротивление нагрузочного резистора  $R_{н2}$  в соответствии со значениями, указанными в табл. А16.3, снять зависимость выходного напряжения стабилизатора от тока нагрузки  $U_{вых} = f(I_{н})$ ,

т. е. измерить при всех приведенных значениях  $R_{н2}$  соответствующие им значения  $I_{н}$  и  $U_{вых}$ . Результаты измерений занести в табл. А16.3. Отключить питание ЭЦ.

#### *Испытания компенсационного стабилизатора*

3.6. Собрать ЭЦ в соответствии со схемой, показанной на рис. А16.2. В качестве компенсационного стабилизатора использовать соответствующий мини-блок, а в качестве нагрузки — резисторы сопротивлением  $R_{н1} = 22 \text{ Ом}$  и  $R_{н2} = 150 \text{ Ом}$ . После проверки схемы преподавателем подать на нее электропитание, при этом должны загореться соответствующие сигнальные лампы.

3.7. С помощью потенциометра мини-блока установить на выходе стабилизатора напряжение в диапазоне 4...6 В. Изменяя напряжение на входе стабилизатора  $U_{вх}$  от нуля до максимального значения, для шести значений  $U_{вх}$  измерить соответствующие им значения выходного напряжения  $U_{вых}$ . Результаты измерений занести в табл. А16.4.

3.8. Установить максимальное напряжение на входе стабилизатора и, изменяя сопротивление нагрузочного резистора  $R_{н2}$  в соответствии со значениями, указанными в табл. А16.5, снять зависимость выходного напряжения стабилизатора от тока нагрузки  $U_{вых} = f(I_{н})$ , т. е. измерить при всех приведенных значениях  $R_{н2}$  соответствующие им значения  $I_{н}$  и  $U_{вых}$ . Результаты измерений занести в табл. А16.5.

3.9. После согласования протокола испытаний с преподавателем стенд обесточить, ЭЦ разобрать, проводники и мини-блоки убрать на место, рабочее место привести в порядок.

### **4. Протокол испытаний и отчет о работе № 16**

#### ***Испытания стабилизаторов постоянного напряжения***

4.1. Цель работы \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

---

---

---

4.2. Формулы и предварительные расчеты.

Таблица Л16.1								
№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{вх}$ , В	24	12	36	12	24	36	12	36
$U_{вых}$ , В	8	5,6	15	6,8	13	22	8,2	27
$I_H$ , мА	0,05	0,4	0,1	0,4	0,05	0,1	0,4	0,1

Вариант № \_\_\_\_\_;  $U_{вх} = \text{_____} \pm \text{_____}$ ;  $U_{вых} = \text{_____}$ ;  $I_H = \text{_____}$ ;  
 $R_0 = (U_{вх \text{ min}} - U_{вых})/I_H$ ;  $I_{ст \text{ max}} = (U_{вх \text{ max}} - U_{вых})/R_0 - I_H$ ;  
 $R_0 = \text{_____}$ ;  $I_{ст \text{ max}} = \text{_____}$ .

4.3. Схема ЭЦ и таблицы.

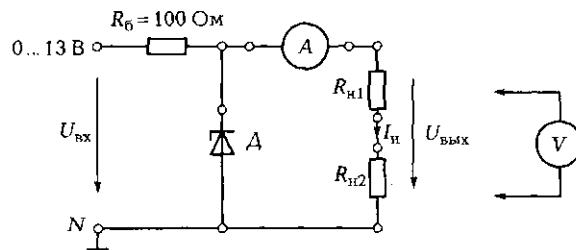


Рис. Л16.1. Схема ЭЦ для испытаний параметрического стабилизатора напряжения

Таблица Л16.2						
№ опыта	1	2	3	4	5	6
$U_{вх}$ , В						
$U_{вых}$ , В						

Таблица Л16.3						
№ опыта	1	2	3	4	5	6
$R_{н2}$ , Ом	150	100	47	33	22	10
$I_H$ , мА						
$U_{вых}$ , В						



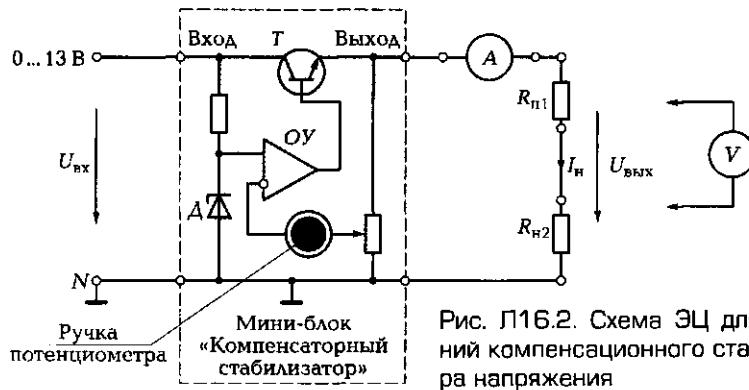


Рис. П16.2. Схема ЭЦ для испытан- ный компенсационного стабилиза- ра напряжения

Таблица П16.4						
№ опыта	1	2	3	4	5	6
$U_{вх}, В$						
$U_{вых}, В$						

Таблица П16.5						
№ опыта	1	2	3	4	5	6
$R_{н2}, Ом$	150	100	47	33	22	10
$I_{н}, мА$						
$U_{вых}, В$						

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_  
 Преподаватель \_\_\_\_\_

4.4. Расчетно-графическая часть.

$$K_{ст1} = (\Delta U_{вх} / U_{вх,ном}) / (\Delta U_{вых} / U_{вых,ном});$$

$$K_{ст2} = (\Delta I_{н} / I_{н,ном}) / (\Delta U_{вых} / U_{вых,ном}).$$

Таблица П16.6			
Параметрический стабилизатор		Компенсационный стабилизатор	
$K_{ст1}$	$K_{ст2}$	$K_{ст1}$	$K_{ст2}$

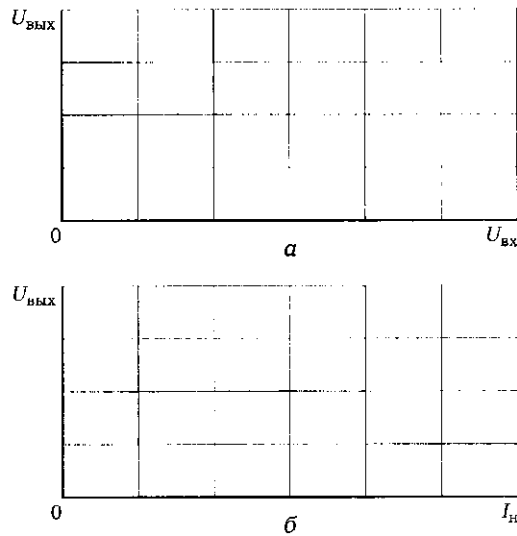


Рис. Л16.3. Зависимости напряжения на выходах параметрического и компенсационного стабилизаторов:

*а* – от входного напряжения, *б* – от тока нагрузки

4.5. Краткие выводы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

### 5. Требования к расчетно-графической части отчета

5.1. На основании данных табл. Л16.2 и Л16.3 для параметрического стабилизатора построить на рис. Л16.3, *а* и *б* зависимости соответственно  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$  и  $U_{\text{ВЫХ}} = f(I_{\text{Н}})$ . На полученных графиках выделить участки характеристик со стабильным выходным напряжением.

5.2. На основании данных табл. Л16.4 и Л16.5 для компенсационного стабилизатора на тех же рис. Л16.3, *а* и *б* построить аналогичные зависимости. На полученных графиках выделить участки характеристик со стабильным выходным напряжением.

5.3. Для выделенных участков определить коэффициенты стабилизации  $K_{ст1}$  и  $K_{ст2}$ . При расчетах за номинальные значения напряжений ( $U_{вх.ном}$ ,  $U_{вых.ном}$ ) и токов ( $I_{н.ном}$ ) принять значения, относящиеся к середине зон стабилизации. Результаты занести в табл. А16.6.

5.4. По результатам испытаний и расчетов сделать краткие выводы.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

---

1. Укажите назначение стабилизатора напряжения.
2. Какие типы стабилизаторов напряжения используются в технике?
3. Назовите основные характеристики стабилизаторов напряжения.
4. Изобразите схему параметрического стабилизатора и назовите основные его элементы.
5. Поясните принцип действия параметрического стабилизатора.
6. Назовите основные элементы компенсационного стабилизатора напряжения.
7. Поясните принцип действия компенсационного стабилизатора при изменении входного напряжения.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

## 7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ. КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

### ТЕОРИЯ

#### 7.1.1. Основные понятия и определения

☛ Под электрическими машинами (ЭМ) понимают электромагнитные устройства, преобразующие:

- механическую энергию в электрическую (генераторы);
- электрическую энергию в механическую (двигатели);
- электрическую энергию одного вида в электрическую энергию другого вида (трансформаторы, электромашинные преобразователи).

Электромашинные генераторы — основной вид источников электрической энергии.

Электрические двигатели — один из основных видов источников механической энергии.

К концу XIX в. были созданы практически все основные виды ЭМ, разработаны основы их теории. С тех пор идет непрерывный процесс совершенствования ЭМ. Если в начале XX в. мощность генератора не превышала 5 МВт, то сегодня успешно эксплуатируется генератор мощностью в 1 000 МВт (Курская АЭС). Имеется возможность получения мощности до 5 000 МВт при использовании криогенной техники и явления сверхпроводимости. Совершенствуются и трансформаторы — необходимые устройства в системе передачи электроэнергии. Если в начале прошлого века напряжение линии электропередачи (ЛЭП) не превышало 50 кВ, то сегодня оно может достигать 1 500 кВ, при этом передаваемая мощность возросла до 3 000 МВ·А.

Все электрические машины можно подразделить на два типа:

- ЭМ постоянного тока;
- ЭМ переменного тока (в их числе трансформаторы).

### 7.1.2. Принципы, положенные в основу работы электрических машин

☛ В основу работы любой электрической машины положены два принципа:

- *электромагнитной индукции*, согласно которому в проводнике длиной  $l$ , перемещаемом со скоростью  $v$  в магнитном поле с индукцией  $B$ , индуцируется ЭДС, определяемая по формуле Фарадея:

$$e = lBv;$$

- *электромагнитных сил*, согласно которому на проводник длиной  $l$  с током  $i$ , помещенный в магнитное поле с индукцией  $B$ , действует электромагнитная сила, определяемая по формуле Ампера:

$$F_{\text{эм}} = lBi.$$

Первый принцип положен в основу работы генератора. Направление индуцируемой ЭДС определяется по правилу правой руки (*генератор — правая рука*), которое гласит: если правую руку расположить так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в ладонь, а отогнутый большой палец указывал направление движения проводника, то вытянутые четыре пальца укажут направление ЭДС.

Второй принцип положен в основу работы двигателя. Направление силы, действующей на проводник, определяется по правилу левой руки (*двигатель — левая рука*), формулируемому следующим образом: если левую руку расположить так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в ладонь, а вытянутые четыре пальца указывали направление тока в проводнике, то отогнутый большой палец укажет направление силы.

Электрическая мощность  $ei$  может быть преобразована в механическую:

$$ei = Blv \frac{F_{\text{эм}}}{Bl} = F_{\text{эм}} v.$$

В свою очередь, механическая мощность  $F_{\text{эм}} v$  может быть преобразована в электрическую:

$$F_{эм} v = iBl \frac{e}{Bl} = ei.$$

Отсюда следует принцип обратимости ЭМ, т. е. их способность работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

☛ Для работы любой ЭМ необходимо наличие магнитного поля и проводников, по которым может течь ток. В процессе работы происходит перемещение проводников относительно магнитного поля.

Конструктивно ЭМ состоят из двух основных частей: неподвижного статора и подвижного ротора. Обе части машины, как правило, несут на себе обмотки.

У трансформатора подвижная часть (ротор) отсутствует.

### 7.1.3. Назначение, конструктивная схема и принцип действия трансформатора

☛ *Трансформатор* — это статический (т. е. не имеющий подвижных частей) электромагнитный аппарат, который служит для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Основное назначение трансформатора — передача электрической энергии от источника к потребителю.

В основе работы трансформатора лежит явление взаимной индукции, т. е. возможность передачи энергии с помощью электромагнитного поля от одной обмотки к другой (см. подразд. 4.3.2).

Конструктивные схемы трансформаторов различны, но все они имеют (рис. 7.1, а):

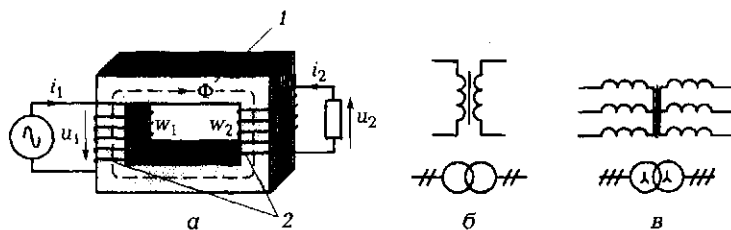


Рис. 7.1. Трансформаторы:

а — конструктивная схема; б, в — условные графические изображения соответственно однофазного и трехфазного трансформаторов; 1 — магнитопровод;  $w$  — обмотки

- магнитопровод  $1$ , в качестве которого используются ферромагнитные материалы (трансформаторное железо, электротехническая листовая сталь или ферриты). Он служит для усиления магнитной связи между обмотками за счет уменьшения магнитного сопротивления;
- обмотки  $2$  (две или более) из изолированного провода, располагаемые на магнитопроводе и сцепленные общим магнитным потоком.

На рис. 7.2 показан внешний вид некоторых трансформаторов, используемых в радиотехнике.

В промышленности наибольшее применение на частотах 50 ... 400 Гц нашли магнитопроводы из листовой стали с толщиной листа 0,5 или 0,35 мм (вспомним, что для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод изготавливается из отдельных электрически изолированных пластин  $1$  — рис. 7.3).

В системе электропередачи трансформаторы являются необходимым элементом. Без трансформатора практически невозможна передача электроэнергии большой мощности на дальние расстояния, что обусловлено значительными потерями в ЛЭП при низких напряжениях. Мощность потерь

$$P_{\text{п}} = I^2 R_{\text{ЛЭП}} = I^2 \frac{\rho l}{S_{\text{пр}}} = \frac{S^2 \rho l U j}{U^2 S} = \frac{S l \rho j}{U},$$

где  $S$  — полная мощность, В·А;  $l$  — длина ЛЭП, м;  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление материала проводов ЛЭП (для алю-

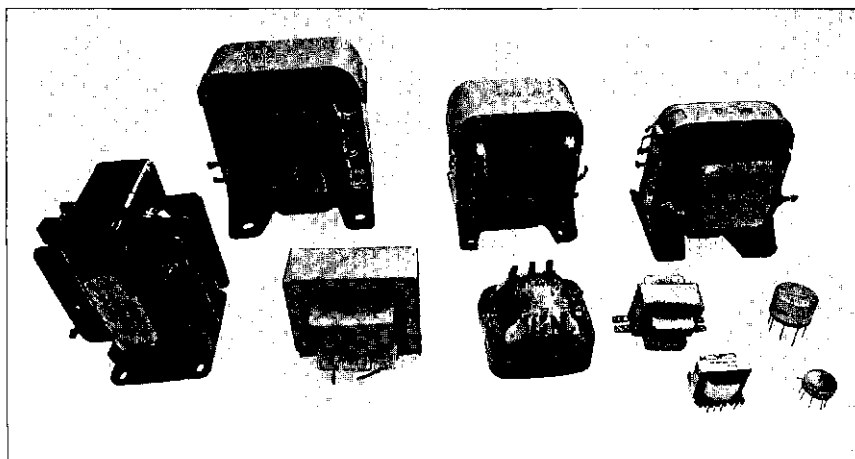


Рис. 7.2. Трансформаторы, используемые в радиотехнике

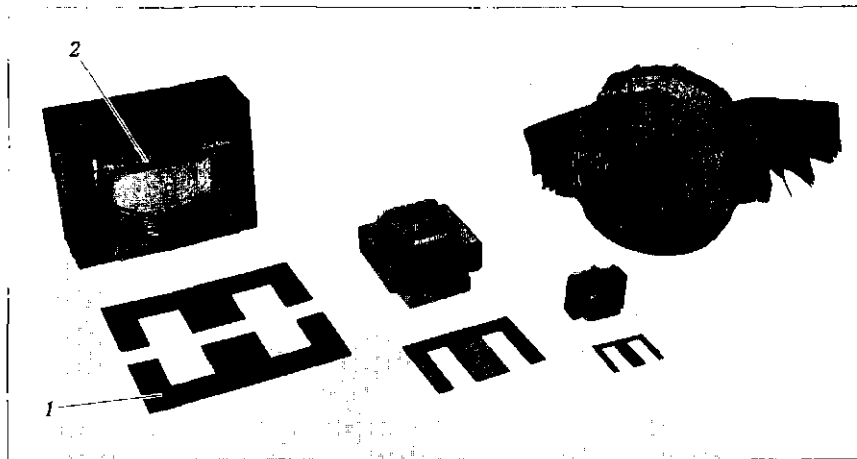


Рис. 7.3. Составные части трансформатора:  
1 — пластины; 2 — катушка с обмоткой

миния  $\rho = 0,029 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ );  $S_{\text{пр}}$  — площадь поперечного сечения провода,  $\text{мм}^2$ ;  $j$  — плотность тока,  $\text{А}/\text{мм}^2$ .

Пусть мощность источника  $500 \text{ МВ} \cdot \text{А}$  необходимо передать на расстояние  $500 \text{ км}$ . Если передача будет осуществляться при напряжении  $250 \text{ кВ}$ , то потери в алюминиевом проводе ЛЭП при плотности тока  $2 \text{ А}/\text{мм}^2$  составят около  $60 \text{ МВт}$ , т. е.  $12\%$  передаваемой мощности. Если повысить напряжение до  $750 \text{ кВ}$ , то потери снизятся до  $20 \text{ МВт}$ , что составит  $4\%$  передаваемой мощности. Это считается вполне допустимым.

Таким образом, мощность потерь в ЛЭП обратно пропорциональна напряжению, при котором осуществляется передача.

☛ Чем выше напряжение, тем меньше потери в ЛЭП.

Площадь сечения проводов также обратно пропорциональна напряжению:

$$S_{\text{пр}} = \frac{k}{U}.$$

☛ Чем выше напряжение, тем меньшее сечение проводов ЛЭП может быть использовано.

По назначению трансформаторы подразделяют на силовые и специального назначения (автотрансформаторы, измерительные, сварочные и др.).

Силовые трансформаторы могут быть однофазными и трехфазными, повышающими и понижающими.



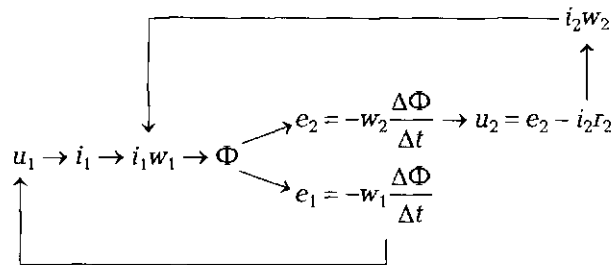
Условные графические изображения однофазного трансформатора показаны на рис. 7.1, б, трехфазного — на рис. 7.1, в. Нижние изображения на указанных рисунках используются в схемах с большим числом трансформаторов, например в схемах передачи и распределения электрической энергии, схемах трансформаторных подстанций.

Основные параметры трансформатора, приводимые в паспортных данных или на щитке:

- полная (кажущаяся) мощность, В·А или кВ·А;
- линейные токи, А;
- линейные напряжения, В или кВ;
- частота, Гц.

☛ В основу работы трансформатора положен принцип электромагнитной индукции. Если к первичной обмотке трансформатора с числом витков  $w_1$  подводится переменное синусоидальное напряжение  $u_1 = U_m \sin \omega t$ , то по обмотке начинает течь ток  $i_1$ , который создает намагничивающую силу (н. с.)  $i_1 w_1$ . Под действием н. с. в сердечнике возникает переменный магнитный поток  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ , наводящий в первичной обмотке ЭДС самоиндукции  $e_1 = -w_1 \Delta\Phi / \Delta t$ , которая стремится уравновесить приложенное напряжение  $u_1$ , а во вторичной обмотке с числом витков  $w_2$  — ЭДС взаимной индукции  $e_2 = -w_2 \Delta\Phi / \Delta t$ . Именно эта ЭДС является причиной появления на нагрузке напряжения  $u_2 = e_2 - i_2 r_2$ , где  $i_2$  — ток во вторичной обмотке;  $r_2$  — активное сопротивление вторичной обмотки.

Сказанное ранее можно представить в виде следующей схемы:



Магнитный поток в сердечнике при работе трансформатора под нагрузкой определяется результирующей намагничивающих сил первичной и вторичной обмоток, равной  $i_1 w_1 - i_2 w_2$ , а на холостом ходу — только намагничивающей силой первичной обмотки  $i_0 w_1$ , где  $i_0$  — ток холостого хода трансформатора.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. Подвижная катушка магнитоэлектрического прибора имеет активную длину витка  $l_b = 10$  мм, число витков  $w = 15$ , радиус катушки  $r = 1$  см. Постоянный магнит прибора создает магнитное поле индукцией  $B = 0,8$  Тл. Определите, при каком значении тока подвижная система прибора отклонится на угол  $30^\circ$ , если жесткость механической пружины  $k_\alpha = 1,2 \cdot 10^{-6}$  Н·м/град.

*Решение.* Для вычисления тока воспользуемся формулой Ампера  $F_{эм} = lBI$ , где в нашем случае  $l$  — активная длина проводников катушки, равная произведению  $l_b w$ . При этом электромагнитную силу  $F_{эм}$  определим исходя из того, что при установившемся отклонении подвижной системы электромагнитный вращающий момент  $M_{вр} = F_{эм} r$  равен противодействующему моменту пружины  $M_{пр} = k_\alpha \alpha$ . Таким образом, выражение для тока принимает вид:  $I = k_\alpha \alpha / (lBr)$ . Отсюда  $I = 1,2 \cdot 10^{-6}$  Н·м/град.  $\cdot 30$  град. /  $(15 \cdot 10^{-2}$  м  $\cdot 0,8$  Тл  $\cdot 10^{-2}$  м) = 0,03 А = 30 мА.

*Ответ.* Подвижная система прибора отклонится на  $30^\circ$  при токе 30 мА.

2. Проводник длиной  $l = 20$  см перемещается равномерно со скоростью 50 мм/с в постоянном магнитном поле индукцией  $B = 1,2$  Тл (рис. 7.4). Определите величину и направление индуцируемой в проводнике ЭДС. Как изменится значение ЭДС, если скорость перемещения проводника возрастет в 10 раз? Как изменится направление ЭДС, если направление движения проводника и направление силовых линий магнитного поля одновременно изменить на противоположные?

*Решение.* Значение ЭДС определяем по формуле Фарадея:  $E = lBv = 0,2$  м  $\cdot 1,2$  Тл  $\cdot 0,05$  м/с = 0,012 В = 12 мВ. Направление ЭДС

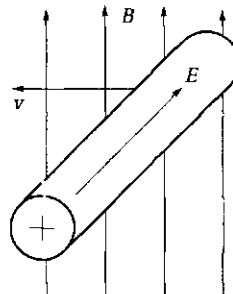


Рис. 7.4. Проводник, перемещающийся в магнитном поле (к задаче 2 подразд. 7.1)

определяем по правилу правой руки. Оно показано на рис. 7.4. Если скорость  $v$  возрастет в 10 раз, то и ЭДС возрастет в 10 раз и станет равной 0,12 В. При одновременном изменении направлений движения проводника и силовых линий магнитного поля направление ЭДС не изменится, в чем легко убедиться, пользуясь правилом правой руки.

*Ответ.* Индуцируемая ЭДС равна 12 мВ. При увеличении скорости перемещения проводника в 10 раз ЭДС возрастет до 0,12 В. При изменении указных направлений направление ЭДС останется тем же.

3. К первичной обмотке трансформатора подведено напряжение 10 В *постоянного* тока, коэффициент трансформации  $k_{21} = 10$ . Каким будет напряжение на вторичной обмотке трансформатора?

*Решение.* Как известно, в основе работы трансформатора лежит явление взаимной индукции, заключающееся в появлении ЭДС во вторичной обмотке при пересечении ее *переменным* магнитным потоком. Подведение к первичной обмотке *постоянного* напряжения вызовет протекание в ней *постоянного* тока, в результате чего возникнут *постоянная* намагничивающая сила и *постоянный* магнитный поток  $\Phi$ . Такой поток не способен наводить ЭДС во вторичной обмотке, поскольку скорость его изменения  $\Delta\Phi/\Delta t = 0$ , а значит, и  $e_2$  и  $u_2$  будут равны нулю.

*Ответ.* Напряжение на вторичной обмотке также будет равно нулю.

4. Что произойдет, если магнитопровод трансформатора изготовить не из тонких штампованных изолированных электрически друг от друга пластин трансформаторной стали, а из сплошного куска лучшей электротехнической стали?

*Ответ.* Магнитопровод будет нагреваться сильнее, возрастут магнитные потери, снизится КПД трансформатора.

5. Как изменится магнитный поток в трансформаторе при переходе от режима холостого хода к номинальному режиму?

*Ответ.* Магнитный поток не изменится, поскольку амплитуда переменного магнитного потока определяется амплитудой переменного напряжения, приложенного к первичной обмотке. На холостом ходу магнитный поток создается намагничивающей силой, определяемой током холостого хода. В номинальном режиме работы результирующая намагничивающая сила определяется разностью намагничивающих сил первичной и вторичной обмоток  $I_0 w_1 = I_1 w_1 - I_2 w_2$ , которая равна намагничивающей силе на холостом ходу.

## Задачи и вопросы для самостоятельного решения

6. Якорь (ротор) машины постоянного тока приводится в действие двигателем, имеющим частоту вращения вала  $n = 300$  об/мин. Активная длина обмотки якоря  $l = 20$  см, диаметр якоря  $D = 20$  см, в пазу якоря размещаются 40 витков, магнитная индукция в воздушном зазоре  $0,5$  Тл. Определите максимальную ЭДС, наводимую в обмотке.

7. Проводник длиной  $l = 20$  см с током  $I = 2$  А находится в магнитном поле индукцией  $B = 0,65$  Тл. Определите силу, действующую на проводник.

8. Чему равна амплитуда магнитного потока в трансформаторе, первичная обмотка которого с числом витков  $w_1 = 1000$  включена в сеть напряжением  $220$  В и частотой  $50$  Гц (см. подразд. 7.2.1:  $U = 4,44wf\Phi_m$ )?

9. Определите ЭДС во вторичной обмотке трансформатора, рассчитанного на работу от сети напряжением  $220$  В и частотой  $50$  Гц, если амплитуда магнитного потока в сердечнике составляет  $0,005$  Вб, число витков вторичной обмотки равно  $100$  ( $U = 4,44wf\Phi_m$ ).

10. К первичной обмотке трансформатора с числом витков  $w_1 = 2000$  приложено номинальное напряжение  $220$  В частотой  $50$  Гц. Площадь поперечного сечения магнитопровода  $5$  см<sup>2</sup>. Определите амплитудное значение магнитной индукции в сердечнике при работе трансформатора на холостом ходу ( $U = 4,44wf\Phi_m$ ).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Электродвигатель — это электрическая машина, преобразующая (выберите правильный ответ):
  - а) механическую энергию в электрическую;
  - б) механическую энергию одного вида в механическую другого вида;
  - в) электрическую энергию одного вида в электрическую другого вида;
  - г) электрическую энергию в механическую.
2. Генератор — это электрическая машина, преобразующая (выберите правильный ответ):
  - а) механическую энергию в электрическую;
  - б) механическую энергию одного вида в механическую другого вида;
  - в) электрическую энергию одного вида в электрическую другого вида;

- г) электрическую энергию в механическую.
3. Каким правилом определяется направление действия силы на проводники обмотки ротора электрической машины:
- буравчика;
  - правой руки;
  - левой руки;
  - дорожного движения?
4. Каким правилом определяется направление ЭДС в проводниках обмотки электрической машины:
- буравчика;
  - правой руки;
  - левой руки;
  - дорожного движения?
5. Укажите верное написание формулы Ампера:
- $e = l/(Bv)$ ;
  - $F_{эм} = lBi$ ;
  - $F_{эм} = l/(Bi)$ ;
  - $e = lBv$ .
6. Укажите верное написание формулы Фарадея:
- $e = l/(Bv)$ ;
  - $F_{эм} = lBi$ ;
  - $F_{эм} = l/(Bi)$ ;
  - $e = lBv$ .
7. Для чего предназначен трансформатор:
- для повышения КПД;
  - для повышения коэффициента мощности;
  - для передачи электрической энергии от источника переменного тока к потребителю;
  - для снижения магнитных потерь?
8. Какой принцип положен в основу работы трансформатора:
- взаимоиндукции;
  - самоиндукции;
  - электромагнитных сил;
  - электромагнитных моментов?
9. Для чего магнитопровод трансформатора изготавливают из отдельных электрически изолированных друг от друга пластин электротехнической стали:
- для снижения магнитных потерь;
  - для снижения электрических потерь;
  - для снижения себестоимости;
  - для повышения мощности?

## 7.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРА. ТРАНСФОРМАТОРЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

### ТЕОРИЯ

#### 7.2.1. Уравнения напряжений и коэффициент трансформации

В реальном трансформаторе наряду с основным рабочим потоком  $\Phi$ , сцепленным с обмотками  $w_1$  и  $w_2$ , образуются потоки рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  и  $\Phi_{\sigma 2}$ , сцепленные каждый со своей обмоткой. Эти потоки создают ЭДС  $e_{\sigma 1}$  и  $e_{\sigma 2}$  (рис. 7.5, а).

Протекающие по обмоткам токи создают падения напряжения на активных сопротивлениях обмоток  $i_1 r_1$  и  $i_2 r_2$ .

Уравнения напряжений для первичной и вторичной обмоток трансформатора в соответствии со вторым законом Кирхгофа имеют следующий вид:

$$u_1 = -e_1 - e_{\sigma 1} + i_1 r_1$$

$$u_2 = e_2 + e_{\sigma 2} - i_2 r_2$$

Если пренебречь потоками рассеяния ( $\Phi_{\sigma} = 0$ ) и падением напряжения на активных сопротивлениях (они составляют не более 10%), то уравнения напряжений трансформатора (называемого в данном случае *идеальным*) можно записать так:

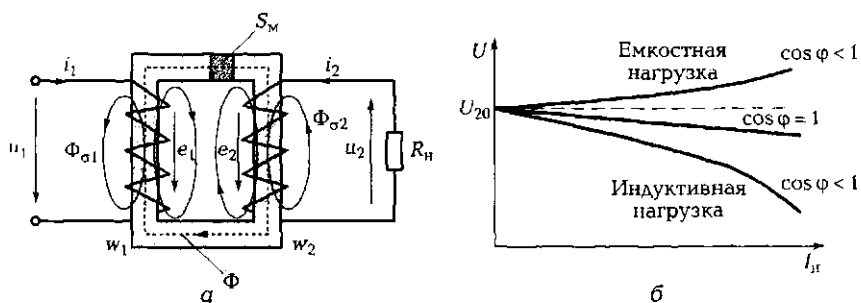


Рис. 7.5. Трансформатор:

а — схема к анализу уравнений напряжений; б — внешние характеристики;  $S_m$  — площадь поперечного сечения магнитопровода

$$u_1 = -e_1 = w_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t};$$

$$u_2 = e_2 = -w_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Трансформатор можно рассматривать как четырехполюсник с двумя входными и двумя выходными зажимами.

☛ Отношение выходного параметра четырехполюсника к входному, а в нашем случае — отношение напряжения на вторичной обмотке  $u_2$  к напряжению на первичной обмотке  $u_1$  назовем *коэффициентом трансформации*

$$k_{21} = \frac{u_2}{u_1} = \frac{e_2}{e_1} = \frac{w_2}{w_1}.$$

Он равен отношению чисел витков вторичной и первичной обмоток. Если  $w_2 > w_1$ , то  $k_{21} > 1$  и трансформатор называется *повышающим*, поскольку  $u_2 > u_1$ . Если  $w_2 < w_1$ , то  $k_{21} < 1$  и трансформатор называется *понижающим*, так как  $u_2 < u_1$ .

При синусоидальном магнитном потоке  $\Phi$  наводимые ЭДС  $e_1$  и  $e_2$  также синусоидальны, но сдвинуты по фазе относительно потока на  $90^\circ$ , поскольку определяются скоростью изменения потока  $\Delta\Phi/\Delta t$ :

$$e_1 = E_{1m} \sin(2\pi ft - 90^\circ);$$

$$e_2 = E_{2m} \sin(2\pi ft - 90^\circ),$$

где  $E_{1m} = 2\pi f w_1 \Phi_m$  и  $E_{2m} = 2\pi f w_2 \Phi_m$  — амплитуды ЭДС в первичной и вторичной обмотках.

Для действующих значений ЭДС

$$E = E_m / \sqrt{2} = 4,44 w f \Phi_m;$$

для напряжений

$$U = 4,44 w f \Phi_m.$$

Величина приложенного к первичной обмотке  $w_1$  напряжения  $U_1$  определяет амплитуду магнитного потока  $\Phi_m$ . Величина потока при неизменном приложенном напряжении остается одной и той же при всех режимах работы трансформатора — от холостого хода до номинальной нагрузки. При  $f = 50$  Гц  $\Phi_m = 0,0045 U_1 / w_1$ ; если при этом  $U_1 = 220$  В, то  $\Phi_m \approx 1 / w_1$ .

Мгновенные значения токов, как и значения напряжений, связаны коэффициентом трансформации, но в обратной пропорциональной зависимости:

$$k_{21} = \frac{u_2}{u_1} = \frac{S/i_2}{S/i_1} = \frac{i_1}{i_2}.$$

☛ Таким образом, ток меньше в обмотке с бóльшим числом витков и бóльшим напряжением. Именно это свойство и положено в основу передачи электрической энергии на большие расстояния: повышение напряжения позволяет снизить ток в проводах, а значит, потери мощности в проводах и площадь их сечения.

Если вторичная обмотка трансформатора разомкнута, то ток в ней отсутствует. Однако в первичной обмотке ток не равен нулю. Этот ток называется *током холостого хода*  $i_0$ . Включение нагрузки в цепь вторичной обмотки вызывает появление в ней тока  $i_2$ , что ведет к увеличению тока в первичной обмотке ( $i_1 > i_0$ ).

### 7.2.2. Потери мощности и КПД трансформатора

При работе под нагрузкой трансформатор передает мощность от первичной обмотки к нагрузке не полностью. Часть мощности теряется. Речь в первую очередь идет о потерях электрических, связанных с нагревом первичной (теряется мощность  $P_{\Sigma 1}$ ) и вторичной ( $P_{\Sigma 2}$ ) обмоток, и потерях магнитных ( $P_M$ ) на вихревые токи и гистерезис (перемангничивание сердечника):

$$P_2 = P_1 - (P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} + P_M),$$

где  $P_2$  — мощность в нагрузке;  $P_1$  — мощность в первичной обмотке.

Среди электрических машин трансформатор обладает наивысшим КПД (86...99%), поскольку у него отсутствуют механические потери, связанные с дополнительными преобразованиями электромагнитной энергии в механическую.

☛ Расчет и определение КПД трансформатора ведут косвенными методами, связанными с определением суммарных потерь  $\sum P_{\Sigma}$ .

В основу этих методов положены опыты холостого хода (ХХ) (рис. 7.6, а) и короткого замыкания (КЗ) (рис. 7.6, б), в процессе которых могут быть определены магнитные  $P_M$  и электрические  $P_{\Sigma 1}$  и  $P_{\Sigma 2}$  потери.

*Опыт холостого хода* проводится при номинальном напряжении на первичной обмотке и разомкнутой вторичной обмотке.



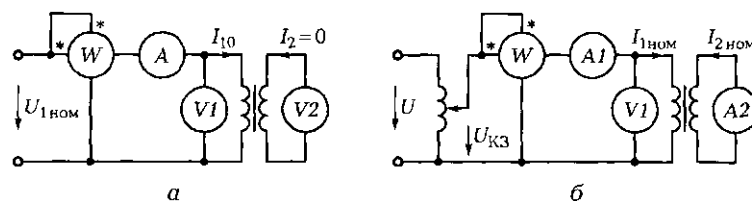


Рис. 7.6. Схемы ЭЦ для измерения потерь в трансформаторе:  
 а – опыт холостого хода; б – опыт короткого замыкания

Поскольку при ХХ  $I_2 = 0$ , то полезная мощность  $P_2 = 0$ . Входная мощность  $P_1 = P_{\text{ХХ}}$  расходуется на потери в магнитопроводе ( $P_m$ ) и потери в меди ( $P_{\text{с1}}$ ). Ток ХХ  $I_{10}$  мал (2... 10% номинального тока  $I_{\text{ном}}$ ), поэтому потерями в меди можно пренебречь. В то же время магнитный поток в сердечнике номинален, а значит, можно считать, что вся мощность при ХХ представляет собой магнитные потери ( $P_m = P_{\text{ХХ}}$ ). Эту мощность можно измерить ваттметром по схеме, показанной на рис. 7.6, а.

Опыт короткого замыкания проводится при номинальных токах в обмотках и пониженном напряжении на первичной обмотке. Если  $I_2 = I_{2\text{ном}}$ , то  $U_1 = U_{\text{кз}} = (0,05 \dots 0,1)U_{1\text{ном}}$ . Именно при этих значениях напряжения и тока проводится опыт КЗ.

Так как ток по обмоткам течет номинальный, то и электрические потери номинальные. Поскольку прикладываемое к первичной обмотке напряжение мало, то и магнитный поток  $\Phi$  мал, в связи с чем магнитными потерями можно пренебречь. Можно считать, что измеренная ваттметром в опыте КЗ (см. рис. 7.6, б) мощность представляет собой электрические потери ( $P_{\text{кз}} = P_{\text{с1}} + P_{\text{с2}}$ ).

☛ Полученные в результате опытов холостого хода и короткого замыкания показания ваттметров позволяют вычислить КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{P_{\text{ХХ}} + P_{\text{кз}}}{P_1}$$

### 7.2.3. Внешняя характеристика трансформатора

☛ Внешняя характеристика трансформатора отражает зависимость напряжения на нагрузке  $U_2$  от тока нагрузки  $I_2$  при постоянном напряжении на первичной обмотке ( $U_1 = \text{const}$ ) и неизменном характере нагрузки ( $\cos \varphi = \text{const}$ ).

Вид внешней характеристики существенно зависит от характера нагрузки (рис. 7.5, б). При чисто активной нагрузке ( $\cos \varphi = 1$  — лампа накаливания, нагреватель) внешняя характеристика слегка падающая, что объясняется увеличением падения напряжения на активном сопротивлении обмоток с ростом тока нагрузки. В случае индуктивной нагрузки ( $\cos \varphi < 1$  — дроссель, сварочный трансформатор, электрический двигатель) напряжение при увеличении тока может падать довольно резко, так как индуктивная составляющая тока размагничивает сердечник. При емкостной нагрузке ( $\cos \varphi < 1$  — синхронная машина в режиме компенсатора, батарея конденсаторов) напряжение с увеличением тока может расти, так как емкостная составляющая тока подмагничивает сердечник.

Изменение вторичного напряжения принято выражать в процентах от номинального напряжения:

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_{2\text{ном}}}{U_{20}} 100 \%,$$

где  $U_{20}$ ,  $U_{2\text{ном}}$  — напряжение на вторичной обмотке соответственно при холостом ходе и при номинальной нагрузке.

#### 7.2.4. Трехфазные трансформаторы

Для понижения или повышения трехфазного напряжения могут быть использованы три однофазных трансформатора, однако в целях экономии материала применяют один трехстержневой трансформатор с несимметричной магнитной цепью (рис. 7.7, а). Для симметрирования площадь сечения ярма 1 увеличивают на 15... 20 %

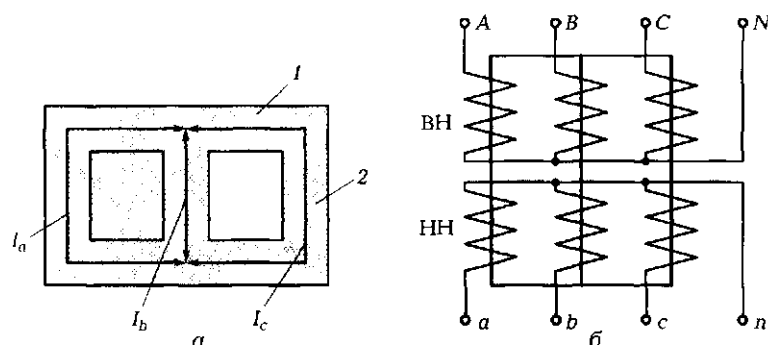


Рис. 7.7. Схемы магнитопровода (а) и соединенных звездой обмоток (б) трехфазного трансформатора:

1 — ярмо; 2 — стержень

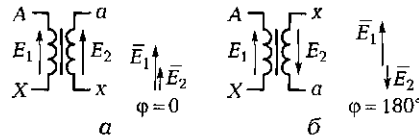


Рис. 7.8. Группы соединения обмоток однофазного трансформатора:  
 а — нулевая; б — шестая

по отношению к площади сечения стержней 2. Это позволяет расчеты и анализ трехфазного трансформатора выполнять для одной фазы.

Обмотки высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений каждой фазы располагаются на своих стержнях, и могут быть соединены звездой (рис. 7.7, б) или треугольником, например  $\lambda/\lambda$ ,  $\lambda/\Delta$  и т. д. Знак в числителе указывает на схему соединения обмоток ВН, знак в знаменателе — на схему соединения обмоток НН.

В трехфазных трансформаторах коэффициент трансформации линейных напряжений зависит от схемы соединения обмоток. Как было показано ранее, при соединении звездой  $U_\lambda = \sqrt{3}U_\phi$ , а при соединении треугольником  $U_\lambda = U_\phi$ . Поэтому в трехфазных трансформаторах говорят о коэффициенте трансформации фазных напряжений:

$$k_\phi = \frac{U_{\phi 2}}{U_{\phi 1}} = \frac{w_{\phi 2}}{w_{\phi 1}}$$

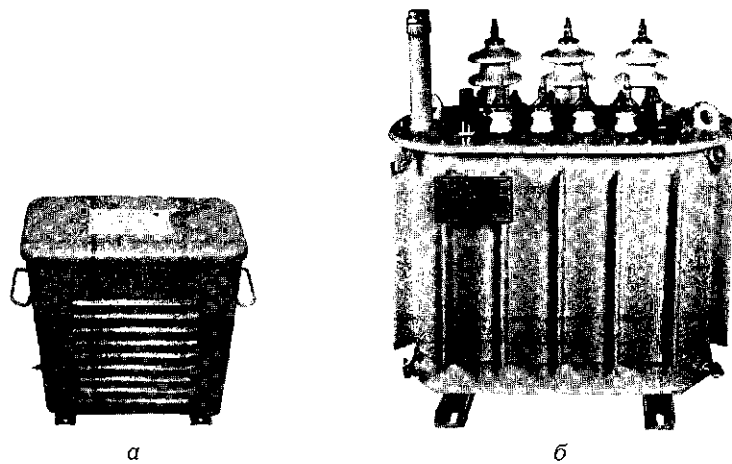


Рис. 7.9. Внешний вид сухого (а) и масляного (б) трехфазных трансформаторов

При включении нескольких трансформаторов на параллельную работу наряду со схемой соединения обмоток следует учитывать *группу соединения обмоток*, определяющую угол смещения векторов линейных ЭДС (напряжений) обмоток ВН и НН.

Для однофазного трансформатора государственным стандартом разрешена к применению лишь нулевая группа соединения обмоток (рис. 7.8, а). Для нее сдвиг фаз между векторами ЭДС равен нулю. Если концы одной из обмоток поменять местами, то угол сдвига фаз между векторами станет равным  $180^\circ$  (рис. 7.8, б). Такое соединение обмоток относится к шестой группе. Номер группы определяется делением угла сдвига фаз на  $30^\circ$  ( $6 = 180^\circ/30^\circ$ ).

Для трехфазного трансформатора существуют 12 групп соединений, но государственным стандартом разрешены к применению лишь две: нулевая и одиннадцатая.

На рис. 7.9, а показан внешний вид трехфазного сухого трансформатора ( $S = 2 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ,  $U_1 = 220 \text{ В}$ ,  $U_2 = 36 \text{ В}$ ), а на рис. 7.9, б — масляного трансформатора ТМГ-25 с гофрированным баком ( $S = 25 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ).

### 7.2.5. Автотрансформатор

Автотрансформатор имеет лишь одну обмотку с отводом, т. е. его вторичная обмотка  $w_2$  (НН) является частью первичной обмотки  $w_1$  (ВН) (рис. 7.10, а).

Таким образом, коэффициент трансформации автотрансформатора  $k_a = w_2/w_1 = U_2/U_1$  всегда меньше 1, поэтому такой трансформатор всегда является понижающим.

Широкое применение автотрансформаторы нашли в качестве регуляторов переменного напряжения. Они позволяют осуществлять регулирование плавно и дискретно.

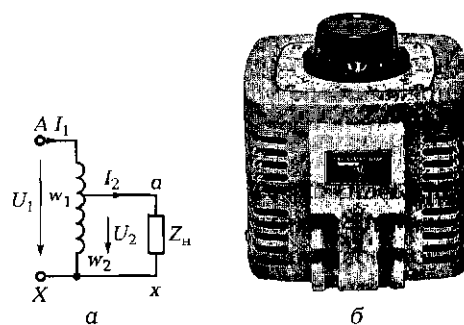


Рис. 7.10. Автотрансформатор:

а — схема включения; б — внешний вид ПАТР

В лабораторных условиях для регулирования напряжения питания электрических схем часто применяется лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) (рис. 7.10, б). При неизменном первичном напряжении, например 220 В, он дает возможность изменять напряжение на нагрузке от 0 до 220 В.

### 7.2.6. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы служат для преобразования переменного тока и напряжения в целях удобства их измерения стандартными электроизмерительными приборами и повышения безопасности работы.

Трансформатор напряжения (ТН) — это понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации 0,1; 0,01 и менее. В его вторичную цепь включают вольтметр, параллельные цепи ваттметров и счетчиков энергии. Сопротивление этих приборов близко к бесконечности.

ТН работает на холостом ходу.

Трансформатор тока (ТТ) — это повышающий трансформатор по напряжению с коэффициентом трансформации 10, 100 и более. Следовательно, по току ТТ является понижающим трансформатором. Его первичная обмотка имеет один — три витка и включается в цепь, где проводятся измерения, последовательно с нагрузкой. В цепь вторичной обмотки включаются приборы с малым сопротивлением (амперметр, токовая катушка ваттметра).

ТТ работает в режиме короткого замыкания.

При разомкнутой вторичной обмотке ТТ не может быть включен в цепь, так как при  $i_2 = 0$  магнитный поток в трансформаторе резко увеличивается, растут потери на гистерезис, сердечник перегревается и трансформатор выходит из строя.

Кроме того, напряжение на вторичной разомкнутой обмотке может достигать значительной величины, что опасно для обслуживающего персонала.

На рис. 7.11, а показана схема включения в цепь мощного высоковольтного асинхронного двигателя АД стандартных измерительных приборов с использованием измерительных трансформаторов. Двигатель, обмотки которого соединены звездой, питается линейным напряжением  $U_\lambda = 6\,000$  В и имеет номинальный ток 80 А. Измерительная лаборатория располагает вольтметром на 1 000 В и амперметром на 10 А. Чтобы измерить электрические параметры при

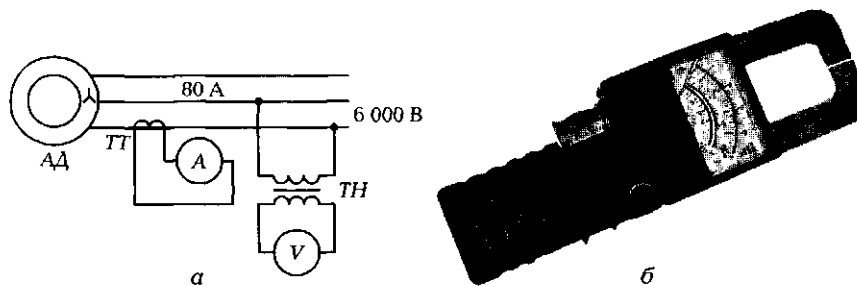


Рис. 7.11. Измерительные трансформаторы тока и напряжения:  
*а* — схемы включения ТТ и ТН в комплекте со стандартными измерительными приборами; *б* — внешний вид трансформатора тока

работе двигателя имеющимися приборами, необходимо включить их через ТН с коэффициентом трансформации  $k = 0,1$  и ТТ с коэффициентом трансформации  $k = 10$ . В этом случае вольтметр должен показать 600 В, а амперметр — 8 А.

Внешний вид ТТ показан на рис. 7.11, б.

### 7.2.7. Сварочный трансформатор

Перед началом сварки рабочий касается детали 2 электродом 1, в результате чего замыкает накоротко вторичную обмотку трансформатора (рис. 7.12, а). В обычном трансформаторе ток короткого замыкания в 10—20 раз превышает номинальный, поэтому такой трансформатор вышел бы из строя. В сварочном же трансформаторе

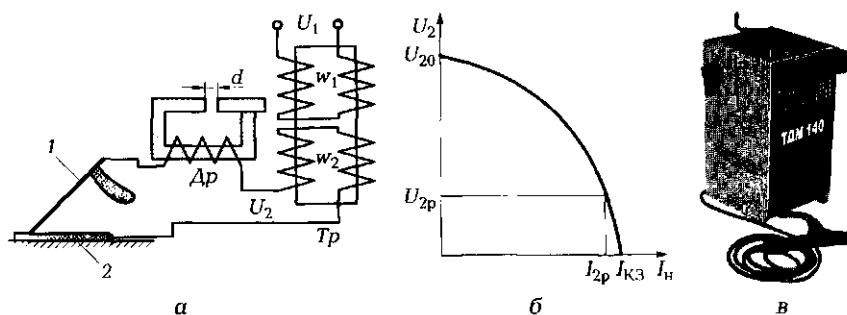


Рис. 7.12. Сварочный трансформатор:  
*а* — схема включения; *б* — внешняя характеристика; *в* — внешний вид трансформатора ТДМ-140; 1 — электрод; 2 — деталь; Др — дроссель с регулируемым воздушным зазором  $d$ ; Тр — сварочный трансформатор, во вторичную обмотку  $w_2$  которого включен электрод 1 через дроссель Др

торе в цепь обмотки последовательно с нагрузкой включается дроссель  $Dp$  со значительной индуктивностью. При индуктивной нагрузке внешняя характеристика трансформатора  $U_2 = f(I_n)$  — резко падающая (рис. 7.12, б). Благодаря этому ток короткого замыкания  $I_{кз}$  близок к рабочему току  $I_{2p}$ . Сварочный ток регулируют изменением зазора  $d$ . При этом меняется индуктивность дросселя  $Dp$ , а значит, и крутизна внешней характеристики.

На рис. 7.12, в показан внешний вид сварочного трансформатора ТДМ-140, рассчитанного на максимальный ток 140 А.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. Для определения числа витков в обмотках трансформатора (рис. 7.13) поверх основных обмоток намотано 10 витков дополнительной обмотки. При подключении первичной обмотки трансформатора к источнику питания напряжением 220 В напряжение на вторичной обмотке составило 6,6 В, а на дополнительной обмотке — 2 В. Определите числа витков первичной и вторичной обмоток и коэффициент трансформации трансформатора.

*Решение.* В трансформаторе все обмотки сцеплены одним магнитным потоком. Коэффициент трансформации определяется отношением чисел витков обмоток и, следовательно, отношением напряжений на обмотках на холостом ходу:

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{U_2}{U_1}, \quad \frac{w_{доп}}{w_1} = \frac{U_{доп}}{U_1},$$

где  $w_1$ ,  $w_2$  и  $w_{доп}$  — числа витков первичной, вторичной и дополнительной обмоток;  $U_1$ ,  $U_2$  и  $U_{доп}$  — напряжения на первичной, вторичной и дополнительной обмотках.

Отсюда

$$w_1 = \frac{U_1}{U_{доп}} w_{доп} = \frac{220}{2} 10 = 1100 \text{ витков};$$

$$w_2 = \frac{U_2}{U_{доп}} w_{доп} = \frac{6,6}{2} 10 = 33 \text{ витка.}$$

Коэффициент трансформации

$$k_{21} = \frac{w_2}{w_1} = 0,03.$$

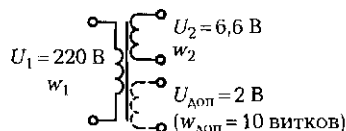


Рис. 7.13. Схема обмоток трансформатора к задаче 1 подразд. 7.2

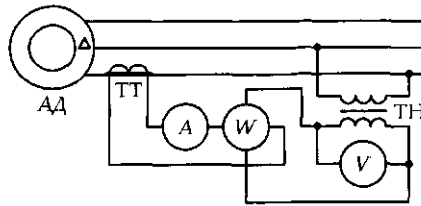


Рис. 7.14. Схема включения ТТ и ТН к задаче 2 подразд. 7.2

*Ответ.* Первичная и вторичная обмотки трансформатора имеют соответственно 1 100 витков и 33 витка; коэффициент трансформации трансформатора равен 0,03.

2. Для измерения электрических параметров мощного трехфазного высоковольтного асинхронного двигателя используются измерительные трансформаторы тока и напряжения (рис. 7.14, а). В цепь вторичной обмотки ТН включены вольтметр  $V$  и катушка напряжения ваттметра  $W$ , а в цепь вторичной обмотки ТТ — амперметр  $A$  и токовая катушка ваттметра  $W$ . В номинальном режиме вольтметр показал 60 В, амперметр — 4 А, ваттметр — 176 Вт. Коэффициент трансформации трансформатора напряжения  $k_U = 0,01$ , трансформатора тока  $k_I = 50$ .

Определите линейный ток и мощность, потребляемые двигателем, а также линейное напряжение на его обмотках. Вычислите коэффициент мощности двигателя.

*Решение.* Напряжение на первичной обмотке ТН (равное линейному напряжению в цепи АД)  $U_1 = U_\lambda = U_2/k_U = 60/0,01 = 6\,000$  В. Ток, протекающий по первичной обмотке ТТ (равный линейному току в цепи АД),  $I_1 = I_\lambda = k_I I_2 = 50 \cdot 4 = 200$  А.

Мощность, потребляемая двигателем из трехфазной сети, в рассматриваемом случае измеряется методом двух ваттметров. Поскольку двигатель представляет собой симметричную нагрузку, то для вычисления потребляемой им мощности достаточно удвоить показание одного ваттметра и учесть коэффициенты трансформации:  $P_{\text{дв}} = 2W = 2 \cdot 176 \cdot 50/0,01 = 1\,760\,000 = 1\,760$  кВт.

Коэффициент мощности определяем из выражения  $P_{\text{дв}} = \sqrt{3} U_\lambda I_\lambda \cos \varphi$ . Из него следует, что

$$\cos \varphi = \frac{P_{\text{дв}}}{\sqrt{3} U_\lambda I_\lambda} = \frac{1\,760\,000}{\sqrt{3} \cdot 6\,000 \cdot 200} = 0,85.$$

*Ответ.* Линейный ток двигателя  $I_\lambda = 200$  А, линейное напряжение  $U_\lambda = 6\,000$  В, потребляемая двигателем мощность  $P_{\text{дв}} = 1\,760$  кВт, коэффициент мощности  $\cos \varphi = 0,85$ .



### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

3. Вычислите КПД трансформатора номинальной мощностью 400 Вт, если его магнитные и электрические потери, определенные в процессе опытов холостого хода и короткого замыкания, равны соответственно 30 и 50 Вт.

4. КПД трансформатора мощностью 10 кВт составляет 90 %. Магнитные потери в магнитопроводе трансформатора равны 400 Вт. Вычислите электрические потери в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

5. Номинальная мощность трехфазного трансформатора равна 2 кВ·А, номинальное напряжение первичной обмотки — 380 В, номинальное напряжение вторичной обмотки — 38 В, схема соединения обмоток —  $\Delta/\Delta$ . Определите номинальные токи в обмотках, коэффициент трансформации  $k_{21}$  и фазное напряжение на вторичной обмотке.

6. Определите число витков вторичной обмотки трансформатора тока, если включенный в ее цепь амперметр показал ток 5 А. При этом измеряемый ток, протекающий по первичной обмотке, состоящей из одного витка, равен 500 А.

7. Напряжение на вторичной обмотке трансформатора напряжения равно 160 В. Первичная обмотка имеет 3 000 витков, вторичная — 30 витков. Чему равно напряжение в электрической цепи?

### КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Укажите параметры, определяющие коэффициент трансформации трансформатора:
  - а) число витков первичной обмотки;
  - б) число витков вторичной обмотки;
  - в) магнитный поток;
  - г) числа витков первичной и вторичной обмоток.
2. Как изменится ток во вторичной обмотке трансформатора, если коэффициент трансформации увеличить в 4 раза:
  - а) увеличится в 2 раза;
  - б) уменьшится в 4 раза;
  - в) увеличится в 4 раза;
  - г) не изменится?
3. Для определения каких потерь в трансформаторе выполняют опыт холостого хода:
  - а) электрических в первичной обмотке;

- б) электрических во вторичной обмотке;
  - в) магнитных;
  - г) механических?
4. Для определения каких потерь в трансформаторе выполняют опыт короткого замыкания:
- а) электрических;
  - б) на гистерезис;
  - в) на вихревые токи;
  - г) механических?
5. При каком соотношении чисел витков обмоток трансформатор является повышающим:
- а)  $w_1 \gg w_2$ ;
  - б)  $w_1 > w_2$ ;
  - в)  $w_1 = w_2$ ;
  - г)  $w_1 < w_2$ ?
6. Вторичная обмотка автотрансформатора (выберите правильное утверждение):
- а) наматывается поверх первичной;
  - б) является частью первичной обмотки;
  - в) имеет большее число витков, чем первичная;
  - г) не имеет электрической связи с первичной.
7. В качестве какого устройства применяют автотрансформатор:
- а) повышающего трансформатора;
  - б) развязывающего устройства;
  - в) регулятора постоянного напряжения;
  - г) регулятора переменного напряжения?
8. Для чего предназначены измерительные трансформаторы:
- а) для повышения напряжения и тока до значений, которые можно измерить стандартными электроизмерительными приборами;
  - б) для уменьшения напряжения и увеличения тока в тех же целях;
  - в) для повышения напряжения и уменьшения тока в тех же целях;
  - г) для понижения напряжения и тока в тех же целях?
9. В каком режиме работает трансформатор тока:
- а) холостого хода;
  - б) короткого замыкания;
  - в) согласованном;
  - г) оптимальном?
10. В каком режиме работает трансформатор напряжения:
- а) холостого хода;

- б) короткого замыкания;
  - в) согласованном;
  - г) оптимальном?
11. В каком режиме работает сварочный трансформатор:
- а) холостого хода;
  - б) короткого замыкания;
  - в) согласованном;
  - г) оптимальном?

### 7.3. ПРИНЦИП РАБОТЫ, КОНСТРУКЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

---

#### ТЕОРИЯ

##### 7.3.1. Принцип создания вращающегося магнитного поля

В отличие от трансформатора — статического (без подвижных частей) электромагнитного устройства — электрические двигатели имеют неподвижную часть — статор и вращающуюся часть — ротор.

Во всех электрических двигателях переменного тока основное назначение статора — создание вращающегося магнитного поля. Проще всего его получить, если на статоре расположить три обмотки, сдвинутые в пространстве на  $120^\circ$  одна относительно другой, и подвести к ним одинаковые по частоте и амплитуде синусоидальные напряжения, сдвинутые по фазе на  $120^\circ$ . Первым использовал этот принцип М.О. Доливо-Добровольский, создавший в 1888 г. трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Три сдвинутых по фазе синусоидальных напряжения  $u_a, u_b, u_c$  создают в трех сдвинутых в пространстве обмотках три сдвинутых на  $120^\circ$  синусоидальных магнитных потока  $\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c$  (рис. 7.15). За время, равное  $1/3$  периода ( $120^\circ$ ), вектор результирующего магнитного потока  $\bar{\Phi}_{рез}$  поворачивается также на  $120^\circ$ , а за период — на  $360^\circ$ , т. е. совершает один оборот (рис. 7.16).

Таким образом, трехфазная система напряжений, приложенная к обмоткам статора, создает вращающееся магнитное поле. Частота вращения поля  $n_1$ , называемая *синхронной*, определяется выражением

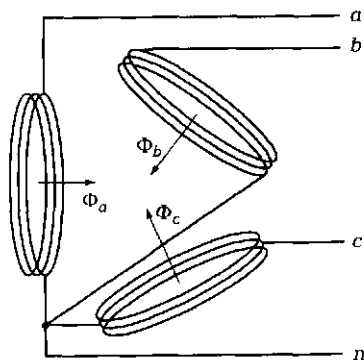


Рис. 7.15. Магнитные потоки в сдвинутых в пространстве на  $120^\circ$  обмотках

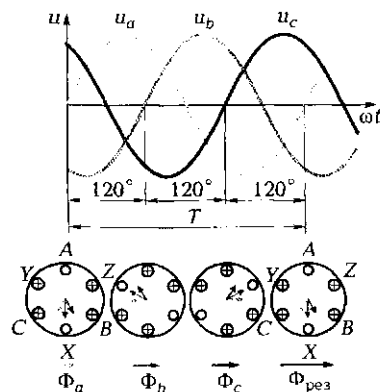


Рис. 7.16. Вращение результирующего вектора магнитного потока  $\Phi_{рез}$  за один период синусоидального сигнала

$$n_1 = 60 \frac{f_1}{p}$$

где  $f_1$  — частота переменного напряжения, подводимого к обмотке статора, Гц;  $p$  — число пар полюсов на статоре.

При промышленной частоте  $f = 50$  Гц и одной паре полюсов ( $p = 1$ ) синхронная частота вращения равна 3 000 об/мин.

### 7.3.2. Конструкция асинхронной машины

➤ Асинхронные машины (АМ) относятся к машинам переменного тока, питаются синусоидальным током и преобразуют электрическую энергию переменного тока в механическую энергию.

Основное применение они нашли в качестве приводных двигателей в промышленности и быту (приводы металлорежущих станков, насосов, вентиляторов, подъемных механизмов, стиральных машин, холодильников, электроинструмента).

Асинхронные двигатели (АД) могут быть трехфазными и однофазными. Трехфазные машины в основном используются на производстве, однофазные — в быту.

Асинхронный двигатель является самым простым в конструктивном исполнении из всех электрических машин. Он состоит из двух основных узлов: неподвижного статора 1 и вращающегося ротора 2 (рис. 7.17).

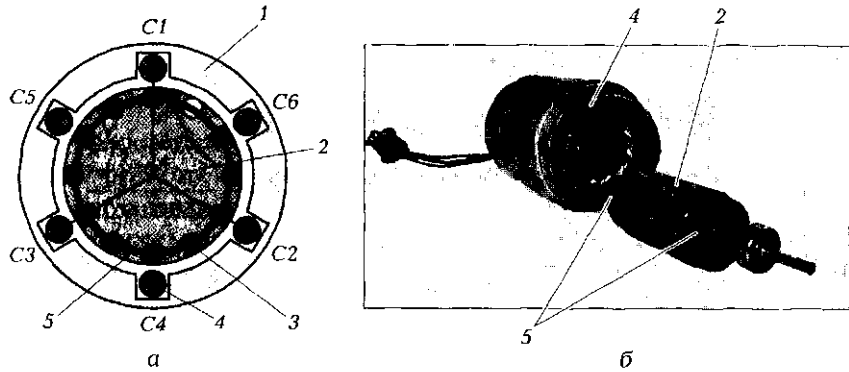


Рис. 7.17. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором:

*а* — конструктивная схема; *б* — внешний вид узлов двигателя; 1 — статор; 2 — ротор; 3 — обмотка ротора; 4 — обмотка статора; 5 — кольца, замыкающие обмотку ротора по торцам

Статор выполняется в виде полого цилиндра с пазами на внутренней поверхности. В пазы укладывается обмотка 4 из изолированного провода. Изготавливают статор из тонких штампованных изолированных электрически друг от друга пластин из ферромагнитного материала. Это позволяет снизить магнитные потери на гистерезис и вихревые токи.

Проводники, уложенные в пазах статора равномерно, объединяются либо в три обмотки, оси которых сдвинуты в пространстве на  $120^\circ$  (трехфазные машины), либо в две обмотки, сдвинутые в пространстве на  $90^\circ$  (однофазные машины).

Для трехфазных обмоток принято обозначать начала фаз  $C1, C2, C3$ , а концы фаз —  $C4, C5, C6$ . Обмотки трехфазной машины могут быть соединены звездой или треугольником. При соединении фаз звездой концы фаз  $C4, C5, C6$  объединяют, а начала фаз  $C1, C2, C3$  подключают к линейным проводам  $A, B, C$  (рис. 7.18, *а*). При соединении фаз треугольником начало фазы  $C1$  объединяют с концом

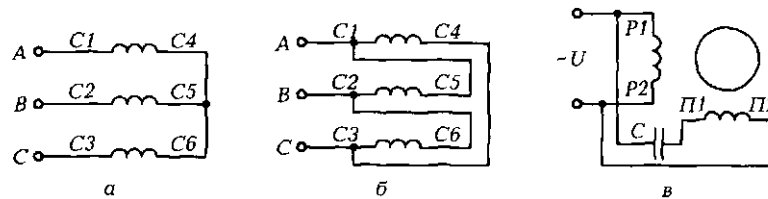
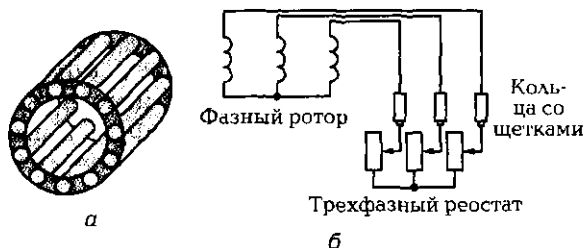


Рис. 7.18. Схемы соединения обмоток трехфазного асинхронного двигателя звездой (*а*) и треугольником (*б*) и схема включения обмоток однофазного асинхронного двигателя (*в*)

Рис. 7.19. Обмотки ротора асинхронного двигателя:

*a* — короткозамкнутая типа беличьего колеса;  
*b* — фазная с включением трехфазного реостата



фазы *C5*, *C2* — с *C6* и *C3* — с *C4*. Образовавшиеся узловые точки подключают к линейным проводам (рис. 7.18, б).

У однофазных асинхронных машин обмотки подразделяются на рабочие (обмотки возбуждения) и пусковые. Начало и конец рабочей обмотки обозначают *P1* и *P2* (или *B1* и *B2*), а пусковой — *П1* и *П2* (рис. 7.18, в).

Ротор асинхронного двигателя, выполняемый в виде сплошного цилиндра также из отдельных ферромагнитных пластин, имеет пазы на внешней поверхности, в которые укладывается обмотка. Обмотка ротора может быть короткозамкнутой или фазной.

Короткозамкнутая обмотка 3 (см. рис. 7.17, а) выполняется заливкой пазов ферромагнитного ротора 2 алюминием с закорачиванием полученных стержней по торцам кольцами 5. В результате получается так называемое беличье колесо (рис. 7.19, а).

Фазная обмотка укладывается изолированным проводом в виде трех фаз, соединенных звездой. Начала фаз подключаются к трем контактными кольцам, расположенным на оси ротора (рис. 7.19, б). Подключение обмотки ротора к цепи осуществляется с помощью трех контактных щеток, располагаемых на корпусе и скользящих по кольцам при вращении ротора. Включение трехфазного реостата в цепь ротора позволяет регулировать частоту вращения ротора.

### 7.3.3. Принцип работы трехфазного асинхронного двигателя

В основу работы асинхронного двигателя положено взаимодействие вращающегося магнитного поля, создаваемого обмотками статора, с токами, наводимыми этим полем в обмотке ротора.

Вращающееся магнитное поле статора, пересекая обмотки неподвижного ротора, наводит в них ЭДС в соответствии с законом электромагнитной индукции. Действующее значение ЭДС определяется выражением

$$E_2 = E_{2m}/\sqrt{2} = 2\pi f_2 w_2 \Phi_m / \sqrt{2} = 4,44 f_2 w_2 \Phi_m,$$

где  $E_{2m}$  — амплитудное значение ЭДС в фазе неподвижного ротора  
 $f_2$  — частота переменной ЭДС в неподвижном роторе (равная  $f_1$ )  
 $w_2$  — число витков в фазе ротора;  $\Phi_m$  — амплитудное значение магнитного потока.

Поскольку в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором стержни обмотки замкнуты по торцам кольцами, в стержнях под действием ЭДС  $E_2$  появляется ток ротора  $I_2$ . В соответствии с законом электромагнитных сил (формула Ампера) вращающееся магнитное поле начинает действовать на проводник с током, создавая вращающий момент

$$M_{вр} = c_m \Phi I_2,$$

где  $c_m$  — конструктивный коэффициент;  $\Phi$  — действующее значение магнитного потока.

Под действием этого момента ротор приходит во вращение в том же направлении, что и поле и, «бежит» за ним, стараясь догнать его. Однако догнать магнитное поле, вращающееся с синхронной частотой  $n_1$ , ротор не может, так как в противном случае магнитное поле перестанет пересекать обмотки ротора и наводить в них ЭДС, ток в обмотках ротора исчезнет, а значит, не будет и вращающегося момента. Следовательно, ротор всегда вращается с частотой, несколько меньшей синхронной. Отсюда и название — асинхронный (т. е. несинхронный) двигатель.

Таким образом, асинхронный двигатель по принципу действия похож на трансформатор. Он также имеет две обмотки: первичная размещена на статоре, вторичная — на роторе. Статор и ротор являются магнитопроводом, по которому замыкается магнитный поток. Как и в трансформаторе, первичная обмотка подключается к источнику переменного (трехфазного) напряжения. Результирующий магнитный поток создает вращающееся магнитное поле, которое, пересекая обмотку ротора, наводит в ней ЭДС (аналогично тому, как в трансформаторе переменный магнитный поток наводит ЭДС во вторичной обмотке). Но в трансформаторе нет движущихся частей, тогда как ротор асинхронного двигателя под действием электромагнитной силы приходит во вращение.

При вращении ротора с частотой  $n < n_1$  он «скользит» относительно поля с частотой  $n_1 - n = 60f_{2s}/p$ . Отсюда следует, что частота ЭДС во вращающемся роторе

$$f_{2s} = \frac{(n_1 - n)p}{60} = \frac{(n_1 - n)f_1}{n_1} = f_1 S,$$

где  $S = (n_1 - n)/n_1$  — скольжение ротора.

Если ротор неподвижен,  $S = 1$  и  $f_2 = f_1$ . При  $S = 0$  (частота вращения ротора равна частоте вращения поля)  $f_{2s} = 0$ , т. е. в роторе переменная ЭДС не индуцируется.

Во вращающемся роторе возникает ЭДС

$$E_{2s} = 4,44f_{2s}w_2\Phi_m = 4,44f_1Sw_2\Phi_m = E_2S.$$

Величина скольжения у асинхронного двигателя обычно невелика — в пределах от 1 до 5 %. Следовательно, даже в худшем случае частота вращения ротора (при  $p = 1$ )

$$n = 60 \frac{f_1(1-S)}{p} = 3000 \cdot 0,95 = 2850 \text{ об/мин,}$$

т. е. она достаточно близка к синхронной.

### 7.3.4. Механическая и рабочие характеристики асинхронного двигателя

☛ Механической характеристикой двигателя называется зависимость частоты вращения его ротора от нагрузки на его валу  $n = f(M_{\text{н}})$ .

При увеличении нагрузки на валу ротора асинхронного двигателя его частота вращения падает, скольжение растет, увеличиваются ЭДС и ток ротора, растет развиваемый электромагнитный момент, который и компенсирует увеличение нагрузки.

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором при неизменном напряжении питания имеет достаточно жесткую (малоизменяющуюся) механическую характеристику, что и обуславливает его широкое применение в качестве приводного двигателя металлорежущих станков и подъемных механизмов.

На рис. 7.20, а показаны механические характеристики двух АД с короткозамкнутым ротором, отличающихся тем, что у одного двигателя активное сопротивление обмотки ротора больше, чем у другого ( $r_{22} > r_{21}$ ). Двигатель с меньшим сопротивлением ротора имеет более жесткую характеристику, в то же время двигатель с большим сопротивлением имеет больший пусковой момент ( $M_{\text{н}2} > M_{\text{н}1}$ ).

Таким образом, регулируя активное сопротивление в цепи ротора (например, в АД с фазным ротором), можно управлять механической характеристикой двигателя, в частности, частотой вращения ротора при определенной величине статического момента  $M_{\text{ст}}$  на валу ротора. Для двигателя с  $r_{22} > r_{21}$  частота вращения  $n'' < n'$ .

Кривая 1 на рис. 7.20, а соответствует двигателю с полым немагнитным ротором (см. подразд. 7.4.3), сопротивление которого велико.



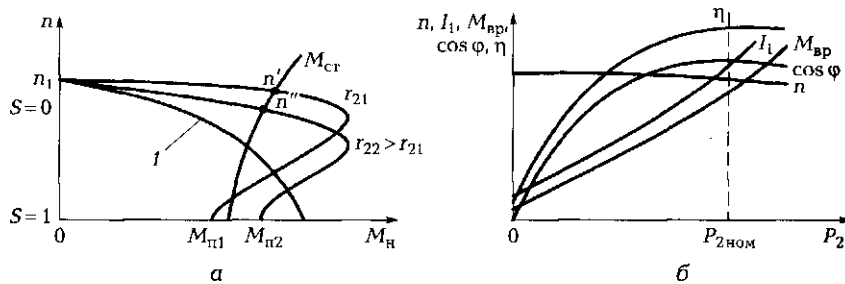


Рис. 7.20. Характеристики асинхронного двигателя:

*а* — механические; *б* — рабочие; 1 — характеристика двигателя с полым немагнитным ротором

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют собой зависимости частоты вращения ротора  $n$ , вращающего электромагнитного момента  $M_{вр}$ , тока статора  $I_1$ , КПД  $\eta$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi$  от полезной механической мощности  $P_2$ . Их примерный вид показан на рис. 7.20, б. Кривая изменения частоты вращения  $n$  не отличается по форме от механической характеристики двигателя. Вращающий момент  $M_{вр}$  и ток статора  $I_1$  пропорциональны полезной механической мощности  $P_2$  и растут с увеличением  $P_2$  почти линейно:

$$M_{вр} = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_2}{2\pi n/60} = \frac{P_2}{0,105n}; \quad I_1 = \frac{P_2}{\sqrt{3}U \cos \varphi}.$$

Незначительная нелинейность кривой  $M_{вр}$  обусловлена небольшим снижением частоты вращения  $n$  с увеличением полезной мощности  $P_2$ .

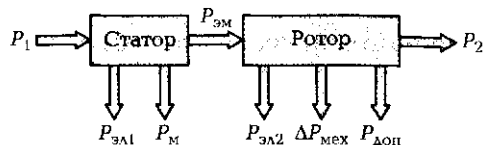
КПД  $\eta$  и  $\cos \varphi$  быстро растут с увеличением полезной мощности и достигают максимальных значений при нагрузке, близкой к номинальной.

### 7.3.5. Потери в асинхронной машине. Энергетическая диаграмма

☛ В отличие от трансформатора в электрических машинах с вращающимся ротором наряду с электрическими и магнитными потерями появляются механические потери.

Они вызваны в первую очередь трением в подшипниках и сопротивлением воздуха. Это существенно снижает КПД электрических машин, в том числе и асинхронного двигателя.

Рис. 7.21. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя



На рис. 7.21 показана энергетическая диаграмма, поясняющая преобразования подводимой к статору электрической мощности  $P_1$ . Часть ее тратится на электрические потери в обмотке статора  $P_{эл1}$ . Оставшаяся часть преобразуется в мощность вращающегося магнитного поля. Но при этом сразу же возникают потери в стали статора — магнитные потери  $P_m$ . Электромагнитная мощность  $P_{эм}$  передается через воздушный зазор со статора на ротор. Под действием  $P_{эм}$  в роторе появляется ток  $i_2$ , а значит, возникают электрические потери  $P_{эл2}$ . Оставшаяся мощность  $P_{эм} - P_{эл2} = P_{мех}$  представляет собой полную механическую мощность, способную совершать работу. Но как только ротор приходит во вращение, появляются механические потери  $\Delta P_{мех}$  (на трение, вентиляцию).

Кроме того, существуют дополнительные потери  $P_{доп}$ , обусловленные отклонением формы магнитного потока от синусоидальной, зубцовыми потерями, определяемыми формой и размерами пазов на внутренней поверхности статора, в которые уложена обмотка, и др.

Оставшаяся мощность  $P_2$  — полезная механическая мощность, способная совершать работу.

Таким образом, суммарные потери в асинхронной машине

$$\sum P = P_{эл1} + P_m + P_{эл2} + \Delta P_{мех} + P_{доп}.$$

В этом случае КПД

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_1}.$$

Коэффициент полезного действия трехфазного АД лежит в диапазоне 65... 95 %, причем, чем выше мощность, тем выше КПД двигателя. У однофазных АД коэффициент полезного действия обычно не превышает 80 %.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. Чему будет равен вращающий момент трехфазного асинхронного двигателя УАД-62 при напряжении питания 36 В, если при но-

минальном питающем напряжении 220 В его номинальный вращающий момент составляет 0,21 Н·м?

*Решение.* Вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату приложенного к обмотке статора напряжения:  $M_{\text{ном}} = kU_{\text{ном}}^2$ . При напряжении 36 В искомый вращающий момент

$$\begin{aligned} M_{36} &= kU_{36}^2 = (M_{\text{ном}}/U_{\text{ном}}^2)U_{36}^2 = M_{\text{ном}}(U_{36}/U_{\text{ном}})^2 = 0,21(36/220)^2 = \\ &= 0,0056 \text{ Н}\cdot\text{м} = 0,56 \text{ Н}\cdot\text{см}. \end{aligned}$$

*Ответ.* При пониженном напряжении 36 В вращающий момент двигателя УАД-62 составит 0,56 Н·см.

2. Определите линейный ток, потребляемый трехфазным асинхронным двигателем серии 4А, номинальная мощность которого равна 55 кВт, линейное напряжение при соединении обмоток треугольником — 380 В, звездой — 660 В, коэффициент полезного действия — 92 %, коэффициент мощности — 0,84. Расчет выполните для обоих вариантов соединения обмоток.

*Решение.* Электрическая мощность, потребляемая двигателем из сети,

$$P_{\text{эл}} = P_{\text{ном}}/\eta = 55/0,92 = 59,8 \text{ кВт}.$$

Трехфазный асинхронный двигатель представляет собой симметричную нагрузку, следовательно:

$$P_{\text{ф}} = U_{\text{ф}}I_{\text{ф}} \cos \varphi_{\text{ф}}; P_{\text{эл}} = 3P_{\text{ф}} = 3U_{\text{ф}}I_{\text{ф}} \cos \varphi_{\text{ф}}; I_{\text{ф}} = P_{\text{эл}}/(3U_{\text{ф}} \cos \varphi_{\text{ф}}).$$

При включении обмоток треугольником

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}} = \sqrt{3}P_{\text{эл}}/(3U_{\text{л}} \cos \varphi_{\text{ф}}) = \sqrt{3} \cdot 59\,800/(3 \cdot 380 \cdot 0,84) = 108 \text{ А}.$$

При включении обмоток звездой

$$I_{\text{л}} = I_{\text{ф}} = P_{\text{эл}}/(3(U_{\text{л}}/\sqrt{3}) \cos \varphi_{\text{ф}}) = 59\,800/(3(660/\sqrt{3}) \cdot 0,84) = 62 \text{ А}.$$

*Ответ.* Линейный ток, потребляемый трехфазным асинхронным двигателем при соединении обмоток треугольником равен 108 А, а при соединении звездой — 62 А.

3. Как изменится частота вращения магнитного поля, если обмотки статора трехфазного асинхронного двигателя, соединенные определенным образом, включить в одну из фаз трехфазной сети, от которой питался двигатель?

*Ответ.* Никак не изменится. Частота вращения магнитного поля машин переменного тока ( $n_1 = 60f/p$ ) определяется частотой питающего напряжения  $f$ . Однофазная сеть является частью трехфазной, поэтому имеет ту же частоту, например промышленную 50 Гц.

## Задачи и вопросы для самостоятельного решения

4. Вычислите скольжение в асинхронном двигателе, если при частоте питающей сети 50 Гц частота вращения ротора равна  $1470 \text{ мин}^{-1}$ .

5. Определите частоту вращения ротора асинхронного двигателя шестиполюсной машины при частоте питающей сети 50 Гц и скольжении 4 %.

6. Чему равна ЭДС в неподвижном роторе асинхронной машины, если при скольжении 0,05 ЭДС составляет 2 В?

7. Какую максимальную частоту вращения может иметь четырехполюсный двигатель, работающий от бортовой сети питания самолета частотой 400 Гц?

8. Коэффициент полезного действия трехфазного асинхронного двигателя равен 85 %, коэффициент мощности — 0,8. Двигатель потребляет из сети активную мощность 1,6 кВт. Определите номинальную мощность, развиваемую двигателем.

9. Вычислите КПД асинхронного двигателя, если в процессе опытов холостого хода, короткого замыкания и при номинальной нагрузке ваттметр, включенный в одну из фаз, показал соответственно 400 Вт, 500 Вт и 10 кВт.

10. Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности асинхронного двигателя номинальной мощностью 400 Вт равны соответственно 80 % и 0,5. Определите полную мощность, потребляемую двигателем из сети.

11. Вычислите номинальный вращающий момент трехфазного асинхронного двигателя марки 4АА63А2У3, в паспортных данных которого указаны номинальная мощность 370 Вт и номинальная частота вращения ротора  $2750 \text{ мин}^{-1}$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Что лежит в основе работы асинхронных электрических машин:
  - а) пульсирующее магнитное поле;
  - б) вращающееся магнитное поле;
  - в) постоянное магнитное поле;
  - г) переменное магнитное поле?
2. Что произойдет, если частота вращения ротора асинхронного двигателя станет равной частоте вращающегося магнитного поля:

- а) в обмотке ротора не будет наводиться ЭДС;
  - б) ток в обмотке ротора станет равен нулю;
  - в) не будет создаваться вращающий момент;
  - г) происходит все перечисленное?
3. Укажите верное выражение для синхронной частоты вращения:
- а)  $n_1 = 60fp$ ;
  - б)  $n_1 = 60p/f$ ;
  - в)  $n_1 = 60f/p$ ;
  - г)  $n_1 = f/(60p)$ .
4. Как изменится ЭДС во вращающемся роторе при уменьшении скольжения:
- а) не изменится;
  - б) увеличится;
  - в) уменьшится;
  - г) поведет себя непредсказуемо?
5. Как изменится частота вращения асинхронного двигателя российского производства, если его включить в американскую электрическую сеть:
- а) не изменится;
  - б) увеличится;
  - в) уменьшится;
  - г) поведет себя непредсказуемо?
6. Укажите основные узлы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:
- а) статор и ротор;
  - б) коллектор и статор;
  - в) ротор и щетки;
  - г) щетки и кольца.
7. С какой целью статор АД изготавливают из тонких электрически изолированных ферромагнитных пластин:
- а) для уменьшения механических потерь;
  - б) для уменьшения потерь на вихревые токи и гистерезис;
  - в) для уменьшения потерь на демпфирование;
  - г) для уменьшения электрических потерь?
8. Как могут быть включены обмотки статора трехфазного АД:
- а) последовательно;
  - б) параллельно;
  - в) смешанно;
  - г) звездой или треугольником?
9. Как обозначают начала обмоток статора трехфазного АД:
- а) C1, C3, C5;

- б) C1, C2, C3;
- в) C4, C5, C6;
- г) C2, C4, C6?

10. Какие потери присутствуют в АД, но отсутствуют в трансформаторе:
- а) электрические;
  - б) механические;
  - в) асинхронные;
  - г) магнитные?
11. Где нашел основное применение трехфазный АД:
- а) в электрокарах;
  - б) на транспорте;
  - в) в металлорежущих станках и подъемных механизмах;
  - г) в быту?

## **7.4. ПУСК И РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ. ОДНОФАЗНЫЕ И УНИВЕРСАЛЬНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ**

---

### **ТЕОРИЯ**

#### **7.4.1. Реверсирование и схемы пуска трехфазного асинхронного двигателя**

☛ Направление вращения ротора асинхронной машины определяется направлением вращения магнитного поля, т. е. порядком чередования фаз (*ABC* — прямой порядок чередования фаз). Следовательно, для изменения направления вращения ротора (реверсирования) необходимо изменить направление вращения поля или порядок чередования фаз, т. е. поменять местами начала любых двух фаз.

Например, порядок чередования фаз *ACB* заставит ротор вращаться в обратную сторону.

В отличие от машин постоянного тока, у которых пусковой ток при неподвижном роторе может превышать номинальный в 20—50 раз, у АД это соотношение равно 4—7, поскольку обмотки статора имеют значительное индуктивное сопротивление переменному току, ограничивающее пусковой ток. Поэтому с АД, как правило,

не случаются неприятности при пуске. Приходится лишь при проектировании учитывать кратковременное повышение тока, закладывая чуть бóльшую площадь сечения проводов обмотки статора.

☛ Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором обычно запускают путем непосредственного подключения к источнику переменного напряжения номинальной величины, т. е. для такого двигателя характерен прямой пуск (рис. 7.22, а).

☛ Асинхронный двигатель с фазным ротором позволяет снизить пусковые токи за счет включения в обмотки ротора через контактные кольца трехфазного реостата (см. рис. 7.19, б). Это не только уменьшает ток ротора, а значит, и ток статора до заданных значений, но и позволяет повысить пусковой момент.

При одновременном включении большого числа АД (например, утром в цехе) может «подсаживаться» сеть, что плохо влияет на работу других потребителей.

☛ Автотрансформаторный пуск (рис. 7.22, б) позволяет запустить двигатель при пониженном напряжении, а после его разгона подать номинальное напряжение питания.

С этой же целью используется пуск с переключением обмоток статора с соединения звездой на соединение треугольником. При одном и том же линейном напряжении питания обмоток, соединенных звездой и треугольником, токи в линии различаются в 3 раза. Действительно:

$$I_{\Delta, зв} = I_{\phi, зв} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3}Z_{\phi}};$$

$$I_{\Delta, тр} = \sqrt{3}I_{\phi, тр} = \frac{\sqrt{3}U_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{\sqrt{3}U_{\Delta}}{Z_{\phi}},$$

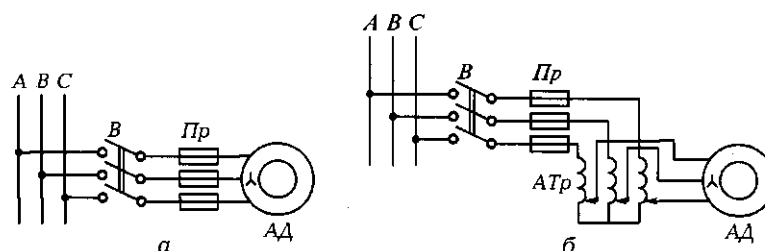


Рис. 7.22. Схемы прямого (а) и автотрансформаторного (б) пуска трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

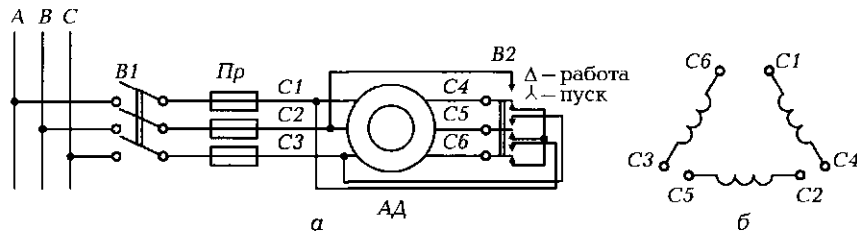


Рис. 7.23. Схема пуска асинхронного двигателя с переключением обмоток соединения звездой на соединение треугольником (а) и схема обмоток статора, соединяемых треугольником (б)

откуда

$$\frac{I_{\Delta\text{тр}}}{I_{\lambda\text{зв}}} = 3.$$

Вот почему пуск низковольтных АД средней и большой осуществляется выключателем  $B1$  при соединении обмоток звездой, а далее в рабочем режиме обмотки переводятся переключателем  $B2$  в соединение треугольником (рис. 7.23).

#### 7.4.2. Регулирование частоты вращения трехфазного асинхронного двигателя

Частота вращения АД определяется выражением

$$n = n_1(1 - S) = \frac{f_1}{p}(1 - S).$$

Из формулы следует, что регулирование возможно за счет изменения:

- числа пар полюсов  $p$  — дискретно;
  - частоты питающей сети  $f_1$  — плавно;
  - скольжения  $S$  — плавно.
- ☛ Регулирование частоты вращения за счет *изменения числа пар полюсов* осуществляется в так называемых многоскоростных машинах, которые имеют несколько пар полюсов и возможность их переключения в процессе эксплуатации.

Промышленность выпускает многоскоростные двигатели с числом пар полюсов 1, 2, 3, 4 и 6, что позволяет иметь синхронные частоты вращения магнитного поля 3 000, 1 500, 1 000, 750 и 500 мин<sup>-1</sup>.



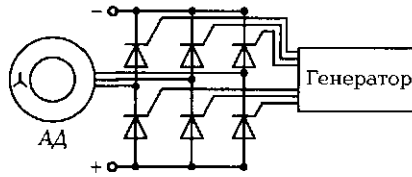


Рис. 7.24. Схема частотного регулирования частоты вращения ротора трехфазного асинхронного двигателя

➤ Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя за счет изменения частоты питающей сети осуществляется с помощью мощных полупроводниковых преобразователей частоты (инверторов), построенных на управляемых вентилях (тиристорах).

Маломощный генератор управляет работой вентилях, заставляя их переключаться с частотой, обеспечивающей необходимую частоту вращения ротора (рис. 7.24). Подводимое к инвертору постоянное напряжение преобразуется в переменное практически любой частоты.

Регулирование частоты вращения за счет изменения скольжения АД возможно при работе двигателя под нагрузкой путем изменения напряжения питания  $U_1$ .

Уменьшение  $U_1$  ведет к уменьшению развиваемого момента, пропорционального  $U_1^2$ , при этом скольжение растет, а частота вращения двигателя падает, поскольку  $n = n_1(1 - S)$ .

### 7.4.3. Однофазные асинхронные двигатели

В быту, где потребление электрической энергии не столь велико, как в промышленности, а сеть однофазная, широко используются однофазные АД (для холодильников, стиральных машин, вентиляторов, электроинструмента и т. д.). Принцип их работы не отличается от принципа работы трехфазных двигателей.

➤ Различие лишь в том, что на статоре размещаются две обмотки, сдвинутые на  $90^\circ$  (а не три, сдвинутые на  $120^\circ$ ) и питаемые токами, сдвинутыми по фазе на  $90^\circ$  (а не на  $120^\circ$ ).

Поскольку к статору однофазного двигателя подводится однофазное напряжение, то для сдвига фаз в обмотках применяются дополнительные устройства. Наиболее простым из них является конденсатор, включаемый последовательно с одной из обмоток (см. рис. 7.18, в). Он позволяет сдвинуть по фазе токи в обмотках, а зна-

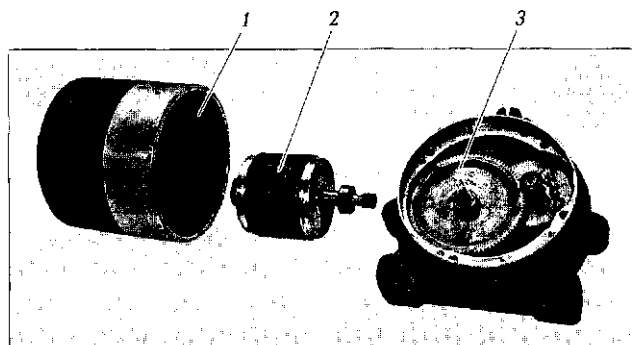


Рис. 7.25. Составные части однофазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и редуктором:  
1 — обмотка статора; 2 — ротор; 3 — редуктор

чит, и магнитные потоки практически на  $90^\circ$ , что приводит к созданию вращающегося магнитного поля. Такие электрические машины получили название «конденсаторные двигатели». Они применяются, как правило, в быту.

Ротор однофазных машин в основном выполняют в двух вариантах:

- короткозамкнутым, аналогичным ротору трехфазной машины (рис. 7.25);
- в виде полого алюминиевого стаканчика (полюс ротор).

Асинхронный двигатель с полым ротором (рис. 7.26) имеет внутренний 5 и внешний 2 статоры из листовой стали, располагаемые в корпусе 1. На внешнем статоре размещаются две обмотки

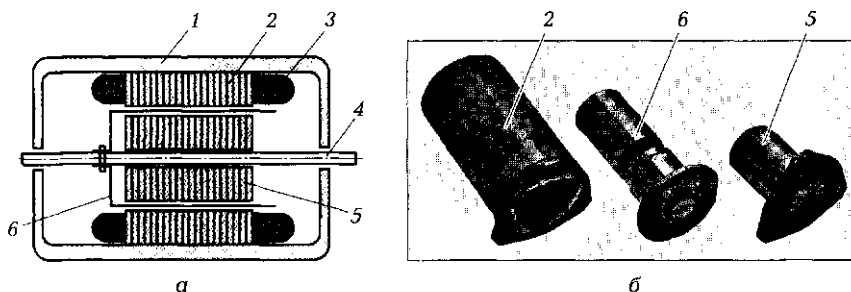


Рис. 7.26. Асинхронный двигатель с полым ротором:  
а — конструктивная схема; б — внешний вид составных частей двигателя; 1 — корпус; 2 — внешний статор; 3 — обмотка статора; 4 — ось; 5 — внутренний статор; 6 — ротор

3, сдвинутые в пространстве на  $90^\circ$ . Внутренний статор служит для уменьшения сопротивления магнитному потоку. Между статорами на оси 4 вращается ротор 6 — алюминиевый тонкостенный стаканчик (толщина стенок 0,1 ... 1,0 мм).

В основу работы такого двигателя положено взаимодействие вращающегося магнитного поля, создаваемого обмотками статора, с вихревыми токами, наводимыми этим полем в алюминиевом стаканчике. Момент инерции ротора мал, и быстродействие двигателя велико.

Толщина стенок стаканчика мала, поэтому его активное сопротивление  $r_2$  большое, пусковой момент  $M_{п}$  также большой, а механическая характеристика  $n = f(M_{п})$  достаточно крутая (см. кривую 1 на рис. 7.20, а). Это позволяет за счет изменения подводимого напряжения  $U_1$  изменять частоту вращения ротора от максимальной (синхронной) до нуля. Двигатели с полым ротором в основном применяются в качестве исполнительных двигателей в системах автоматического управления. Они просты, надежны, имеют высокое быстродействие и широкий диапазон регулирования частоты вращения.

Однофазные асинхронные двигатели с расщепленными (экранированными) полюсами также находят применение в промышленности и быту. Сдвиг магнитных потоков в них обеспечивается за счет того, что часть полюса 4 (рис. 7.27), на котором расположена однофазная обмотка 1, охватывается короткозамкнутым (КЗ) витком 2 — как правило, медным или алюминиевым кольцом. Пере-

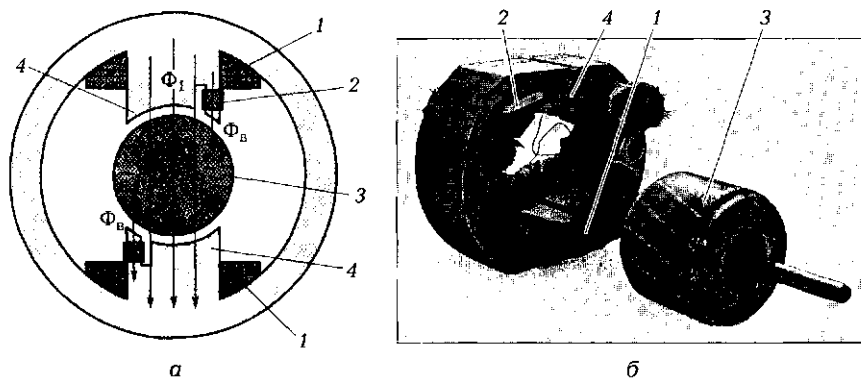


Рис. 7.27. Конструктивная схема двигателя с расщепленными полюсами (а) и внешний вид составных частей двигателя (б):

1 — обмотки; 2 — короткозамкнутый виток; 3 — ротор; 4 — расщепленные полюсы

менный магнитный поток  $\Phi_1$  индуцирует в КЗ витке ЭДС и ток  $I_k$ , который создает переменный магнитный поток  $\Phi_k$ . Таким образом, в расщепленной части полюса действует результирующий поток  $\Phi_{\Sigma} = \Phi_1 + \Phi_k$ , сдвинутый по фазе относительно  $\Phi_1$ . Два сдвинутых по фазе магнитных потока способны создавать магнитное поле, приближающееся по своему действию к вращающемуся полю. В результате возникает вращающий момент, увлекающий ротор 3 в направлении вращения поля.

Мощность таких двигателей небольшая (до 25 Вт), невелик и пусковой момент. Основное применение они нашли в небольших вентиляторах, электропроигрывателях, лентопротяжных механизмах.

#### 7.4.4. Универсальные асинхронные двигатели

Универсальными асинхронными двигателями называются такие двигатели, которые рассчитаны на работу как от трехфазной, так и от однофазной сети переменного тока.

Это машины небольшой мощности (до 100 Вт). Наибольшее применение нашли двигатели серии УАД. На статоре размещается трехфазная обмотка с шестью выводами, которые могут быть включены соответствующим образом либо в однофазную сеть, либо в трехфазную. Рабочие характеристики двигателя в однофаз-

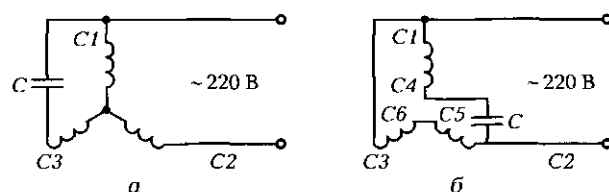


Рис. 7.28. Возможные схемы (а, б) включения обмоток универсального асинхронного двигателя в однофазную сеть

ном режиме несколько хуже, чем в трехфазном. Например, УАД-72 в трехфазном режиме развивает мощность 70 Вт, при этом его КПД составляет 65%. В однофазном режиме указанные параметры равны соответственно 50 Вт и 60%.

Возможные схемы включения обмоток универсального асинхронного двигателя в *однофазную* сеть показаны на рис. 7.28. При включении в трехфазную сеть схемы соединения обмоток типичные — звездой или треугольником.

## ПРАКТИКА

### Работа в лаборатории

1. Изучение схем включения универсальных асинхронных двигателей в однофазную и трехфазную сети.
2. Изучение схем включения АД с расщепленными полюсами в однофазную сеть.
3. Изучение схем включения АД с полым немагнитным ротором в однофазную сеть.

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

1. Номинальная частота вращения асинхронного двигателя 480 об/мин. Определите его скольжение и число пар полюсов.
2. Как изменится частота вращения двухполюсного асинхронного двигателя, работающего от источника питания частотой 100 Гц, если скольжение АД увеличится с 5 до 20 %?
3. У двухполюсного асинхронного двигателя с частотным управлением частота питания обмоток статора изменяется в диапазоне 1 ... 200 Гц. При этом номинальное скольжение остается неизменным и равным 4 %. В каком диапазоне изменяется частота вращения ротора?

### КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Чем обмотки статора однофазного АД отличаются от обмоток статора трехфазного АД:
  - а) не имеют лобовой части;
  - б) сдвинуты в пространстве друг относительно друга на 90°;
  - в) укладываются неравномерно по окружности;
  - г) короче на 13,3 %?
2. Что необходимо для создания вращающегося магнитного поля в однофазных АД с двумя обмотками на статоре:
  - а) использование фазосдвигающей цепочки;
  - б) применение специального выключателя;
  - в) специальная конструкция ротора;
  - г) наличие колодки зажимов?
3. Какую роль играет короткозамкнутый виток на части полюса однофазного АД:
  - а) служит для фиксации обмотки статора;

- б) является фазосдвигающей цепочкой для магнитных потоков;
  - в) обеспечивает сдвиг токов в пространстве;
  - г) снижает потери на вихревые токи?
4. Каково основное применение однофазных АД с полым немагнитным ротором:
- а) в качестве приводных двигателей в электроинструментах;
  - б) качестве приводных двигателей бытовых приборов;
  - в) качестве исполнительных двигателей в автоматических системах управления;
  - г) качестве приводных двигателей подъемных механизмов?
5. Для чего служит внутренний статор в АД с полым немагнитным ротором:
- а) для уменьшения трения;
  - б) для уменьшения магнитного сопротивления;
  - в) для уменьшения скольжения;
  - г) для увеличения мощности?
6. Сколько обмоток на статоре у АД с расщепленными полюсами:
- а) две;
  - б) одна;
  - в) три;
  - г) зависит от области применения двигателя?
7. Что характерно для универсальных АД:
- а) возможность работы как в трехфазной, так и в однофазной сети;
  - б) возможность изменять направление вращения ротора;
  - в) возможность достигать высокой частоты вращения;
  - г) возможность легко получать высокий КПД?

## 7.5. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

### ТЕОРИЯ

#### 7.5.1. Конструкция синхронной машины

☛ Синхронная машина (СМ) — это электрическая машина переменного тока, у которой частота вращения ротора равна частоте вращения магнитного поля, создаваемого обмотками статора.

Основное применение в промышленности нашли *трехфазные синхронные машины*. Они широко используются как в качестве

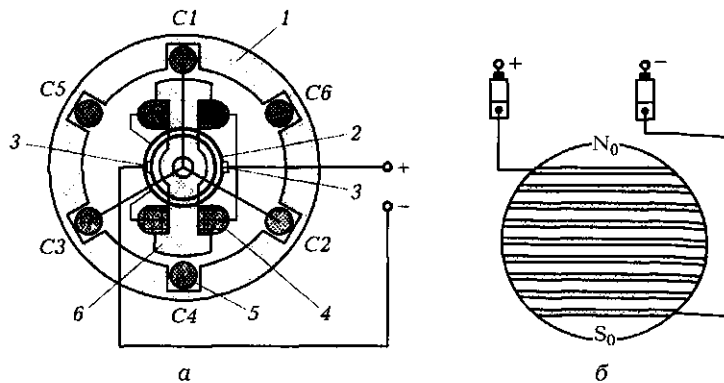


Рис. 7.29. Конструктивная схема трехфазной синхронной машины с явнополюсным ротором (а) и неявнополюсный ротор (б):

1 — статор; 2 — контактные кольца; 3 — щетки; 4 — обмотка ротора; 5 — обмотка статора; 6 — ротор

двигателей, так и в качестве генераторов. Трехфазные синхронные генераторы являются основными источниками электрической энергии, производимой на электростанциях (гидравлических, тепловых, атомных, ветряных и др.).

На рис. 7.29, а показана конструктивная схема трехфазной синхронной машины. Статор 1 ничем ни отличается от статора асинхронного двигателя, имеет три обмотки 5 и при работе машины в режиме двигателя служит для создания вращающегося магнитного поля. В режиме генератора обмотки статора служат для получения трехфазной системы ЭДС.

Ротор 6 имеет обмотку 4, выполненную из изолированного провода и питаемую постоянным током через контактные кольца 2 и щетки 3. Кольца находятся на оси ротора и вращаются вместе с ним. Неподвижные щетки располагаются на корпусе и при работе скользят по кольцам. Ротор может быть явнополюсным, как на рис. 7.29, а, или неявнополюсным (рис. 7.29, б). Неявнополюсный ротор используется в высокоскоростных машинах с частотами вращения вплоть до 3 000 об/мин.

Основное назначение обмоток ротора — создание *постоянного магнитного поля*.

Обмотка ротора питается постоянным током, поэтому потери на вихревые токи в установившемся режиме в роторе отсутствуют и он может быть выполнен из цельного куска электротехнической стали. У явнополюсного ротора обмотка располагается на полюсах в виде катушек. Если ротор неявнополюсный, на его цилиндриче-

ской поверхности фрезеруют пазы, в которые укладывают обмотку ротора (возбуждения).

### 7.5.2. Принцип действия синхронной машины при работе в режиме двигателя

Работа синхронной машины в режиме двигателя может быть проанализирована на примере магнитной муфты, состоящей из двух магнитов (рис. 7.30).

Ведущим является внешний магнит 1, создающий магнитное поле  $N-S$ , аналогичное вращающемуся магнитному полю  $\Phi$  статора. Внутренний магнит 2, создающий поле  $S_0-N_0$ , аналогичен ротору СМ с постоянным магнитным потоком  $\Phi_0$ , создаваемым обмоткой на роторе.

При работе магнитной муфты происходит взаимодействие магнитных полей внешнего и внутреннего магнитов. Вращающийся с помощью первичного двигателя с угловой частотой  $\omega_1$  внешний магнит за счет сцепления магнитных потоков увлекает за собой внутренний магнит. Причем установившиеся частоты вращения внутреннего и внешнего магнитов одинаковы (синхронны) и равны  $\omega_1$ .

Тот же принцип положен в основу работы синхронного двигателя (СД).

➡ Вращающий момент создается за счет взаимодействия вращающегося магнитного поля статора с постоянным магнитным полем, создаваемым обмоткой ротора.

При отсутствии момента, противодействующего вращению внутреннего магнита ( $M_{пр} = 0$ ), угол  $\theta$  между осями магнитов равен 0. Если к оси внутреннего магнита (или ротора синхронного двигателя) приложить противодействующий момент  $M_{пр}$  (нагрузку), то внутренний магнит (ротор) отстанет на угол  $\theta$  от внешнего магнита, но будет продолжать вращаться с той же частотой  $\omega_1$ . Увеличение нагрузки ведет лишь к увеличению угла  $\theta$ . В предельном случае при  $\theta > \theta_{крит}$  полюса внутреннего магнита выйдут из-под полюсов внешнего магнита, сопротивление магнитному потоку резко возрастает, развиваемый момент снижается и двигатель выпадает из синхронизма (ротор останавливается).

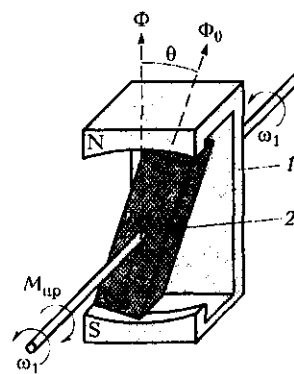


Рис. 7.30. Магнитная муфта:

1 — внешний магнит; 2 — внутренний магнит



### 7.5.3. Принцип действия синхронной машины при работе в режиме генератора

Снова поведем анализ на примере магнитной муфты (см. рис. 7.30). Если вращать извне (например, с помощью турбины) внутренний магнит (или ротор СМ), а к оси внешнего магнита приложить противодействующий момент  $M_{пр}$  (или подключить к обмотке статора СМ нагрузку — режим генератора), то внутренний магнит будет опережать следующий за ним внешний магнит на угол  $\theta$ , при этом оба магнита будут вращаться с одной и той же частотой  $\omega_1$ .

☛ Наибольшее применение СМ нашла именно в качестве генератора. Первичным двигателем может служить паровая турбина (в этом случае приводимая СМ носит название турбогенератор), гидравлическая турбина (гидрогенератор) или дизель.

*Турбогенераторы* — быстроходные (при  $f = 50$  Гц и  $p = 1$   $n_1 = 3000$  об/мин) двухполюсные машины с неявнополюсным ротором, имеющим диаметр до 1,5 м и длину до 20 м. Рабочее положение ротора — горизонтальное.

*Гидрогенераторы* — тихоходные многополюсные (до 100 полюсов) машины с явнополюсным ротором. Например, гидрогенератор Днепровской ГЭС при  $p = 36$  имеет частоту вращения  $n_1 = 83$  об/мин. Именно такая частота вращения обеспечивает на зажимах генератора напряжение частотой 50 Гц. Ротор гидрогенератора может иметь диаметр до 20 м и длину до 5 м. Рабочее положение ротора — преимущественно вертикальное.

☛ В синхронном генераторе (СГ) используется явление электромагнитной индукции: при пересечении проводников статора магнитным полем в них индуцируется ЭДС.

В данном случае постоянное поле, создаваемое обмоткой возбуждения ротора и вращающееся под действием внешней силы (турбины), наводит ЭДС в неподвижных обмотках статора. Если машина трехфазная, то наводятся три одинаковые ЭДС, сдвинутые по фазе на  $120^\circ$ .

### 7.5.4. Особенности пуска синхронного двигателя

При включении обмоток 2 (рис. 7.31, а), располагаемых на статоре 1 синхронного двигателя, в трехфазную сеть и подключении

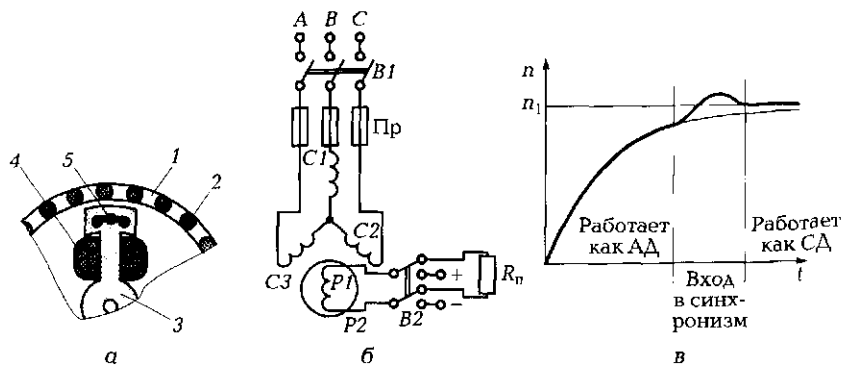


Рис. 7.31. Синхронный двигатель:

а — конструктивная схема с пусковой обмоткой; б — схема пуска; в — временная диаграмма разгона ротора; 1 — статор; 2 — обмотки статора; 3 — ротор; 4 — обмотка возбуждения ротора; 5 — пусковая обмотка

обмотки возбуждения 4, располагаемой на роторе 3, к источнику постоянного напряжения момент на валу двигателя изменяется с частотой  $f = f_1 \cdot 2p$  (при  $f_1 = 50$  Гц и  $p = 1$   $f = 100$  Гц).

☛ При такой высокой частоте и значительном моменте инерции ротор остается неподвижным.

Для разгона СД его ротор снабжают специальной пусковой обмоткой 5, аналогичной беличьему колесу в асинхронном двигателе.

Стержни пусковой обмотки закладывают в полюсы ротора и соединяют по торцам замыкающими шинами. При этом СД пускают прямым включением в сеть, как АД (рис. 7.31, б). Предварительно переключатель В2 устанавливают в положение, при котором обмотка возбуждения ротора P1 — P2 подключается к пусковому резистору Rn. Это необходимо сделать, поскольку при разгоне ротора в его обмотке возбуждения индуцируется значительная ЭДС, которая может вывести из строя источник постоянного напряжения, питающий данную обмотку. Затем включают выключатель В1 и после достижения ротором частоты, близкой к синхронной частоте вращения, переключателем В2 подключают обмотку P1 — P2 к источнику постоянного напряжения.

Вначале СМ работает, как АМ: вращающееся магнитное поле наводит в пусковой короткозамкнутой обмотке неподвижного ротора ЭДС, в обмотке начинают течь токи, которые взаимодействуют с вращающимся полем, в результате чего создается вращающий момент, увлекающий ротор в направлении вращения поля. Когда частота вращения  $n$  приближается к синхронной частоте  $n_1$  (рис. 7.31, в), ро-

тор входит в синхронизм и продолжает далее вращаться с частотой  $n_1$ . Пусковая обмотка на роторе прекращает действовать, так как она теперь не пересекается вращающимся полем статора.

### 7.5.5. Синхронные машины малой мощности

Питание обмотки ротора в СМ постоянным током создает два неблагоприятных фактора:

- нужен источник постоянного напряжения;
- требуется контактное устройство (кольца со щетками), снижающее надежность машины.

☛ Для синхронных машин небольшой мощности (до 300 Вт) можно вместо электромагнита на роторе использовать постоянный магнит с высокой коэрцитивной силой.

Такие машины получили название *гистерезисные*. В них магниты заливают алюминием, образуя сплошной цилиндр (рис. 7.32, а). Алюминий играет роль пусковой обмотки, в которой под влиянием вращающегося магнитного поля наводятся вихревые токи. Под действием этих токов ротор приходит во вращение аналогично короткозамкнутому ротору АД.

Широкое применение среди машин малой мощности нашли также *реактивные двигатели*. У них постоянное поле на роторе отсутствует. Вращение ротора обеспечивается его особой формой (рис. 7.32, б, в) и «упругостью» магнитных силовых линий, которые заставляют ротор при отсутствии нагрузки ( $M_{пр} = 0$ ) располагаться по оси полюса статора и вращаться синхронно с полем статора. При

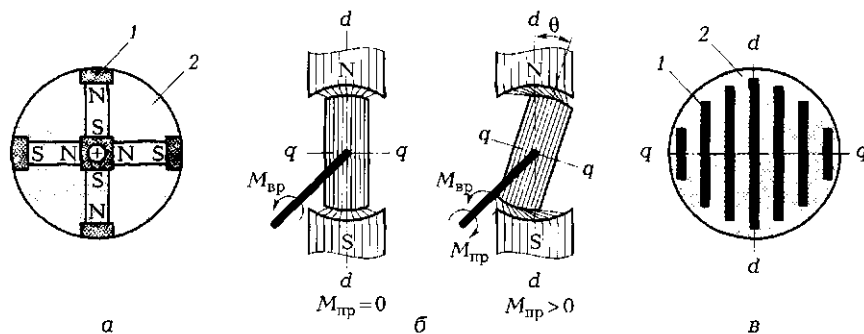


Рис. 7.32. Конструктивные схемы роторов синхронных машин малой мощности:

а — гистерезисной; б, в — реактивных; 1 — стальные детали; 2 — алюминий

наличии нагрузки ( $M_{пр} > 0$ ) ротор отстает от оси полюса на угол  $\theta$ , но продолжает вращаться с синхронной частотой.

Ротор, показанный на рис. 7.32, б, выполнен в виде скошенного по бокам цилиндра из ферромагнитного материала, а у ротора на рис. 7.32, в стальные полосы залиты алюминием. В обоих случаях намагниченность по оси  $d-d$  обеспечивается существенно легче, чем по оси  $q-q$ .

## ПРАКТИКА

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

1. Ротор гидрогенератора Саяно-Шушенской ГЭС вращается с частотой 142,8 об/мин. При этом частота напряжения на шинах электростанции 50 Гц. Определите число пар полюсов синхронного генератора.

2. Чему будет равна частота напряжения на шинах четырехполюсного синхронного генератора, если частота вращения его ротора 3 000 об/мин?

3. Определите частоту вращения ротора восьмиполюсного синхронного генератора, обеспечивающую частоту напряжения на зажимах генератора 400 Гц.

4. Определите коэффициент мощности на шинах электростанции, если суммарная мощность всех трехфазных синхронных генераторов, обмотки которых соединены звездой, равна 40 МВт, фазное напряжение — 10 кВ, суммарный ток в линии — 1,5 кА.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Чем синхронный двигатель отличается от асинхронного:
  - а) частоты вращения ротора и магнитного поля не совпадают;
  - б) частота вращения ротора равна частоте вращения магнитного поля;
  - в) частота вращения ротора выше частоты вращения магнитного поля;
  - г) частота вращения ротора ниже частоты вращения магнитного поля?
2. С какой целью ротор синхронного двигателя снабжают дополнительной обмоткой, аналогичной обмотке ротора асинхронного двигателя:
  - а) для создания начального вращающего момента;

- б) для увеличения номинальной частоты вращения;
  - в) для быстрого торможения;
  - г) для уменьшения пусковых токов?
3. Что мешает ротору синхронного двигателя сразу же после подачи питания на обмотку статора придать во вращение:
- а) кольца со щетками;
  - б) высокая частота изменения момента на валу и значительный момент инерции ротора;
  - в) высокий пусковой момент;
  - г) низкое напряжение на обмотке ротора?
4. Что положено в основу работы синхронного двигателя:
- а) взаимодействие вращающегося магнитного поля, создаваемого обмотками статора, с вращающимся магнитным полем, создаваемым обмотками ротора;
  - б) синхронная работа;
  - в) преобразование электрической энергии в тепловую;
  - г) взаимодействие вращающегося магнитного поля, создаваемого обмотками статора, с постоянным магнитным полем, создаваемым обмотками ротора?
5. Можно ли статор асинхронной машины использовать в качестве статора синхронной машины:
- а) можно при определенной доработке;
  - б) нельзя ни при каких условиях;
  - в) можно без всяких доработок;
  - г) можно только при работе в режиме генератора?
6. Какая составная часть синхронной машины отсутствует у асинхронной машины с короткозамкнутым ротором:
- а) статор;
  - б) ротор;
  - в) коллектор;
  - г) кольца со щетками?
7. Укажите назначение обмотки ротора синхронной машины:
- а) создание постоянного магнитного поля;
  - б) создание переменного магнитного поля;
  - в) создание вращающегося магнитного поля;
  - г) создание электрического поля.
8. Почему именно синхронные машины применяются в лентопротяжных механизмах:
- а) они просты в обслуживании;
  - б) они обеспечивают неизменную частоту вращения;
  - в) они надежны;
  - г) они имеют небольшой вес?

## 7.6. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА

### ТЕОРИЯ

#### 7.6.1. Принцип получения постоянной ЭДС

Как в любой электрической машине в основу действия машины постоянного тока (МПТ) положено взаимодействие магнитного поля и проводников с током.

Если поместить рамку в постоянное магнитное поле  $\Phi$  и вращать ее с постоянной частотой  $\omega$ , то в ней наводится переменная ЭДС  $e(t)$ . С помощью контактных колец, расположенных на оси рамки, и неподвижных щеток эта ЭДС может быть подведена к нагрузке. По такому принципу устроен генератор переменного тока (рис. 7.33, а).

Если же кольца заменить на два полукольца (рис. 7.33, б), изолированных друг от друга и связанных каждое со своим проводником, то при вращении на щетках будет наводиться пульсирующая ЭДС одного знака (рис. 7.33, в). Напряжение на нагрузке окажется выпрямленным. По такому принципу устроен генератор постоянного тока.

Если взять две взаимно-перпендикулярные рамки и четыре полукольца, то пульсации выпрямленного напряжения станут меньше (рис. 7.33, г). Если же имеются  $l$  рамок и  $2l$  полуколец, то напряжение и ток становятся практически постоянными (при  $l > 16$  коэффициент пульсаций  $p < 1\%$ ).

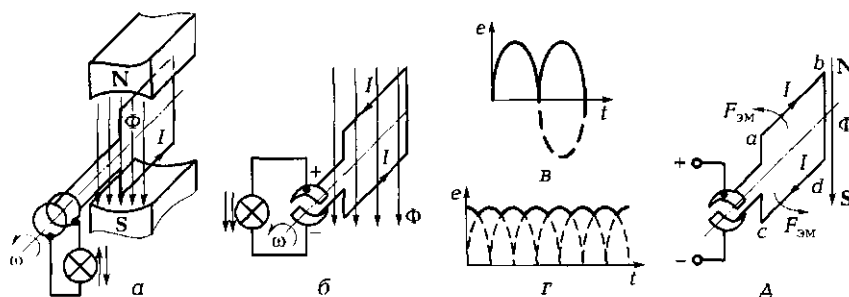


Рис. 7.33. Схемы и графики [а—д], поясняющие принцип получения пульсирующей ЭДС

## 7.6.2. Конструкция и принцип действия машины постоянного тока

Характерной частью МПТ является коллектор — устройство, преобразующее наводимую в обмотке ротора (рамке) ЭДС переменного тока в пульсирующее напряжение на щетках при работе МПТ в режиме *генератора*.

В силу обратимости МПТ может работать и в режиме *двигателя*. Для этого к щеткам необходимо подвести постоянное напряжение. В данном случае коллектор преобразует постоянный ток, подводимый к щеткам, в переменный ток в обмотке ротора. Это позволяет сохранить направление электромагнитной силы  $F_{эм}$  неизменным (рис. 7.33, д), так как при переходе обмотки ротора из зоны полюса одной полярности (например, N) в зону полюса другой полярности (S) ток в проводнике изменяет направление.

Та часть машины, в которой индуцируется ЭДС, называется *якорем*. В рассматриваемом случае роль якоря играет ротор, поэтому в МПТ ротор часто называют якорем.

Конструктивно МПТ (рис. 7.34) включает в себя:

- статор 5 с полюсами 6, на которых размещена обмотка возбуждения 4, питаемая постоянным током и создающая постоянное магнитное поле;
- якорь 3 с обмоткой;
- коллектор 1 со щетками 2.

Концы обмоток МПТ выводят на колодку зажимов и обозначают так: Я1—Я2 — обмотка якоря; Ш1—Ш2 — обмотка параллельного

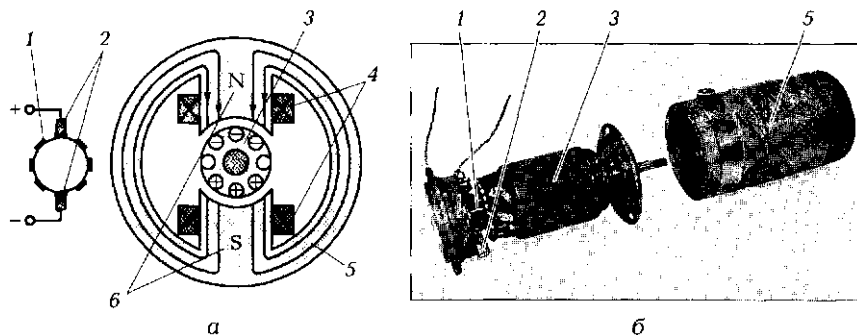


Рис. 7.34. Машина постоянного тока:

а — конструктивная схема; б — внешний вид составных частей двигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов; 1 — коллектор; 2 — щетки; 3 — ротор (якорь) с обмоткой; 4 — обмотки возбуждения; 5 — статор; 6 — полюсы

возбуждения (шунтовая);  $C1 - C2$  — обмотка последовательного возбуждения (серийная), где 1 — начала обмоток, 2 — концы обмоток.

### 7.6.3. ЭДС и электромагнитный момент машины постоянного тока

☛ В соответствии с законом электромагнитной индукции в обмотках якоря при его вращении наводится ЭДС  $E_{\text{я}} = c_e \Phi n$ , где  $c_e$  — конструктивный коэффициент;  $\Phi$  — магнитный поток;  $n$  — частота вращения якоря.

В генераторе эта ЭДС является первопричиной появления напряжения на щетках, которое может быть подано на нагрузку:

$$U = E_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}}$$

где  $R_{\text{я}}$  — сопротивление якоря.

В двигателе ЭДС действует встречно приложенному напряжению  $U$ , уменьшая ток в обмотке якоря во время работы:

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$$

Выражение для электромагнитного момента может быть получено на основании формулы Ампера. Если проводник длиной  $l$  с током  $I$  поместить в магнитное поле с индукцией  $B$ , то на него будет действовать сила  $F_{\text{эм}} = lIB$ . Отсюда

$$M_{\text{вр}} = c_M I_{\text{я}} \Phi_{\text{в}}$$

где  $c_M$  — конструктивный коэффициент;  $I_{\text{я}}$  — ток якоря;  $\Phi_{\text{в}}$  — магнитный поток возбуждения.

### 7.6.4. Способы возбуждения машин постоянного тока

Для того чтобы в обмотках якоря появилась ЭДС, необходимо наличие магнитного потока. В МПТ постоянный магнитный поток — поток возбуждения  $\Phi_{\text{в}}$  — создается либо постоянными магнитами, либо обмотками статора, питаемыми постоянным током. Обмотки статора МПТ называют обмотками возбуждения.

☛ В зависимости от схемы включения обмоток возбуждения различают МПТ (рис. 7.35):

- с независимым возбуждением;



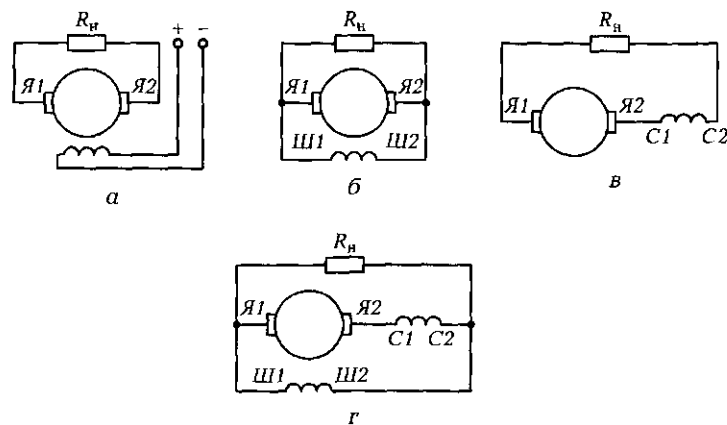


Рис. 7.35. Схемы машин постоянного тока с возбуждением:  
*а* — независимым; *б* — параллельным; *в* — последовательным; *г* — смешанным

- параллельным возбуждением (шунтовые машины);
- последовательным возбуждением (сериесные машины);
- смешанным возбуждением (компаундные машины).

Последние три машины получили название МПТ с самовозбуждением.

В машинах с *параллельным возбуждением* (см. рис. 7.35, б) обмотка возбуждения подключается параллельно обмотке якоря. Для создания значительной намагничивающей силы она имеет большое число витков, поскольку должна потреблять небольшой ток. Сопротивление обмотки велико. Реостат, включенный последовательно с обмоткой возбуждения, позволяет регулировать ток возбуждения, а значит, и магнитный поток возбуждения  $\Phi_v$ .

В машинах с *последовательным возбуждением* (см. рис. 7.35, в) обмотка возбуждения включается последовательно с якорной обмоткой. Чтобы обмотка возбуждения не оказывала влияния на работу МПТ, ее сопротивление должно быть мало. Поскольку ток возбуждения равен току якоря, т. е. весьма значительный, для создания требуемой намагничивающей силы обмотка возбуждения может иметь небольшое число витков. Необходимо помнить, что изменение нагрузки на оси электродвигателя постоянного тока с последовательным возбуждением ведет к изменению тока якоря, а значит, и магнитного потока возбуждения.

У машин со *смешанным возбуждением* (см. рис. 7.35, г) на полюсах размещаются по две обмотки: одна параллельного возбуждения, а вторая — последовательного.

В системах небольшой мощности широко используются машины постоянного тока с *возбуждением от постоянных магнитов*. Они работают и как двигатели (например, исполнительные двигатели в системах автоматического управления), и как генераторы. В частности, в тахогенераторах (измерителях частоты вращения) используется свойство пропорциональности между частотой вращения якоря и индуцированной ЭДС.

### 7.6.5. Работа машины постоянного тока в режиме генератора

При подключении к зажимам генератора (например, с последовательным возбуждением) нагрузки  $R_n$  в цепи якоря начинает протекать ток  $I_a$ , при этом напряжение на выходных зажимах

$$U_a = E_a - \sum R_a I_a,$$

где  $\sum R_a$  — сопротивление всех участков цепи якоря (обмотки якоря, обмотки последовательного возбуждения, коллектора и щеток). Это сопротивление невелико, поэтому напряжение, снимаемое с якорной обмотки, близко к наведенной в якоря ЭДС.

➡ Наибольшее применение находят генераторы с самовозбуждением, так как они не требуют специального источника питания.

Самовозбуждение основано на том, что магнитная система машины, будучи однажды намагниченной, сохраняет остаточный магнетизм после снятия напряжения. (Вспомните: стальная отвертка, однажды побывав в магнитном поле, в состоянии удерживать не-

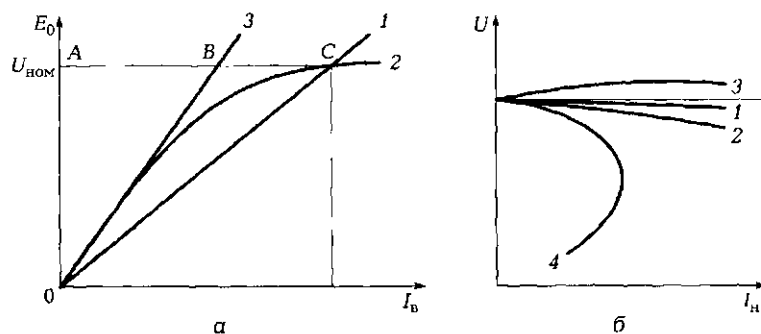


Рис. 7.36. Характеристики генератора постоянного тока:  
а — холостого хода; б — внешние

большой гвоздик.) Остаточный магнитный поток  $\Phi_{\text{ост}}$  составляет всего лишь около 3 % максимального потока  $\Phi_{\text{шт}}$ .

При вращении якоря остаточный магнитный поток  $\Phi_{\text{ост}}$  индуцирует в якорной обмотке небольшую ЭДС  $E_{\text{ост}}$  под действием которой в обмотке возбуждения появляется небольшой ток  $I_{\text{в.ост}}$  и возникает намагничивающая сила  $I_{\text{в.ост}} w_{\text{в}}$ . Если эта намагничивающая сила совпадает по направлению с потоком  $\Phi_{\text{ост}}$ , то поток увеличивается на  $\Delta\Phi$ , т. е. становится равным  $\Phi_{\text{ост}} + \Delta\Phi$ . Это в свою очередь увеличивает ЭДС ( $E_{\text{ост}} + \Delta E$ ), ток ( $I_{\text{ост}} + \Delta I_{\text{в}}$ ) и т. д.

Процесс продолжается до тех пор, пока напряжение в цепи возбуждения  $U_{\text{в}} = I_{\text{в}} R_{\text{в}}$  (прямая 1 на рис. 7.36, а) не станет равным напряжению в цепи генератора  $U_{\text{ном}}$ . Этому равенству напряжений соответствует точка С на характеристике холостого хода (кривая 2 на рис. 7.36, а).

### 7.6.6. Характеристика холостого хода генератора

Характеристика холостого хода, представляющая собой зависимость ЭДС  $E_0$  от тока возбуждения  $I_{\text{в}}$ , позволяет судить о магнитных свойствах генератора. Ее можно рассматривать как магнитную характеристику машины  $\Phi_0 = f(I_{\text{в}})$ . Увеличение тока возбуждения ведет к увеличению магнитного потока, а следовательно, и ЭДС. Причем в начальной части, пока магнитная цепь машины не насыщена, характеристика  $E_0 = f(I_{\text{в}})$  близка к прямой линии (прямой 3 на рис. 7.36, а). Намагничивающая сила обмотки возбуждения  $I_{\text{в}} w_{\text{в}}$  практически равна падению магнитного напряжения в воздушном зазоре, так как магнитная индукция в ферромагнитном материале невелика и он не насыщен, т. е. имеет небольшое магнитное сопротивление. По мере роста тока возбуждения магнитная индукция на ферромагнитных участках растет, что ведет к насыщению этих участков. При этом линейный характер зависимости  $E_0 = f(I_{\text{в}})$  нарушается (кривая 2 на рис. 7.36, а).

По характеристике холостого хода можно судить о степени насыщения магнитной системы генератора. Коэффициент насыщения  $K_s$  определяется отношением отрезков АС и АВ ( $K_s = AC/AB$ ), так как отрезок АВ характеризует ненасыщенную машину, у которой вся намагничивающая сила расходуется в воздушном зазоре, а отрезок ВС — падение намагничивающей силы в ферромагнитной части магнитопровода.

При  $K_s < 1,25$  машина насыщена слабо, при  $K_s = 1,25 \dots 1,75$  насыщение машины среднее, при  $K_s > 1,75$  машина насыщена сильно.

### 7.6.7. Внешняя характеристика генератора

Внешняя характеристика генератора  $U = f(I_H)$  представляет собой зависимость выходного напряжения генератора от тока нагрузки при неизменной частоте вращения якоря ( $n = \text{const}$ ).

В зависимости от способа включения обмоток возбуждения внешняя характеристика принимает различный вид (рис. 7.36, б).

Кривая 1 соответствует генератору с независимым возбуждением. Уменьшение напряжения при увеличении тока нагрузки объясняется в основном увеличением падения напряжения на сопротивлении якорной цепи (внутреннем сопротивлении источника).

Кривая 2 соответствует генератору с параллельным возбуждением. Ее более резкое падение объясняется дополнительным уменьшением тока возбуждения при снижении выходного напряжения.

В машине со смешанным возбуждением и согласным включением обмоток (обе увеличивают магнитный поток) можно компенсировать падение напряжения (кривая 3) за счет использования обмотки последовательного возбуждения.

При встречном включении обмоток (намагничивающие силы их направлены встречно) выходное напряжение падает резко (кривая 4), так как магнитный поток создается разностью намагничивающих сил параллельной и последовательной обмоток возбуждения. Подобный способ возбуждения применяется сравнительно редко, но иногда он является единственным возможным (например, в сварочных генераторах постоянного тока).

Процентное уменьшение напряжения при переходе от холостого хода к номинальному току нагрузки определяется выражением

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_{ном}}{U_{ном}} 100.$$

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. В генераторе постоянного тока с параллельным возбуждением (рис. 7.37) мощность, отдаваемая в нагрузку при напряжении 100 В составляет 1,95 кВт. Потери мощности в обмотке возбуждения Ш1 — Ш2 и обмотке якоря Я1 — Я2 равны соответственно 50 и 80 Вт. Определите ток якоря, сопротивление обмотки якоря и наведенную в ней ЭДС.

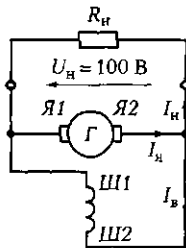


Рис. 7.37. Схема ЭЦ генератора постоянного тока с параллельным возбуждением (к задачам 1 и 5 подразд. 7.6)

*Решение.* Ток якоря генератора постоянного тока с параллельным возбуждением определяется суммой токов в нагрузке и в обмотке параллельного возбуждения:  $I_я = I_н + I_в$ . Определим эти токи в соответствии с исходными данными:  $I_в = P_в/U = 50/100 = 0,5$  А;  $I_н = P_н/U = 1950/100 = 19,5$  А.

Следовательно, ток якоря  $I_я = 0,5 + 19,5 = 20$  А.

Сопротивление обмотки якоря  $R_я = P_я/I_я^2 = 80/20^2 = 0,2$  Ом.

ЭДС генератора  $E = U + R_я I_я = 100 + 0,2 \cdot 20 = 104$  В.

*Ответ.* Ток якоря равен 20 А, сопротивление обмотки якоря — 0,2 Ом, наведенная ЭДС — 104 В.

2. В качестве тахогенератора для контроля за частотой вращения асинхронного двигателя используется двигатель постоянного тока ДПМ-25-НЗ-16 с возбуждением от постоянных магнитов, имеющий следующие характеристики:  $n_{ном} = 5200$  об/мин;  $U_{ном} = 27$  В;  $I_{ном} = 0,5$  А;  $R_я + R_{щ} = 0,5$  Ом. Определите ЭДС на щетках машины при частоте вращения асинхронного двигателя  $n = 2970$  об/мин.

*Решение.* ПротивоЭДС при работе машины в режиме двигателя:  $E = U_{ном} - (R_я + R_{щ})I_{ном} = 27 - 0,5 \cdot 0,5 = 26,75$  В.

Эта противоЭДС возникает в двигателе при номинальном напряжении и номинальной частоте вращения. Поскольку  $E = c_e \Phi_n n_{ном}$ , можно вычислить коэффициент пропорциональности между  $E$  и  $n_{ном}$ :  $k = c_e \Phi_n = E/n_{ном} = 26,75/5200 = 0,005$ . Этот коэффициент остается тем же самым и при работе машины в режиме генератора. Действительно, коэффициент  $c_e$  определяется конструкцией машины, а магнитный поток  $\Phi_n$  — магнитными характеристиками статора. Оба эти параметра остаются неизменными при работе как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

При работе двигателя в режиме тахогенератора, когда его ротор приводится в действие асинхронным двигателем, ЭДС на щетках будет равна  $E = c_e \Phi_n n = kn = 0,005 \cdot 2970 = 14,85$  В.

*Ответ.* При работе двигателя ДПМ-25-НЗ-16 в качестве тахогенератора совместно с асинхронным двигателем ЭДС на щетках равна 14,85 В.

### Задачи и вопросы для самостоятельного решения

3. Для пуска мощных двигателей постоянного тока используется схема генератор—двигатель, в которой обмотка якоря двигателя непосредственно подключена к выходным зажимам генератора (рис. 7.38). ЭДС на выходе генератора 130 В.

Определите номинальную ЭДС в якорной обмотке двигателя, если номинальный ток составляет 100 А, а номинальное сопротивление в цепи якорь генератора—якорь двигателя равно 0,2 Ом. Определите потери мощности в цепи якорь генератора—якорь двигателя, а также КПД системы генератор—двигатель.

4. ЭДС генератора постоянного тока с независимым возбуждением равна 120 В, сопротивление обмотки якоря — 0,2 Ом. Определите напряжение и мощность на нагрузке, если ток нагрузки равен 50 А.

5. Генератор с параллельным возбуждением (см. рис. 7.37) при напряжении 100 В обеспечивает ток в нагрузке 48 А. Сопротивление обмотки возбуждения генератора равно 50 Ом. Определите ток в цепи якоря и мощность, отдаваемую генератором нагрузке.

6. Генератор с параллельным возбуждением имеет характеристику холостого хода, показанную на рис. 7.39, а. Сопротивление обмотки возбуждения равно 50 Ом, обмотки якоря — 0,5 Ом, номинальный ток якоря — 40 А. Определите номинальное напряжение на выходе генератора, номинальный ток возбуждения, коэффициент насыщения стали магнитопровода.

Рис. 7.38. Схема пуска генератор—двигатель (к задаче 3 подразд. 7.6)

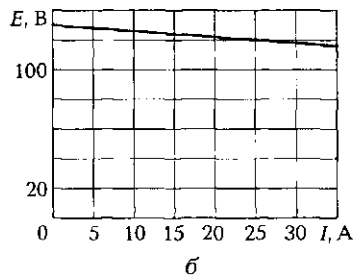
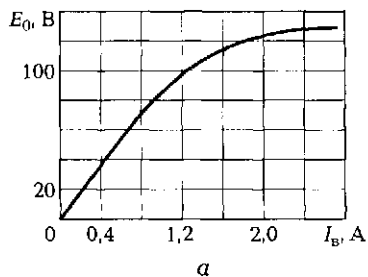
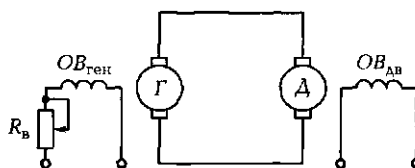


Рис. 7.39. Характеристики генераторов постоянного тока к задачам 6 (а) и 7 (б) подразд. 7.6

7. Внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением показана на рис. 7.39, б. Определите номинальное напряжение на нагрузке при номинальном токе 25 А и относительное падение напряжения.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Какая составная часть электрических машин постоянного тока отсутствует в электрических машинах переменного тока:
  - а) статор;
  - б) ротор;
  - в) коллектор;
  - г) кольца со щетками?
2. Если на оси машины постоянного тока, работающей в режиме генератора, разместить два полукольца и подвести к ним щетки, то какое напряжение появится на щетках:
  - а) постоянное;
  - б) пульсирующее;
  - в) трехфазное;
  - г) переменное?
3. Какую роль играет коллектор в двигателе постоянного тока:
  - а) преобразует постоянное напряжение на щетках в переменный ток в обмотке якоря;
  - б) преобразует переменное напряжение на щетках в постоянный ток в обмотке якоря;
  - в) играет роль устройства, обеспечивающего необходимое трение;
  - г) играет роль устройства, снижающего надежность работы двигателя?
4. Укажите правильное выражение для ЭДС, индуцируемой в обмотке якоря:
  - а)  $E_{\text{я}} = c_e \Phi n$ ;
  - б)  $E_{\text{я}} = c_e \Phi I$ ;
  - в)  $E_{\text{я}} = c_e \Phi / n$ ;
  - г)  $E_{\text{я}} = c_e \Phi^2 n$ .
5. Укажите правильное выражение для электромагнитного момента, действующего на якорь:
  - а)  $M_{\text{вр}} = c_M I_{\text{я}} n$ ;
  - б)  $M_{\text{вр}} = c_M I_{\text{я}} \Phi_{\text{в}}$ ;
  - в)  $M_{\text{вр}} = c_M (I_{\text{я}} + \Phi_{\text{в}})$ ;
  - г)  $M_{\text{вр}} = c_M I_{\text{я}} / \Phi_{\text{в}}$ .
6. Какие характеристики присущи генератору постоянного тока:
  - а) смешанные;

- б) холостого хода и внешняя;
  - в) короткого замыкания;
  - г) номинальные?
7. О чем можно судить по характеристике холостого хода генератора постоянного тока:
- а) о максимальной частоте вращения якоря;
  - б) об относительной величине изменения напряжения;
  - в) о максимальном токе в нагрузке;
  - г) о степени насыщения ферромагнитного материала магнитопровода генератора?
8. Назовите основные способы возбуждения машин постоянного тока:
- а) последовательное;
  - б) независимое;
  - в) параллельное;
  - г) от постоянных магнитов;
  - д) смешанное;
  - е) все перечисленные.

## 7.7. ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### ТЕОРИЯ

#### 7.7.1. Работа машины постоянного тока в режиме двигателя

В режиме двигателя машина постоянного тока преобразует подводимую электрическую энергию в механическую энергию вращения вала. Конструктивная схема электрического двигателя аналогична схеме генератора и включает в себя те же основные узлы: статор, ротор и коллектор. Схемы включения обмоток возбуждения двигателя те же, что и для генератора. Они также служат для создания постоянного магнитного потока, в котором вращается якорь, если в его обмотке течет электрический ток.

☛ Если к обмотке якоря приложить постоянное напряжение  $U$ , то в ней потечет ток. Взаимодействие тока якоря и магнитного потока статора создаст электромагнитный момент, который заставит якорь вращаться. Как только он начнет вращаться (пересекать линии магнитного поля), в его обмотках





Рис. 7.40. Токи в проводнике обмотки якоря двигателя постоянного тока

наведется ЭДС, создающая ток, направленный навстречу току от приложенного напряжения (рис. 7.40).

Суммарный ток в якоре

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}.$$

Так как  $E_{\text{я}} = c_e \Phi_{\text{в}} n$ , выражение для частоты вращения двигателя можно записать в виде  $n = \frac{E_{\text{я}}}{c_e \Phi_{\text{в}}} = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c_e \Phi_{\text{в}}}$ . В то же время в соответствии с формулой Ампера  $M_{\text{вр}} = c_M I_{\text{я}} \Phi_{\text{в}}$ , т.е.  $I_{\text{я}} = \frac{M_{\text{вр}}}{c_M \Phi_{\text{в}}}$ . Отсюда

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c_e \Phi_{\text{в}}} = \frac{U}{c_e \Phi_{\text{в}}} - \frac{R_{\text{я}}}{c_e c_M \Phi_{\text{в}}^2} M_{\text{вр}}.$$

Поскольку в установившемся режиме вращающий момент  $M_{\text{вр}}$  должен уравновешивать момент нагрузки  $M_{\text{н}}$ , можно записать

$$n = \frac{U}{c_e \Phi_{\text{в}}} - \frac{R_{\text{я}}}{c_e c_M \Phi_{\text{в}}^2} M_{\text{н}} = n_0 - \Delta n,$$

где  $n_0 = \frac{U}{c_e \Phi_{\text{в}}}$  — составляющая, не зависящая от нагрузки;  $\Delta n = \frac{R_{\text{я}}}{c_e c_M \Phi_{\text{в}}^2} M_{\text{н}}$  — составляющая, определяемая нагрузкой.

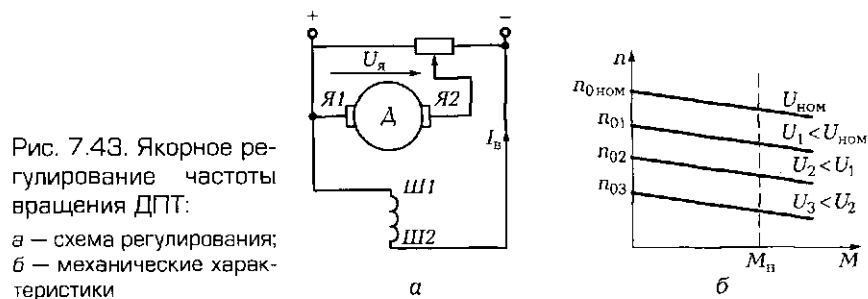
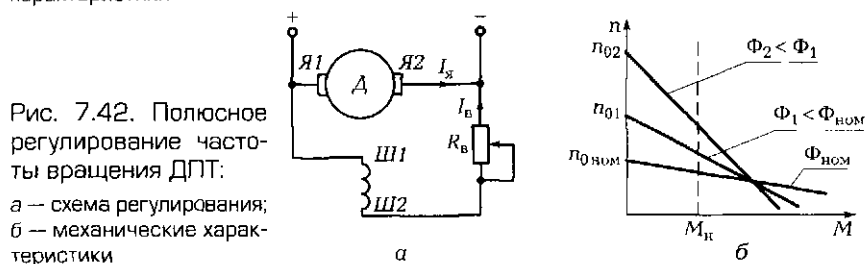
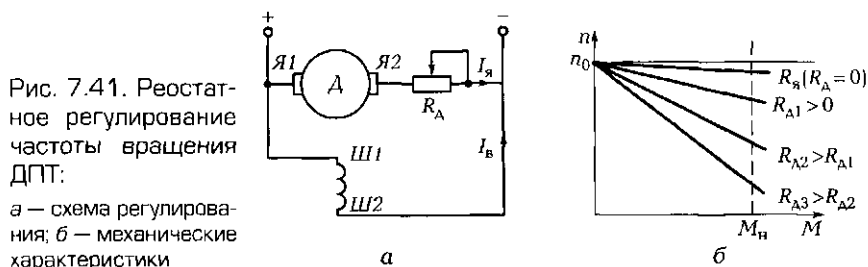
Полученное выражение описывает механическую характеристику двигателя постоянного тока  $n = f(M_{\text{н}})$ , которая отражает зависимость частоты вращения ротора от момента нагрузки на его валу.

Из нее следует, что при увеличении нагрузки частота вращения ротора падает незначительно, поскольку суммарное сопротивление якоря  $R_{\text{я}}$  невелико и второе слагаемое  $\Delta n$  составляет не более 5%  $n_0$ . Двигатель постоянного тока (ДПТ) обладает сравнительно жесткой естественной механической характеристикой.

## 7.7.2. Регулирование частоты вращения двигателя

Как следует из выражения для механической характеристики двигателя постоянного тока, регулирование частоты его вращения возможно тремя способами:

- *реостатным регулированием* — изменением сопротивления  $R_A + R_A$  в цепи якоря (рис. 7.41, а). При этом слагаемое  $n_0$  остается неизменным, а  $\Delta n$  изменяется в широких пределах (рис. 7.41, б);
- *полюсным регулированием* — изменением потока возбуждения  $\Phi_B$  (рис. 7.42, а). При этом изменяется как  $n_0$ , так и  $\Delta n$  (рис. 7.42, б). Полюсное регулирование является достаточно экономичным, поскольку управление магнитным потоком возбуждения  $\Phi_B$  осуществляется за счет изменения тока возбуждения  $I_B$ , значение которого невелико;



- *якорным регулированием* — изменением напряжения питания якорной обмотки (рис. 7.43, а). При этом поток возбуждения должен оставаться неизменным, т. е. двигатель должен быть с независимым или параллельным возбуждением. Частота вращения двигателя при данном способе регулирования практически линейно зависит от напряжения питания якорной обмотки  $U_{\text{я}}$  (рис. 7.43, б).

### 7.7.3. Пуск двигателя и роль пускового реостата

Поскольку ток якоря определяется выражением

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = \frac{U - c_e \Phi_{\text{в}} n}{R_{\text{я}}},$$

то в момент пуска при  $n = 0$  пусковой ток

$$I_{\text{я.п}} = \frac{U}{R_{\text{я}}}.$$

Сопротивление обмотки якоря  $R_{\text{я}}$  невелико, поэтому пусковой ток может превышать номинальный в 20—50 раз. Это снижает надежность работы двигателя, в первую очередь коллекторно-щеточного устройства. Огромные токи приводят и к перегреву якорной обмотки, а также ведут к резкому возрастанию вращающего момента, оказывающего ударное действие на вращающиеся части.

☛ Для ограничения пускового тока на время пуска в якорную цепь вводят реостат  $R_{\text{п.р}}$ . В этом случае

$$I_{\text{я.п}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{п.р}}}.$$

Таким образом, пусковой ток может быть ограничен до допустимой величины. По мере разгона якоря в его обмотке индуцируется ЭДС, пропорциональная частоте вращения  $n$ . Ток якоря уменьшается, что позволяет уменьшать сопротивление реостата вплоть до нуля. После разгона двигателя до номинальной частоты вращения реостат полностью выводится из якорной цепи и ток якоря вновь определяется выражением  $I_{\text{я}} = (U - E_{\text{я}})/R_{\text{я}}$ .

На рис. 7.44, а показана схема включения двигателя с пусковым реостатом  $ПР$ , а на рис. 7.44, б — схема пускового реостата. Перед включением двигателя в сеть пусковой реостат устанавливается в положение «0». При этом в цепь якоря вводятся резисторы с общим сопротивлением  $R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$ . По мере разгона двигате-

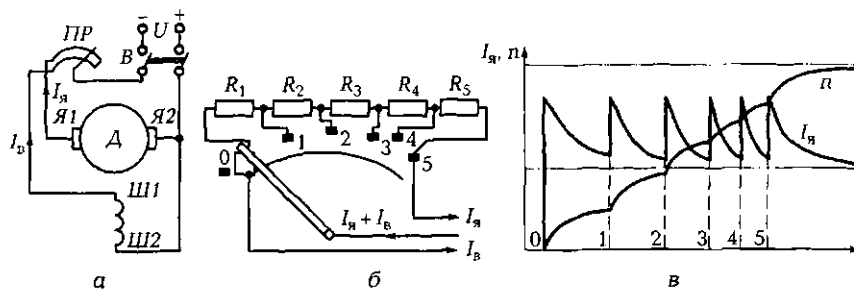


Рис. 7.44. Пуск двигателя постоянного тока:  
 а — схема включения пускового реостата; б — схема пускового реостата; в — временная диаграмма изменения тока и частоты вращения якоря при пуске

ля и уменьшения тока пусковой реостат последовательно переводят в положения 1, 2, 3, 4 и, наконец, в положение 5. Общее сопротивление резисторов дискретно уменьшается до нуля, а ток и частота вращения якоря достигают номинальных значений.

На рис. 7.44, в показаны кривые изменения тока якоря  $I_{я}$  и частоты вращения  $n$  при пуске.

#### 7.7.4. Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением

В двигателе с последовательным возбуждением ток якоря  $I_{я}$  и ток возбуждения  $I_{в}$  — один и тот же ток (рис. 7.45).

Следовательно, поток возбуждения пропорционален току якоря:  $\Phi_{в} = kI_{я}$ . В этом случае вращающий момент пропорционален току якоря в квадрате:

$$M_{вр} = c_M \Phi_{в} I_{я} = k_1 I_{я}^2,$$

т. е. плавное увеличение тока якоря ведет к довольно резкому увеличению вращающего момента.

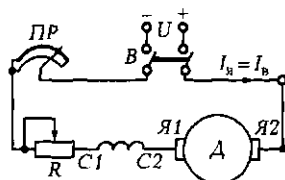


Рис. 7.45. Схема включения двигателя с последовательным возбуждением

В то же время

$$n = \frac{E_{\text{я}}}{c_e \Phi_{\text{в}}} = \frac{k_2}{I_{\text{я}}},$$

т. е. частота вращения ротора обратно пропорциональна току якоря.

Чем больше нагрузка двигателя, тем больше должен быть вращающий момент  $M_{\text{вр}}$ , а следовательно, тем больше ток якоря  $I_{\text{я}}$  и меньше частота вращения ротора  $n$ . Если нагрузка отсутствует, то момент  $M_{\text{вр}}$  небольшой, ток  $I_{\text{я}}$  мал, а частота  $n$  стремится к бесконечности (двигатель может пойти «вразнос»).

Таким образом, при небольшом моменте нагрузки ток якоря мал, а частота вращения значительна. Именно поэтому двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением являются основными приводными двигателями транспортных устройств.

При трогании с места момент нагрузки велик, ток большой, а частота вращения мала. После разгона транспортного устройства момент нагрузки мал, ток якоря невелик, а частота вращения значительна.

### 7.7.5. Универсальные коллекторные двигатели

Эти двигатели рассчитаны на работу от сетей как постоянного, так и переменного однофазного тока. Они аналогичны по конструкции двигателям постоянного тока с последовательным возбуждением.

При изменении направления переменного тока в таких двигателях вращающий момент  $M_{\text{вр}}$  сохраняет свое направление, так как одновременно изменяются направления магнитного потока  $\Phi_{\text{в}}$  и тока якоря  $I_{\text{я}}$ :

$$M_{\text{вр}} = c_M \Phi_{\text{в}} I_{\text{я}} = c_M (-\Phi_{\text{в}}) (-I_{\text{я}}).$$

При этом момент на валу равен среднему моменту  $M_{\text{ср}}$  за период (рис. 7.46, а), поскольку из-за своей инерционности ротор не в со-

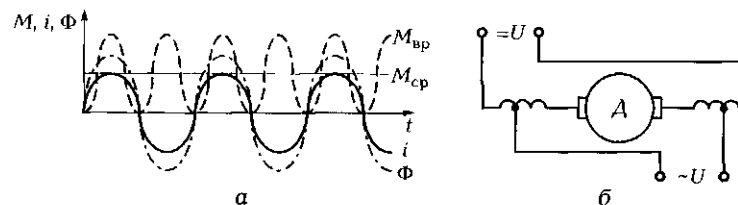


Рис. 7.46. Универсальный коллекторный двигатель:

а — временные диаграммы; б — схема включения в сеть постоянного и переменного тока

стоянии реагировать на мгновенное значение  $M_{вр}$ , изменяющееся с частотой 100 Гц.

Таким образом, двигатель, аналогичный двигателю постоянного тока с последовательным возбуждением, может работать от сети переменного тока. Он способен развивать частоту вращения от 3 000 до 20 000 об/мин и имеет возможность плавного регулирования. Способы регулирования частоты вращения те же, что и у двигателя постоянного тока. Универсальные двигатели нашли применение в бытовых приборах: кофемолках, пылесосах, электродрелях, швейных машинах, а также в медицине. Промышленность выпускает универсальные коллекторные двигатели (например, серии УЛ) мощностью до 400 Вт.

Схема включения универсального двигателя показана на рис. 7.46, б. При работе на переменном токе под напряжение включается часть обмотки возбуждения, а на постоянном — вся обмотка. Это делается для сближения характеристик двигателя на постоянном и переменном токе. Недостаток универсальных коллекторных двигателей — повышенный износ коллекторного устройства со щетками.

## ПРАКТИКА

### Примеры решения типовых задач

1. Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением имеет сопротивление обмотки якоря  $R_{я} = 0,5$  Ом, частоту вращения на холостом ходу  $n_0 = 3\,000$  об/мин и 5%-ное уменьшение частоты вращения при работе под нагрузкой. Какое сопротивление при реостатном регулировании необходимо установить, чтобы при той же нагрузке понизить частоту вращения до  $n = 2\,000$  об/мин?

*Решение.* Как следует из механической характеристики двигателя, его частота вращения  $n = n_0 - \Delta n$ . Составляющая  $n_0 = U / (c_e \Phi_b)$  не зависит от нагрузки, в то время как составляющая  $\Delta n = (R_{я} / (c_e c_M \Phi_b^2)) M_{я}$  при неизменной нагрузке и неизменном магнитном потоке определяется суммарным сопротивлением в якорной цепи. При сопротивлении реостата  $R_p = 0$  эта составляющая равна  $\Delta n_1 = 0,05 \cdot 3\,000 = 150$  об/мин. При введении реостата частота вращения уменьшается до 2 000 об/мин, т. е.  $\Delta n_2 = 3\,000 - 2\,000 = 1\,000$  об/мин. Таким образом,  $\Delta n_1 / \Delta n_2 = R_{я} / (R_{я} + R_p) = 0,15$ .

Отсюда  $R_p = (1 - 0,15) R_{я} / 0,15 = 0,85 \cdot 0,5 / 0,15 = 2,8\bar{3}$  Ом.

*Ответ.* Чтобы понизить частоту вращения ротора при реостатном управлении двигателем постоянного тока до 2 000 об/мин, необходимо сопротивление реостата установить равным 2,83 Ом.

## Задачи и вопросы для самостоятельного решения

2. Рабочий ток двигателя постоянного тока при напряжении 120 В составил 10 А. Пусковой ток превышает рабочий в 30 раз. Вычислите сопротивление обмотки якоря и ЭДС, которая наводится в этой обмотке при вращении якоря.

3. У двигателя постоянного тока с номинальным напряжением 110 В, номинальным током 10 А и КПД 85% электрические потери в цепи якоря составляют 120 Вт. Вычислите сопротивление цепи якоря.

4. В двигателе постоянного тока с параллельным возбуждением напряжение питания равно 120 В, сопротивление цепи якоря — 0,4 Ом, рабочий ток — 10 А. Как изменится рабочий ток, если частота вращения якоря уменьшится на 14 %?

5. Пусковой ток в двигателе постоянного тока с номинальным напряжением 120 В при наличии пускового реостата с сопротивлением 2,1 Ом составил 50 А. Определите пусковой ток при отсутствии пускового реостата.

6. Какое напряжение на выходе генератора необходимо установить в системе генератор — двигатель, чтобы при включении двигателя с номинальным напряжением 110 В, током 18 А и сопротивлением цепи якоря 0,5 Ом пусковой ток не превысил 30 А?

7. При трогании с места трамвая ток в обмотке якоря в 4 раза превышает ток после разгона. Во сколько раз вращающий момент при трогании больше, чем при движении?

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

- Какие две составляющих необходимы для работы двигателя постоянного тока:
  - магнитное поле;
  - проводник с током;
  - электрическое поле;
  - воздушное поле?
- Укажите правильные выражения для тока якоря при пуске и при работе двигателя постоянного тока:
  - $I_{\text{я}} = (U + E_{\text{я}})/R_{\text{я}}$ ;
  - $I_{\text{я}} = (U - E_{\text{я}})/R_{\text{я}}$ ;
  - $I_{\text{я}} = U/R_{\text{я}}$ ;
  - $I_{\text{я}} = UR_{\text{я}}$ .
- Укажите три возможных способа регулирования частоты вращения ДПТ:

- а) конденсаторное регулирование;
  - б) реостатное регулирование;
  - в) якорное регулирование;
  - г) полюсное регулирование.
4. Как осуществляют якорное регулирование:
- а) изменяя напряжение, подводимое к обмотке статора;
  - б) изменяя напряжение, подводимое к обмотке ротора (якоря);
  - в) изменяя напряжение, подводимое к пусковому реостату;
  - г) изменяя напряжение, подводимое к обмотке возбуждения?
5. Для чего нужен пусковой реостат:
- а) для увеличения пускового момента;
  - б) для уменьшения пускового тока;
  - в) для уменьшения трения в цепи коллектора;
  - г) для уменьшения момента инерции ротора?
6. Как включают в цепь двигателя пусковой реостат:
- а) последовательно с обмоткой возбуждения;
  - б) параллельно источнику питания;
  - в) последовательно с обмоткой якоря;
  - г) параллельно обмотке якоря?
7. Укажите верное соотношение между токами якоря и возбуждения в двигателе с последовательным возбуждением:
- а)  $I_{\text{я}} \gg I_{\text{в}}$ ;
  - б)  $I_{\text{я}} > I_{\text{в}}$ ;
  - в)  $I_{\text{я}} < I_{\text{в}}$ ;
  - г)  $I_{\text{я}} = I_{\text{в}}$ .
8. Где нашли основное применение двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением:
- а) в металлорежущих станках;
  - б) транспортных средствах;
  - в) авиапромышленности;
  - г) подъемных механизмах?
9. Какое напряжение может использоваться для работы универсальных коллекторных двигателей:
- а) трехфазное;
  - б) однофазное;
  - в) многофазное;
  - г) постоянное?
10. Где нашли основное применение универсальные коллекторные двигатели:
- а) в пылесосах;
  - б) стиральных машинах;
  - в) холодильных установках;
  - г) металлорежущих станках?



**ЗАЧЕТНОЕ ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ПО РАЗДЕЛУ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
МАШИНЫ»****Сравнительная оценка основных типов электрических машин**

Наименование	Электрические машины переменного тока		Машина постоянного тока
	асинхронная	синхронная	
Состав			
Конструктив- ная схема			

Принцип действия			
Схема включения			
Основное применение			
Основные параметры			

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 17

### Испытания однофазного трансформатора

#### 1. Цель работы

- 1.1. Изучить конструкцию трансформатора.
- 1.2. Определить основные параметры трансформатора.
- 1.3. Снять внешнюю характеристику трансформатора.

#### 2. Объект и средства испытаний

Объектом испытаний является однофазный двухобмоточный трансформатор с разъемным U-образным сердечником из листовой электротехнической стали (толщина листа 0,08 мм) и двумя катушками. Всего имеются четыре сменные катушки: две по 300 витков и по одной со 100 и 900 витками. Размеры поперечного сечения сердечника 16 × 12 мм. С помощью проводников со штекерами обмотки трансформатора могут быть подключены через измерительные приборы к источнику питания и нагрузке. Питание трансформатора осуществляется фазным напряжением, снимаемым с зажимов А и N трехфазного источника. Измерительными приборами являются мультиметры, работающие на переменном токе, и ваттметр. Нагрузкой служит набор резисторов с сопротивлениями от 22 до 330 Ом.

Номинальные параметры катушек трансформатора показаны в табл. Л17.1.

Таблица Л17.1

$w$	$U_{\text{ном}}$ В	$I_{\text{ном}}$ мА	$R_{\text{ном}}$ Ом	$S_{\text{ном}}$ В·А
100	2,33	600	0,9	1,4
300	7,0	200	4,8	1,4
900	21,0	66,7	37	1,4

#### 3. Задание к лабораторной работе

##### *Выполняется при подготовке к работе*

3.1. Ознакомиться с порядком выполнения лабораторной работы, теоретическими сведениями по данной теме. Подготовить в рабочей тетради протокол испытаний.

3.2. Пользуясь данными табл. Л17.1, вычислить коэффициент трансформации, значения магнитного потока и магнитной индук-

ции. Формулы и результаты вычислений занести в протокол испытаний. Заполнить табл. А17.2 в протоколе. Число витков вторичной обмотки  $w_2$  указывает преподаватель.

#### **Выполняется в лаборатории**

3.3. Ознакомиться с помощью демонстрационного макета с конструкцией трансформатора. Занести в протокол испытаний паспортные данные трансформатора.

3.4. Провести *опыт холостого хода* при номинальном напряжении на первичной обмотке. Для этого собрать ЭЦ в соответствии со схемой, показанной на рис. А17.1, а. В качестве первичной обмотки  $w_1$  использовать катушку с 300 витками, вторичной  $w_2$  — по указанию преподавателя.

После проверки ЭЦ преподавателем подать напряжение на первичную обмотку  $U_1 = 7$  В и снять показания всех приборов. Результаты измерений занести в табл. А17.3.

3.5. Провести *опыт короткого замыкания* при номинальном токе во вторичной обмотке и пониженном напряжении на первичной. Для этого собрать ЭЦ в соответствии со схемой, показанной на рис. А17.1, б.

Включить питание и плавно увеличивать напряжение на первичной обмотке до тех пор, пока ток во вторичной обмотке не станет равен номинальному. Снять показания всех приборов. Результаты измерений занести в табл. А17.4.

3.6. Снять *внешнюю характеристику* трансформатора  $U_2 = f(I_2)$ , для чего собрать ЭЦ в соответствии со схемой, показанной на рис. А17.2.

Подать номинальное напряжение на первичную обмотку и, устанавливая сопротивление нагрузки  $R_n$  в соответствии со значениями, приведенными в табл. А17.5, снять при каждом из значений показания приборов. Результаты измерений занести в табл. А17.5.

3.7. После согласования протокола испытаний с преподавателем питание стенда отключить, ЭЦ разобрать, проводники и мини-блоки убрать на место, рабочее место привести в порядок.

### **4. Протокол испытаний и отчет о работе № 17**

#### **Испытания однофазного трансформатора**

4.1. Цель работы \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

4.2. Формулы и предварительные расчеты.

$U_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ;  $U_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ ;  $k_{21} = \underline{\hspace{2cm}}$ ;  
 $\Phi_{\max} = \underline{\hspace{2cm}}$ ;  $B_{\max} = \underline{\hspace{2cm}}$ .

Таблица П17.2. Паспортные данные трансформатора				
$w$	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$I_{\text{ном}}, \text{мА}$	$R_{\text{вост}}, \text{Ом}$	$S_{\text{ном}}, \text{В} \cdot \text{А}$
$w_1 = 300$	7,0	200	4,8	1,4
$w_2 =$				

Площадь сечения сердечника трансформатора  $S_M = 0,016 \cdot 0,012 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ .

4.3. Схемы электрических цепей и таблицы.

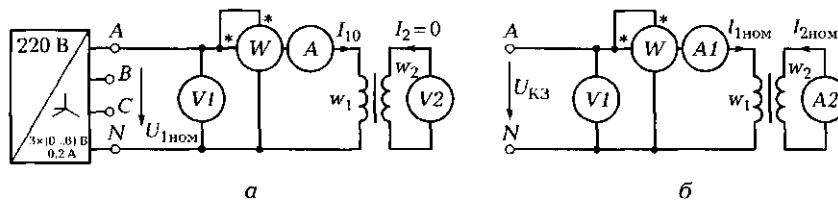


Рис. П17.1. Схемы ЭЦ для измерения потерь в трансформаторе:  
 а — опыт холостого хода; б — опыт короткого замыкания

Таблица П17.3								
$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$I_{10}, \text{мА}$	$P_0, \text{Вт}$	$w_1$	$w_2$	$k_{21} = U_2/U_1$	$\Phi_{\max}, \text{Вб}$	$B_{\max}, \text{Тл}$

Таблица П17.4								
$U_{\text{кз}}, \text{В}$	$I_{1\text{ном}}, \text{мА}$	$I_{2\text{ном}}, \text{мА}$	$P_{\text{с}}, \text{Вт}$	$w_1$	$w_2$	$k_{21} = I_1/I_2$	$\Phi_{\max}, \text{Вб}$	$B_{\max}, \text{Тл}$

Рис. П17.2. Схема ЭЦ для снятия внешней характеристики трансформатора

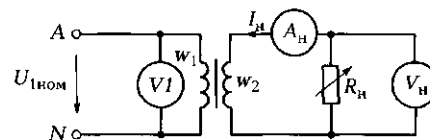


Таблица Л17.5						
$R_{\text{н}}$ , Ом	XX	330	220	100	47	22
$I_{\text{н}}$ , А						
$U_{\text{н}}$ , В						

*Примечание.* Значения  $R_{\text{н}}$  указаны для случая, когда  $w_2 = 300$ . При  $w_2 = 900$  эти значения надо увеличить в 10 раз, а при  $w_2 = 100$  — уменьшить в 10 раз.

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

#### 4.4. Расчетно-графическая часть.

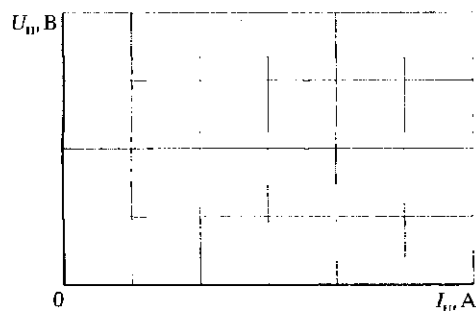


Рис. Л17.3. Внешняя характеристика трансформатора

4.5. Краткие выводы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

### 5. Требования к расчетно-графической части отчета

5.1. На основании данных табл. Л17.3 вычислить коэффициент трансформации по напряжению, число витков вторичной обмотки, максимальные значения магнитного потока и магнитной индукции в сердечнике. Результаты вычислений занести в табл. Л17.3.

5.2. На основании данных табл. Л17.4 вычислить коэффициент трансформации по току, максимальные значения магнитного потока и магнитной индукции в сердечнике. Результаты вычислений занести в табл. Л17.4.

5.3. На основании данных табл. А17.5 построить на рис. А17.3 внешнюю характеристику трансформатора и определить изменение напряжения в процентах при номинальной нагрузке.

5.4. Сделать краткие выводы по работе.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

---

1. Какой принцип положен в основу работы трансформатора?
2. Из каких основных частей состоит трансформатор?
3. Из какого материала изготавливают сердечник трансформатора?
4. Почему сердечник трансформатора выполняют из тонких электрически изолированных друг от друга пластин?
5. Что такое коэффициент трансформации и как он определяется?
6. Для чего проводят опыт холостого хода?
7. Для чего проводят опыт короткого замыкания?
8. При каком напряжении на первичной обмотке проводят опыт короткого замыкания?
9. Назовите основные потери в трансформаторе при работе в номинальном режиме.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 18**

---

### **Испытания генератора постоянного тока**

#### **1. Цель работы**

- 1.1. Изучить конструкцию машины постоянного тока.
- 1.2. Научиться осуществлять пуск системы двигатель — генератор.
- 1.3. Снять характеристику холостого хода генератора.
- 1.4. Снять внешнюю характеристику генератора.

#### **2. Объект и средства испытаний**

Объектом испытаний является машина постоянного тока (МПТ) с независимым возбуждением, работающая в режиме генератора. Возбуждение машины осуществляется от автотрансформатора через двухполупериодный выпрямитель. Приводом генератора служит трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Нагрузкой генератора являются реостаты.

#### **Основные технические характеристики МПТ**

Номинальная мощность, Вт..... 90  
Номинальное напряжение обмотки якоря, В..... 220

Номинальный ток обмотки якоря, А.....	0,56
Номинальное напряжение обмотки возбуждения, В.....	220
Номинальный ток обмотки возбуждения, А.....	0,2
Номинальная частота вращения, об/мин.....	1 500
Коэффициент полезного действия, %.....	57,5

### 3. Задание к лабораторной работе

#### *Выполняется при подготовке к работе*

3.1. Ознакомиться с порядком выполнения лабораторной работы, теоретическими сведениями по данной теме и сведениями о стенде, на котором выполняется работа (см. приложение 2). Подготовить в рабочей тетради протокол испытаний.

#### *Выполняется в лаборатории*

3.2. Ознакомиться с помощью демонстрационного макета с конструкцией машины постоянного тока, изучить схему коммутации и управления системой двигатель — генератор, определить используемые измерительные приборы.

Занести в протокол испытаний паспортные данные генератора.

3.3. Осуществить пуск системы двигатель — генератор в такой последовательности:

3.3.1. Соединить гнезда защитного заземления всех устройств с гнездом «РЕ» преобразователя частоты. Рукоятку автотрансформатора поставить в крайнее положение, повернув против часовой стрелки.

Собрать ЭЦ, схема которой показана на рис. А18.1, для чего соединить с помощью проводов со штекерами стенд и платформу с электрическими машинами, обращая внимание на обозначение концов обмоток. Статорные обмотки асинхронного двигателя соединить звездой. Подключить к обмоткам электрических машин измерительные приборы. Установить переключатели активной нагрузки в положение «0»:

3.3.2. После проверки ЭЦ преподавателем включить автоматические выключатели и устройство защитного отключения однофазного источника, включить выключатели «Сеть» на всех блоках, участвующих в испытаниях;

3.3.3. Кнопками на преобразователе частоты «Выбор строки/страницы на дисплее» выбрать режим работы «Эксперимент № 1: исследование режимов работы асинхронного двигателя». Кнопкой «Выбор информации на дисплее» выбрать «Массив изме-



няемых параметров». Кнопками «Выбор строки/страницы на дисплее» и «Изменение значения параметра» выбрать « $U$  номинальнос — 220 В, тип характеристики — линейная, выход 1 — скорость, выход 2 — скорость, управление — ручное». Кнопкой «Выбор информации на дисплее» выбрать «Массив контролируемых параметров».

С помощью регулятора « $U_{\text{упр.ручн}}$ » преобразователя частоты установить частоту вращения магнитного поля асинхронного двигателя 157 рад/с (1 500 об/мин). Нажать кнопку «Назад» и после разгона двигателя убедиться, что на дисплее отображается частота вращения его магнитного поля, равная 157 рад/с.

3.4. Для снятия характеристики холостого хода  $E_0 = f(I_B)$  с помощью автотрансформатора плавно изменять ток возбуждения  $I_B$  генератора в диапазоне 0...0,15 А. Для семи значений  $I_B$  из указанного диапазона измерить соответствующие им значения  $E_0$ . Результаты измерений занести в табл. А18.1.

**Внимание!** Для исключения погрешностей ток возбуждения изменять только в одном направлении (либо от минимального к максимальному, либо наоборот).

3.5. Для снятия внешней характеристики  $U = f(I_B)$  установить автотрансформатором ток возбуждения генератора 100 мА. Изменяя с помощью нагрузки ток в цепи якоря от нуля до 0,35 А, снять для семи значений  $I_B$  показания приборов. Результаты измерений занести в табл. А18.2. Нажать на кнопку «Стоп» преобразователя частоты.

3.6. После согласования протокола испытаний с преподавателем регуляторы автотрансформатора и нагрузки установить в нулевое положение, ЭЦ обесточить и разобрать, проводники убрать на место, рабочее место привести в порядок.

#### 4. Протокол испытаний и отчет о работе № 18

##### *Испытания генератора постоянного тока*

4.1. Цель работы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

4.2. Паспортные данные генератора \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

4.3. Схема электрической цепи и таблицы.

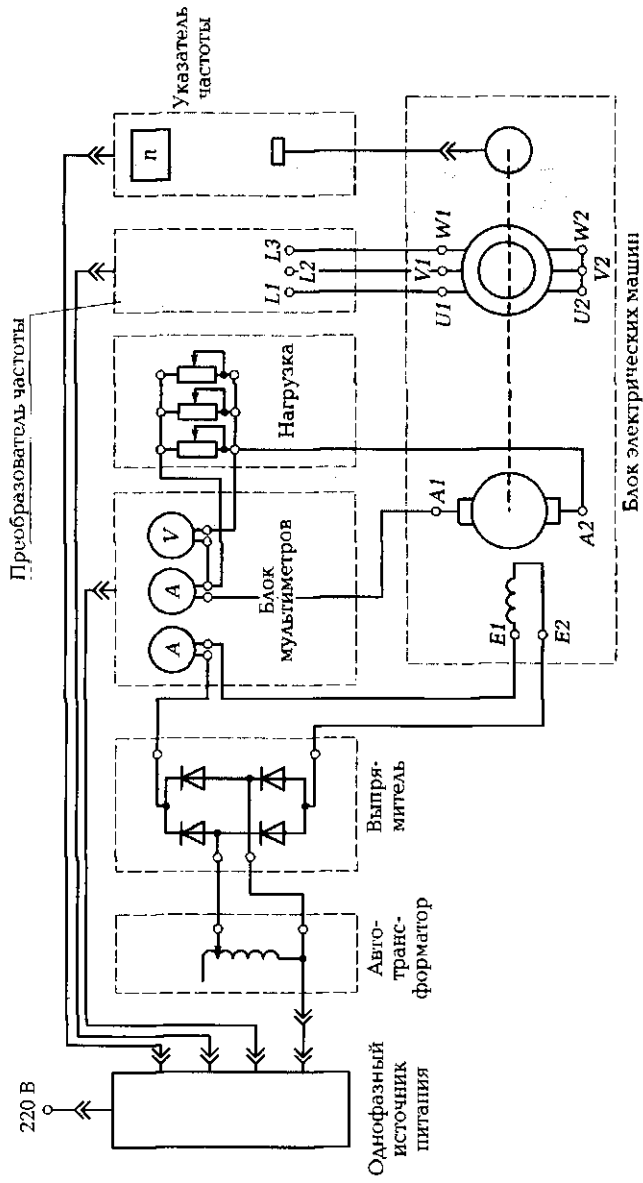


Рис. П18.1. Схема ЭЦ для испытания генератора постоянного тока

Таблица Л18.1							
№ опыта	1	2	3	4	5	6	7
$E_0, В$							
$I_D, мА$							

Таблица Л18.2							
№ опыта	1	2	3	4	5	6	7
$U, В$							
$I_H, мА$							
$n, об/мин$							

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_  
 Преподаватель \_\_\_\_\_

4.4. Расчетно-графическая часть.

Используемые законы и формулы:

$K_s = AC/AB =$  \_\_\_\_\_ ;

$\Delta U \% = ((U_{ном} - U)/U_{ном}) 100 \% =$  \_\_\_\_\_ .

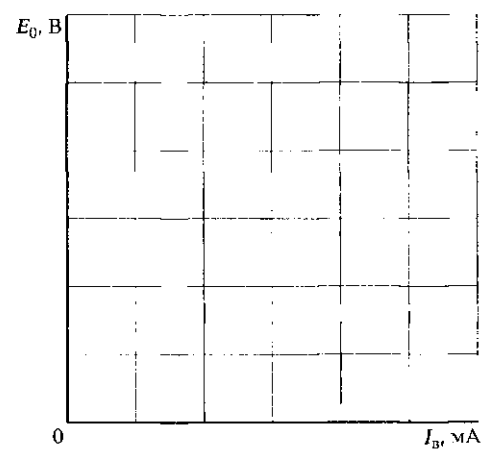


Рис. Л18.2. Характеристика холостого хода генератора

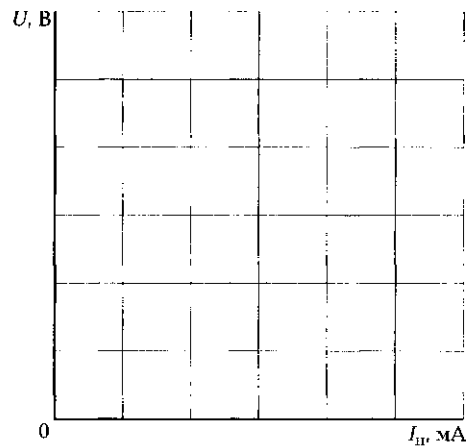


Рис. Л18.3. Внешняя характеристика генератора

4.5. Краткие выводы \_\_\_\_\_

---



---



---



---



---

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

### 5. Требования к расчетно-графической части отчета

5.1. На основании данных табл. Л18.1 построить на рис. Л18.2 характеристику холостого хода  $E_0 = f(I_b)$ . Определить по ней коэффициент насыщения  $K_s$  магнитной системы генератора при номинальном токе. Сделать вывод о степени насыщения машины.

5.2. На основании данных табл. Л18.2 построить на рис. Л18.3 внешнюю характеристику  $U = f(I_{II})$ . Определить процентное изменение напряжения  $\Delta U\%$  при номинальном токе  $I_{ном}$ . Результаты занести в протокол испытаний.

5.3. Сделать краткие выводы по работе.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие законы положены в основу работы электрических машин?

2. Какие основные узлы входят в состав машины постоянного тока?
3. Какую роль играет статор генератора?
4. Для чего нужен коллектор генератора?
5. В какой части машины постоянного тока индуцируется ЭДС?
6. Можно ли изготовить магнитопровод статора машины постоянного тока из единой стальной заготовки?
7. Назовите способы возбуждения машин постоянного тока.
8. В чем суть режима самовозбуждения генератора постоянного тока?
9. Назовите основные характеристики генератора постоянного тока.
10. Что позволяет определить характеристика холостого хода?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 19

### Испытания двигателя постоянного тока

#### 1. Цель работы

- 1.1. Изучить конструкцию машины постоянного тока.
- 1.2. Научиться осуществлять пуск блока электрических машин.
- 1.3. Снять электромеханическую характеристику двигателя.
- 1.4. Испытать схему с полюсным регулированием частоты вращения двигателя.

#### 2. Объект и средства испытаний

Объектом испытаний является машина постоянного тока с параллельным возбуждением, работающая в режиме двигателя. Питание обмотки возбуждения и якорной цепи двигателя осуществляется от автотрансформатора через двухполупериодный выпрямитель. Нагрузкой двигателя постоянного тока служит трехфазная асинхронная машина с изменяющейся частотой вращения ротора.

#### Основные технические характеристики МПТ

Номинальная мощность, Вт.....	90
Номинальное напряжение обмотки якоря, В.....	220
Номинальный ток обмотки якоря, А.....	0,56
Номинальное напряжение обмотки возбуждения, В.....	220
Номинальный ток обмотки возбуждения, А.....	0,2
Номинальная частота вращения, об/мин.....	1 500
Коэффициент полезного действия, %.....	57,5

### **3. Задание к лабораторной работе**

#### ***Выполняется при подготовке к работе***

3.1. Ознакомиться с порядком выполнения лабораторной работы, теоретическими сведениями по данной теме. Подготовить в рабочей тетради протокол испытаний.

#### ***Выполняется в лаборатории***

3.2. Ознакомиться с помощью демонстрационного макета с конструкцией машины постоянного тока, изучить схему коммутации и управления, определить используемые измерительные приборы.

Занести в протокол испытаний паспортные данные двигателя.

3.3. Осуществить пуск двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением в такой последовательности:

3.3.1. Соединить гнезда защитного заземления всех устройств с гнездом «РЕ» преобразователя частоты. Рукоятку автотрансформатора поставить в крайнее положение, повернув против часовой стрелки.

Собрать ЭЦ, схема которой показана на рис. А19.1, для чего соединить с помощью проводов со штекерами стенд и платформу с электрическими машинами, обращая внимание на обозначения концов обмоток. Статорные обмотки асинхронной машины соединить звездой. Подключить к обмоткам электрических машин измерительные приборы. Установить ручку реостата возбуждения в положение «0»;

3.3.2. После проверки ЭЦ преподавателем включить автоматические выключатели и устройство защитного отключения однофазного источника, включить выключатели «Сеть» на всех блоках, участвующих в испытаниях;

3.3.3. С помощью автотрансформатора разогнать двигатель постоянного тока до частоты вращения  $n = 1\,300$  об/мин;

3.3.4. Кнопками на преобразователе частоты «Выбор строки/страницы на дисплее» выбрать режим работы «Эксперимент № 1: исследование режимов работы асинхронного двигателя». Кнопкой «Выбор информации на дисплее» выбрать «Массив изменяемых параметров». Кнопками «Выбор строки/страницы на дисплее» и «Изменение значения параметра» выбрать: « $U$  номинальное — 220 В, тип характеристики — линейная, выход 1 — скорость, выход 2 — скорость, управление — ручное». Кнопкой «Выбор информации на дисплее» выбрать «Массив контролируемых параметров».

С помощью регулятора « $U_{\text{упр.ручн}}$ » преобразователя частоты установить частоту вращения магнитного поля асинхронной машины 136 рад/с (1 300 об/мин) и нажать кнопку «Вперед».

3.4. Для снятия электромеханической характеристики двигателя  $n = f(I_{\text{я}})$ , поворачивая регулятор « $U_{\text{упр.ручн}}$ » преобразователя частоты по часовой и против часовой стрелки, плавно изменять ток якоря двигателя  $I_{\text{я}}$ . Для семи значений  $I_{\text{я}}$  определить соответствующие им показания указателя частоты вращения  $n$ . Результаты измерений занести в табл. А19.1.

Отключить кнопкой «Стоп» трехфазную асинхронную машину, а выключателем «Сеть» — преобразователь частоты. Ручку автотрансформатора повернуть против часовой стрелки до упора.

3.5. Для регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока за счет потока возбуждения и снятия зависимости  $n = f(I_{\text{в}})$  установить с помощью автотрансформатора частоту вращения двигателя постоянного тока 1 000 об/мин. Изменяя сопротивление реостата возбуждения от нуля до максимальной величины (поворотом рукоятки реостата по часовой стрелке), уменьшать ток  $I_{\text{в}}$  в цепи возбуждения. Для семи значений  $I_{\text{в}}$  определить соответствующие им показания указателя частоты вращения  $n$ . Результаты измерений занести в табл. А19.2. Нажать на кнопку «Стоп» преобразователя частоты.

3.6. После согласования протокола испытаний с преподавателем регуляторы автотрансформатора и реостата возбуждения установить в нулевое положение, ЭЦ обесточить и разобрать, проводники убрать на место, рабочее место привести в порядок.

#### 4. Протокол испытаний и отчет о работе № 19

##### *Испытания двигателя постоянного тока*

4.1. Цель работы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

4.2. Паспортные данные двигателя \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

4.3. Схема электрической цепи и таблицы.

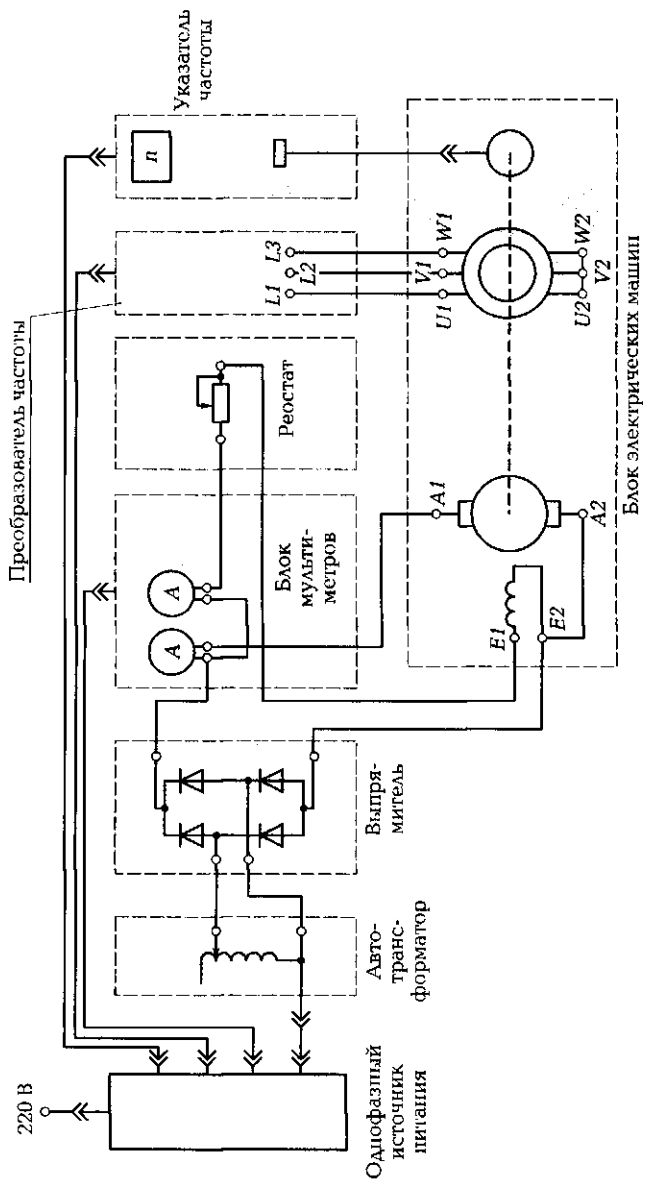


Рис. П19.1. Схема ЭЦ для испытания двигателя постоянного тока



Таблица Л19.1							
№ опыта	1	2	3	4	5	6	7
$I_{\text{н}}, \text{мА}$							
$n, \text{об/мин}$							

Таблица Л19.2							
№ опыта	1	2	3	4	5	6	7
$I_{\text{в}}, \text{мА}$							
$n, \text{об/мин}$							

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_

Преподаватель \_\_\_\_\_

#### 4.4. Расчетно-графическая часть.

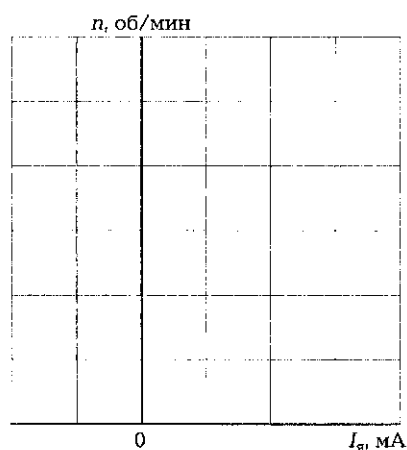


Рис. Л19.2. Электромеханическая характеристика двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

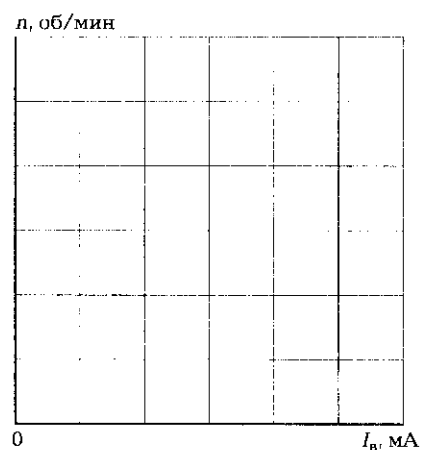


Рис. Л19.3. Зависимость частоты вращения двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением от тока возбуждения



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 20

### Испытания трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

#### 1. Цель работы

- 1.1. Изучить конструкцию асинхронного двигателя.
- 1.2. Научиться осуществлять пуск асинхронного двигателя.
- 1.3. Изучить методы реверсирования асинхронного двигателя.
- 1.4. Снять частотную характеристику асинхронного двигателя.

#### 2. Объект и средства испытаний

Объектом испытаний является трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

В качестве измерительных приборов используются мультиметры, работающие в режиме амперметра и вольтметра переменного тока.

Электрические цепи коммутации и управления АД подключаются посредством проводников со штекерами к платформе, на которой размещены электрические машины.

#### Основные технические характеристики АД

Число фаз на статоре .....	3
Номинальная частота тока в обмотках статора, Гц .....	50
Схема соединения обмоток статора .....	Y или $\Delta$
Номинальная мощность двигателя, Вт .....	120
Номинальное напряжение двигателя, В .....	220
Номинальный ток двигателя при соединении обмоток звездой/треугольником, А .....	0,44/0,76
Коэффициент полезного действия, % .....	63
Коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) .....	0,66
Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup> .....	1350

#### 3. Задание к лабораторной работе

##### *Выполняется при подготовке к работе*

3.1. Ознакомиться с порядком выполнения лабораторной работы, теоретическими сведениями по данной теме. Подготовить в рабочей тетради протокол испытаний.

### Выполняется в лаборатории

3.2. Ознакомиться с помощью демонстрационного макета с конструкцией асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, изучить схему коммутации и управления двигателем, определить используемые измерительные приборы.

Занести в протокол испытаний паспортные данные двигателя.

3.3. Осуществить пуск двигателя в такой последовательности:

3.3.1. Соединить гнезда защитного заземления всех устройств с гнездом «PE» преобразователя частоты.

Собрать ЭЦ, схема которой показана на рис. А20.1, для чего соединить с помощью проводников со штекерами стенд и платформу с электрическими машинами. Включить асинхронный двигатель в ЭЦ, обращая внимание на обозначения концов обмоток. Статорные обмотки асинхронного двигателя соединить звездой. Подключить к обмоткам электрических машин измерительные приборы;

3.3.2. После проверки ЭЦ преподавателем включить автоматические выключатели и устройство защитного отключения однофазного источника, включить выключатели «Сеть» на всех блоках, участвующих в испытаниях;

3.3.3. Кнопками на преобразователе частоты «Выбор строки/страницы на дисплее» выбрать режим работы «Эксперимент № 1: исследование режимов работы асинхронного двигателя». Кнопкой «Выбор информации на дисплее» выбрать «Массив изменяемых параметров». Кнопками «Выбор строки/страницы на дисплее» и «Изменение значения параметра» выбрать « $U$  номинальное — 220 В, тип характеристики — линейная, выход 1 — скорость, выход 2 — скорость, управление — ручное». Кнопкой «Выбор информации на дисплее» выбрать «Массив контролируемых параметров».

С помощью регулятора « $U_{упр\ ручн}$ » преобразователя частоты установить желаемую частоту вращения магнитного поля асинхронного двигателя 157 рад/с (1500 об/мин). Нажать кнопку «Вперед» и после разгона двигателя убедиться, что на дисплее отображается частота вращения его магнитного поля, равная 157 рад/с.

3.4. Измерить линейный ток  $I_\Delta$ , потребляемый при соединении обмоток АД звездой, линейное напряжение  $U_\Delta$  и частоту вращения  $n$ . Результаты измерений занести в протокол испытаний. Зафиксировать направление отклонения стрелки указателя частоты. Нажать на кнопку «Стоп» преобразователя частоты.

3.5. Включить обмотки асинхронного двигателя треугольником, для чего с помощью проводников соединить вывод  $U2$  с выводом  $V1$ ,  $V2$  — с  $W1$ ,  $W2$  — с  $U1$ . Нажать на кнопку «Вперед» и измерить

линейный ток  $I_{\Delta}$ , потребляемый при соединении обмоток АД треугольником, линейное напряжение  $U_{\Delta}$  и частоту вращения  $n$ . Результаты измерений занести в протокол испытаний. Нажать на кнопку «Стоп» преобразователя частоты.

3.6. Вновь включить обмотки асинхронного двигателя звездой, поменяв при этом выводы  $V1$  и  $W1$  местами. Нажать на кнопку «Вперед» и после разгона двигателя измерить линейный ток  $I_{\Delta}$ , потребляемый при соединении обмоток АД звездой, линейное напряжение  $U_{\Delta}$  и частоту вращения  $n$ . Результаты измерений занести в протокол испытаний. Зафиксировать направление отклонения стрелки указателя частоты. Нажать на кнопку «Стоп» преобразователя частоты.

3.7. Для снятия частотной характеристики асинхронного двигателя при изменении частоты источника питания нажать на кнопку «Вперед» и после разгона двигателя с помощью регулятора « $U_{\text{упр.ручн}}$ » преобразователя частоты изменять частоту вращения магнитного поля АД в диапазоне от 150 до 25 рад/с. Для шести значений частоты вращения магнитного поля  $f$ , рад/с, считываемых с дисплея преобразователя частоты, определить соответствующие им показания указателя частоты вращения двигателя  $n$ , об/мин. Результаты занести в табл. А20.1.

Отключить кнопкой «Стоп» трехфазную асинхронную машину, а выключателем «Сеть» — преобразователь частоты.

3.8. После согласования протокола испытаний с преподавателем ЭЦ обесточить и разобрать, проводники убрать на место, рабочее место привести в порядок.

#### 4. Протокол испытаний и отчет о работе № 20

##### *Испытания трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором*

4.1. Цель работы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

4.2. Паспортные данные двигателя \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

4.3. Схема электрической цепи и таблицы.



$L1 - U1, L2 - V1, L3 - W1: I_{XX}^{\Delta} = \underline{\hspace{2cm}}; U_{\Delta}^{\Delta} = \underline{\hspace{2cm}};$   
 $n^{\Delta} = \underline{\hspace{2cm}}; I_{XX}^{\Delta} = \underline{\hspace{2cm}}; U_{\Delta}^{\Delta} = \underline{\hspace{2cm}}; n^{\Delta} = \underline{\hspace{2cm}}.$   
 $L1 - U1, L2 - W1, L3 - V1: I_{XX}^{\Delta} = \underline{\hspace{2cm}}; U_{\Delta}^{\Delta} = \underline{\hspace{2cm}};$   
 $n^{\Delta} = \underline{\hspace{2cm}}.$

Таблица Л20.1						
№ опыта	1	2	3	4	5	6
$f$ , рад/с						
$n$ , об/мин						

Группа \_\_\_\_\_ Студент \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_  
 Преподаватель \_\_\_\_\_

4.4. Расчетно-графическая часть.

Используемые формулы и соотношения:

$I_{XX}^{\Delta}/I_{XX}^{\Delta} = \underline{\hspace{2cm}}; P^{\Delta}/P^{\Delta} = \underline{\hspace{2cm}};$

скольжение асинхронного двигателя на холостом ходу

$S_{XX} = \underline{\hspace{2cm}}.$

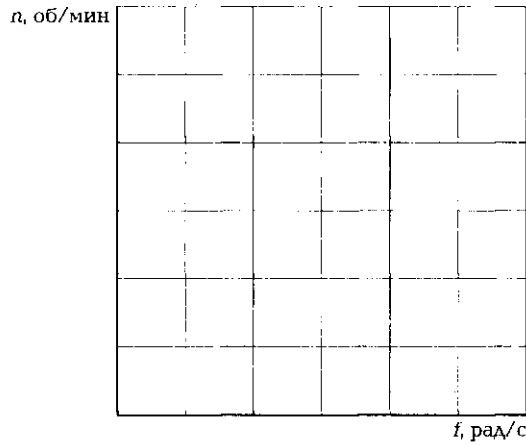


Рис. Л20.2. Зависимость частоты вращения асинхронного двигателя  $n$  от частоты вращения магнитного поля  $f$  (частотная характеристика АД)

4.5. Краткие выводы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_ Преподаватель \_\_\_\_\_

## 5. Требования к расчетно-графической части отчета

5.1. По данным пуска двигателя при различных схемах включения обмоток статора вычислить кратность токов холостого хода. Определить кратность мощностей при работе на холостом ходу в случае соединения обмоток треугольником и звездой. Результаты вычислений привести в протоколе испытаний.

5.2. Вычислить скольжение АД на холостом ходу  $S_{xx}$ , результат привести в протоколе испытаний.

5.3. На основании данных табл. А20.1 построить на рис. А20.2 частотную характеристику АД  $n = \Psi(f)$ .

5.4. Сделать краткие выводы по работе.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие законы положены в основу работы электрических машин?
2. Какие основные узлы входят в состав асинхронной машины?
3. Какую роль играет статор двигателя?
4. С какой целью статор и ротор двигателя переменного тока изготавливают из тонких штампованных пластин электротехнической стали?
5. Как изменить направление вращения ротора асинхронного двигателя?
6. Как изменить частоту вращения асинхронного двигателя?
7. Почему ротор АД не может «догнать» вращающееся магнитное поле?
8. Где находит применение асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором?



# ПРОИЗВОДСТВО И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

## 8.1. ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

### ТЕОРИЯ

#### 8.1.1. Традиционные источники электрической энергии

Электрическая цепь — это совокупность устройств, обеспечивающих протекание электрического тока. Этими устройствами в первую очередь являются *источники* электрической энергии, *линии электропередачи* и *потребители* электрической энергии (нагрузка). Для подвода электроэнергии к нагрузке необходимо ее произвести, передать и распределить между отдельными потребителями.

Большая часть производимой электрической энергии вырабатывается с помощью электромашинных генераторов, первичным (приводным) двигателем которых может быть:

- паровая турбина (на тепловых и атомных электростанциях);
- гидравлическая турбина (на гидравлических электростанциях).

В качестве электромашинного генератора в указанных случаях используется трехфазная синхронная машина, ротор которой связан с валом турбины. В зависимости от приводного двигателя конструктивная схема синхронного генератора может быть различной. Если у паровой турбины частота вращения достигает 3 000 об/мин, то у гидравлической турбины она не превышает 150 об/мин. Поэтому для получения напряжения промышленной частоты 50 Гц *турбогенератор* должен быть быстроходной двухполюсной машиной с неявно выраженными полюсами, а *гидрогенератор* — тихоходной многополюсной (до 100 полюсов) машиной с явно выраженными

ми полюсами. Роторы этих машин также различаются по конструкции. Об этом уже шла речь в подразд. 7.5.3.

На автономных электростанциях в качестве приводного двигателя может использоваться двигатель внутреннего сгорания. Эти электростанции используются, как правило, в отдаленных труднодоступных местах или там, куда не проведены линии электропередачи (лагери геологоразведочных экспедиций, стоянки оленеводов, дачные участки и т. д.).

Для получения электрической энергии могут использоваться солнечная энергия, геотермальная, энергия приливов и отливов, энергия морских волн и др.

Все рассмотренные виды энергии можно подразделить на возобновляемые и невозобновляемые. Невозобновляемой является энергия сжигаемого топлива (уголь, нефть, газ, торф, сланцы) и ядерного топлива. Все остальные виды энергии — возобновляемы, в том числе энергия сжигаемой биомассы, широко применяемая в последнее время на Западе.

Конечно, использование невозобновляемой энергии расточительно с точки зрения будущих поколений, но именно *тепловые электростанции* (ТЭС) обеспечивают сегодня производство большей части электроэнергии в мире — около 63 % (в России — 67 %). Это обусловлено тем, что помимо производства электрической энергии они способны обеспечивать населенные пункты теплом и горячей водой. Такие электростанции получили название *теплоэлектростанций* (ТЭЦ). Их коэффициент полезного действия может достигать 70 %. Располагаются они в непосредственной близости от населенных пунктов.

Мощные ТЭС, рассчитанные на производство лишь электрической энергии, строятся, как правило, вблизи значительных залежей природных ресурсов, обеспечивающих их работу в течение десятилетий (например, Экибастузская тепловая электростанция построена в районе Экибастузского угольного бассейна). Их коэффициент полезного действия обычно не превышает 30 %.

*Атомные электростанции* (АЭС) также относятся к тепловым электростанциям. Они преобразуют энергию водяного пара в механическую энергию паровой турбины, которая вращает ротор генератора, вырабатывающего электрическую энергию. Но на АЭС топливом служит радиоактивный уран 235, позволяющий осуществлять управляемую цепную реакцию в атомном реакторе. В процессе деления ядер урана выделяется огромное количество теплоты, которая отводится специальным жидким теплоносителем и поступает в теплообменник для получения перегретого пара. Последний

в паровом котле преобразуется в водяной пар. Основное преимущество АЭС перед ТЭЦ — гораздо меньший объем потребляемого топлива:

☛ 2 кг урана, имеющие такой же объем, как у теннисного мячика, эквивалентны 6 000 т угля (300 товарных вагонов).

Производство электроэнергии на АЭС — это экологически чистое производство по сравнению с ТЭЦ, хотя пока еще с определенной долей риска. АЭС строятся, как правило, вблизи крупных городов (Курская, Воронежская, Ленинградская АЭС). Сегодня даже в Японии, население которой с предубеждением относится к ядерной энергии, на долю АЭС приходится 30 % всей производимой электроэнергии. Франция производит на АЭС 78 % всей электроэнергии, наша страна — около 13 %.

Коэффициент полезного действия АЭС — около 25 %.

*Гидравлические электростанции* (ГЭС) позволяют использовать возобновляемую энергию падающей на гидравлическую турбину воды. Мощность электростанции напрямую зависит от напора воды, поступающей на лопасти турбины: чем больше напор и объем воды, проходящей через турбину, тем больше мощность электростанции. Поэтому ГЭС чаще строятся на реках с большим перепадом уровней (Чуйская, Туруханская, Саяно-Шушенская ГЭС). Строительство ГЭС на равнинных реках (Волжская, Красноярская ГЭС) требует создания мощных плотин и огромных водохранилищ, обеспечивающих необходимый перепад воды. Строительство ГЭС обходится значительно дороже, чем тепловых электростанций, и порой оказывает существенное влияние на экологию района. Однако производство электроэнергии на ГЭС обходится значительно дешевле, так как не требует доставки топлива. Кроме того, ГЭС способны запасать и регулировать потенциальную энергию воды в течение суток или даже лет. Это обеспечивается накоплением воды в водохранилище с последующим ее использованием в нужный момент времени. К тому же срок службы ГЭС больше, чем ТЭЦ. Коэффициент полезного действия ГЭС приближается к 90 %. Доля производимой на ГЭС электроэнергии в нашей стране составляет около 19 %.

### 8.1.2. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии

В последнее время во всем мире и в нашей стране все большее применение находят электростанции, использующие нетрадици-

онные возобновляемые источники энергии. Пока еще они не нашли широкого промышленного применения, и доля производимой на них электроэнергии невелика (около 2%). Коэффициент полезного действия их тоже невелик, но они весьма разнообразны, а главное, используют дарованную нам природой бесплатную энергию. Расходы требуются лишь на создание и обслуживание таких электростанций.

*Солнечные электростанции* используют энергию солнца, преобразуя ее в электрическую с помощью солнечных батарей. Эти источники электрической энергии служат для обогрева и освещения индивидуальных жилых помещений, теплиц, бассейнов в районах с преобладанием солнечных дней. Например, в Тибетском автономном районе Китая построено уже более 50 тыс. гелиопечей, солнечная энергия используется для отопления жилых помещений общей площадью более 150 тыс. квадратных метров, созданы гелиотеплицы общей площадью 1 млн квадратных метров. В Германии сегодня около 100 тыс. солнечных крыш, а в США — более 1 млн.

*Ветряные электростанции* используют энергию ветра, преобразуя ее в электрическую с помощью специальных ветряных лопастей. Применение таких электростанций целесообразно в районах с преобладанием ветреной погоды. Например, на Кольском полуострове, где средняя скорость ветра составляет 4,7 м/с, мощность всех ветряных электростанций составляет около 400 кВт. В США более 1 млн индивидуальных ветростанций используются для подогрева воды в бассейнах, обогрева теплиц и в сельском хозяйстве.

*Геотермальные электростанции* используют энергию горячих подземных вод. Они нашли применение в районах с геотермальными источниками, являющимися следствием активной вулканической деятельности в этих районах. Мощность геотермальных электростанций на Камчатке достигает 11 МВт. Имеются геотермальные электростанции в США, Италии, Японии, Новой Зеландии. В Исландии геотермальные и гидроэлектростанции производят 99,9% всей вырабатываемой электроэнергии.

*Приливные электростанции* (ПЭС) используют энергию приливов и отливов морей и океанов. Строятся они в районах, где перепад уровней «полной» и «малой» воды во время приливов и отливов составляет более 4 м. Первая приливная электростанция была построена в 1966 г. во Франции в устье реки Рона, где высота прилива может достигать 13,5 м. Ее мощность составляет 240 МВт. В России первая опытная приливная электростанция мощностью

800 кВт была построена в 1968 г. в губе Кислая Баренцевого моря. В 2011 г. в Южной Корее введена в строй самая мощная на сегодняшний день Сихвинская ПЭС мощностью 254 МВт (высота прилива — около 8 м). Опыт эксплуатации этих электростанций позволил приступить к разработке проектов мощных ПЭС: Мезенской в Баренцевом море на 10 ГВт, Тугурской в Охотском море на 8 ГВт, а также ПЭС в Канаде, Великобритании и ряде других стран. В будущем ПЭС смогут обеспечить выработку до 15 % всей потребляемой электроэнергии.

*Электростанции, использующие энергию морских волн, вот уже многие десятки лет эксплуатируются в Японии, Португалии, Великобритании, Норвегии и ряде других стран. Конструктивные схемы их различны: «утка Солтера», «плот Коккереля», вертикальный поплавок с насосом и др. Колебания на волнах платформы или поршня передаются на генератор, вырабатывающий электрическую энергию. Мощность таких электростанций невелика, хотя и достаточна для электроснабжения прибрежных поселков. В будущем люди непременно научатся более полно использовать огромные запасы энергии морей и океанов.*

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Укажите три основных вида традиционных электростанций, используемых в настоящее время для производства электроэнергии:
  - а) тепловые;
  - б) гидравлические;
  - в) ветряные;
  - г) атомные;
  - д) приливные;
  - е) солнечные.
2. Укажите два основных отличия АЭС от ТЭС:
  - а) несоизмеримо меньшее количество расходуемого топлива;
  - б) экологически более чистое производство электроэнергии;
  - в) иная конструкция турбин;
  - г) иной принцип получения электрической энергии;
  - д) меньшие расходы на передачу электрической энергии;
  - е) иная конструкция генераторов.
3. Укажите виды возобновляемых источников энергии, нашедших практическое применение для производства электроэнергии:
  - а) фотоэлектрические;
  - б) пьезоэлектрические;

Вид электростанций	Доля вырабатываемой электрической энергии, %
Гидравлические	13
Тепловые	19
Атомные	67
Солнечные	Менее 1
Приливные	Менее 1
Ветряные	Менее 1
Геотермальные	Менее 1

Рис. 8.1. Доля электроэнергии, вырабатываемой электростанциями различного вида в России (к тесту 6 подразд. 8.1)

- в) термоэлектрические;
  - г) ветряные;
  - д) приливные;
  - е) тензоэлектрические.
4. Укажите отличия ТЭЦ от ТЭС:
- а) строятся вблизи источников энергии;
  - б) строятся вблизи городов;
  - в) имеют больший КПД;
  - г) имеют меньший КПД;
  - д) наряду с электрической энергией производят тепловую энергию;
  - е) в качестве топлива используют уголь.
5. Укажите перспективные направления развития электроэнергетики в России:
- а) строительство АЭС;
  - б) строительство микроГЭС;
  - в) строительство мощных ГЭС;
  - г) использование угля вместо нефти и газа;
  - д) строительство мощных ТЭЦ;
  - е) строительство геотермальных электростанций в центральной части России.
6. На рис: 8.1 покажите линиями соответствие между видом электростанций и долей электрической энергии, производимой электростанциями этого вида в России:

## 8.2. ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

### ТЕОРИЯ

#### 8.2.1. Передача электрической энергии

После того как электрическая энергия произведена, ее необходимо передать потребителям. Как уже отмечалось, передавать ее выгодно при максимально возможном напряжении (см. подразд. 7.1.3). Сегодня передача электроэнергии большой мощности от удаленных источников осуществляется при напряжениях переменного тока до 1 150 кВ, постоянного тока — до 1 500 кВ. Меньшая мощность может передаваться при напряжениях в сотни киловольт (110, 220, 330, 500 и 750 кВ).

В зависимости от рабочего напряжения все электрические сети можно подразделить на сети:

- низкого напряжения — НН (до 1 000 В);
- среднего напряжения — СН (до 35 кВ);
- высокого напряжения — ВН (до 220 кВ);
- сверхвысокого напряжения — СВН (более 330 кВ).

В зависимости от способа передачи электроэнергии линии электропередачи подразделяют на воздушные и кабельные.

Опоры *воздушных линий электропередачи* могут быть деревянными, железобетонными или металлическими. Чем выше напряжение линии, тем большее расстояние должно быть между опорами. Провода на опорах крепятся с помощью либо штыревых изоляторов (сеть НН), либо подвесных, собранных в гирлянды (СН, ВН, СВН). В линиях электропередачи (ЛЭП) используются алюминиевые многожильные неизолированные провода, а также провода, имеющие стальную сердцевину, вокруг которой навивается алюминиевая проволока — сталеалюминевые провода. Стальная сердцевина увеличивает механическую прочность провода. Площадь сечения проводов определяется не только величиной передаваемого тока, но и целым рядом дополнительных условий. В результате реальный диаметр провода может быть выше расчетного и, например, при напряжении 220 кВ составлять около 22 мм.

На вершинах опор крепится стальной трос, связанный с землей. Он защищает ЛЭП от атмосферного электричества.

Внешний вид опор высоковольтной ЛЭП показан на рис. 8.2.

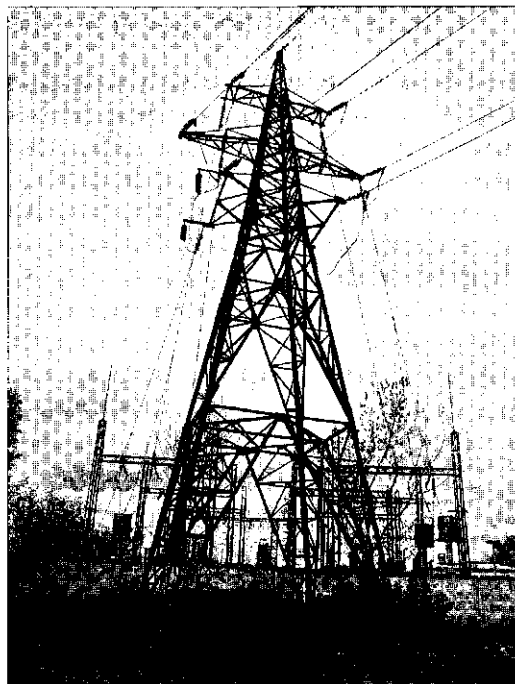


Рис. 8.2. Опоры высоковольтной ЛЭП

Высоковольтная ЛЭП является источником мощных электромагнитных излучений, поэтому строительство зданий, дач, сельскохозяйственных комплексов вблизи таких линий запрещено.

*Кабельные линии электропередачи* являются более трудоемкими и в изготовлении, и в обслуживании. Они допускают напряжение не более 220 кВ. При напряжении до 35 кВ используют трехжильный кабель соответствующего сечения, жилы которого надежно изолированы друг от друга, имеют защитные оболочки и стальную броню для предотвращения механических повреждений. При напряжении более 35 кВ применяют одножильный кабель специальной конструкции. Материал жилы — алюминий.

Кабели прокладывают в бетонных трубах, подземных коллекторах или подземных траншеях. Кабельные линии более безопасны при эксплуатации, на них не действует атмосферное электричество, они защищены от механических повреждений, безопасны для населения и не занимают места на поверхности земли. В то же время строительство зданий и других сооружений над кабельными трассами запрещено.



## 8.2.2. Распределение электрической энергии

После того как электрическая энергия произведена и передана потребителям, ее необходимо между ними распределить.

Потребителями могут быть как промышленные предприятия, транспорт, объекты сельского хозяйства, военно-промышленного комплекса, медицинские учреждения, строительные организации, так и жилые комплексы. Все они требуют не только различной мощности, но и различного напряжения. Причем параметры эти не остаются неизменными не только в течение года или сезона, но и в течение суток. Потребление электроэнергии ночью, как правило, значительно меньше, чем днем. Существует также сезонная разница в потреблении электроэнергии. Возможны аварийные или профилактические отключения источников электроэнергии, которые, конечно же, не должны сказываться на потребителях. Значит, в такие моменты потребители должны быть подключены к другим источникам.

Отсюда и возникла необходимость *единой электроэнергетической системы* (ЕЭЭС), в которой параллельно работает большое число электростанций, причем не только одной страны, но и целого ряда стран. В этом случае достаточно легко обеспечивается перераспределение энергии между потребителями, а также суточное, сезонное и аварийное регулирование. Ныне действующая ЕЭЭС включает в себя около 1 тыс. электростанций общей мощностью около 300 ГВт, расположенных на территории более полутора десятков европейских стран.

Если в промышленности, на транспорте, в строительных организациях, как правило, используется энергия переменного тока с напряжением в несколько киловольт, то в быту требуется напряжение 220 или 380 В. В связи с этим должны существовать распределительные подстанции, обеспечивающие потребителей необходимым по величине напряжением. В цепочке источник — потребитель таких распределительных подстанций может быть несколько.

Существующие генераторы электростанций имеют на выходе напряжение всего лишь в несколько киловольт (от 6 до 18 кВ). Следовательно, вначале напряжение от генераторов необходимо повысить до нужного значения (ориентировочно 1 кВ на 1 км ЛЭП) на повышающих трансформаторных подстанциях (ПТП), затем передать его на нужное расстояние, после чего понизить на районных трансформаторных подстанциях (РТП) до 6...35 кВ. РТП располагаются на окраинах городов или на крупных промышленных предприятиях.

Сельскохозяйственные, строительные объекты, жилые комплексы, как правило, используют электрическую энергию напряжением 380/220 В, снимаемую с вторичных обмоток трехфазных трансформаторов потребительских трансформаторных подстанций (ПтТП), размещаемых вблизи потребителей. От районных до потребительских трансформаторных подстанций передача энергии осуществляется, как правило, по электрическим кабелям, проложенным в земле. Городской транспорт в большинстве случаев использует энергию постоянного тока, поэтому в цепи электропередачи стоят мощные выпрямительные устройства (рис. 8.3).

Длина современных ЛЭП может достигать нескольких тысяч километров. При этом потери мощности, равные 10 % передаваемой, несмотря на огромные абсолютные значения, считаются допустимыми.

Вопросы снижения потерь электроэнергии при передаче и, особенно, при потреблении всегда считались важнейшей задачей. В последнее время, когда число потребителей электроэнергии в промышленности и в быту растет более быстрыми темпами, чем производство электроэнергии, вопросы экономии электроэнергии становятся особенно актуальными.

В промышленности главное внимание уделяется повышению коэффициента мощности ( $\cos\phi$ ), а также использованию современных высокоэкономичных технологических процессов, более совершенного и менее энергоемкого оборудования, замене ламп накаливания энергосберегающими лампами и т. д.

В быту в первую очередь необходимо рационально использовать освещение, применять энергосберегающие лампы, а также

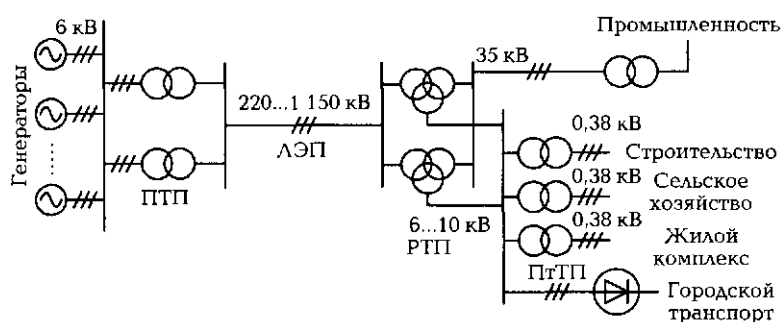


Рис. 8.3. Схема передачи электроэнергии от производителей к потребителям:

ПТП — повышающие трансформаторные подстанции; ЛЭП — линия электропередачи; РТП — районные трансформаторные подстанции (понижающие); ПтТП — потребительские трансформаторные подстанции (понижающие)

современные холодильники, стиральные машины, электроплиты, теле- и радиоаппаратуру с более экономичными характеристиками. Широкое применение в ряде стран находят устройства управления освещением на лестничных клетках и в подъездах многоквартирных домов, обеспечивающие включение светильников только на время нахождения жильцов. Установка в домах современных евроокон, облицовка с утеплением наружных стен многоэтажных домов постройки 1960 — 1970-х гг., внедрение автоматических систем регулирования подачи теплоты в квартиры в зависимости от наружной температуры также направлены на экономию электроэнергии, используемой в холодное время на обогрев жилья.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

1. Для чего повышают напряжение, полученное от генератора, перед передачей в ЛЭП:
  - а) чтобы уменьшить передаваемую мощность;
  - б) чтобы уменьшить передаваемый ток;
  - в) чтобы уменьшить реактивную составляющую тока;
  - г) чтобы повысить коэффициент мощности?
2. Как изменятся потери в ЛЭП, если напряжение повысить в 10 раз:
  - а) увеличатся в 10 раз;
  - б) уменьшатся в 10 раз;
  - в) не изменятся;
  - г) уменьшатся в 100 раз?
3. При каком максимальном значении напряжения сегодня передается электроэнергия переменного тока:
  - а) 220 В;
  - б) 220 кВ;
  - в) 1 150 кВ;
  - г) 5 250 кВ?
4. Почему запрещена всякая хозяйственная деятельность в районе высоковольтных ЛЭП:
  - а) могут упасть опоры;
  - б) могут оборваться провода;
  - в) ЛЭП являются источником мощных электромагнитных излучений;
  - г) может произойти коронный разряд на землю?
5. Зачем на вершинах опор крепится стальной трос, соединенный с «землей»:
  - а) он увеличивает механическую прочность ЛЭП;

- б) он защищает от атмосферного электричества;
  - в) он играет роль громоотвода;
  - г) он обеспечивает равномерное распределение механических нагрузок?
6. Что собой представляет ЕЭС:
- а) это комплекс электростанций и ЛЭП, работающих на общую нагрузку;
  - б) это около 1 тыс? электростанций в 16 странах Европы общей мощностью 300 ГВт;
  - в) это система, дающая возможность перераспределять электроэнергию между потребителями;
  - г) все перечисленные ответы, вместе взятые?
7. Укажите основные методы снижения электрических потерь при передаче и использовании электрической энергии:
- а) замена старых технологий на новые энергосберегающие;
  - б) повышение коэффициента мощности ( $\cos\varphi$ ) электроустановок;
  - в) использование энергосберегающего оборудования;
  - г) все перечисленные методы.

### **ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И МАГНИТНЫМ ЦЕПЯМ И ОСНОВАМ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Лабораторные работы предназначены для углубления и закрепления теоретических знаний, а также приобретения навыков по сборке и наладке электрических схем, измерениям в электрических цепях, проведению испытаний электротехнических установок, расчету и анализу электрических цепей, оформлению результатов испытаний и расчетов.

Предлагаемые лабораторные работы являются двухчасовыми и рассчитаны на выполнение подгруппой из 13—15 студентов в специально оборудованной лаборатории. Целесообразно с точки зрения техники безопасности за каждым стендом закрепить двух студентов. В этом случае в лаборатории достаточно иметь семь-восемь универсальных стендов.

Для активизации познавательной деятельности студентов в процессе выполнения лабораторных работ должны широко использоваться демонстрационные макеты, модели, плакаты, планшеты с реальными электротехническими элементами и устройствами: резисторами, конденсаторами, катушками индуктивности, трансформаторами, диодами, транзисторами, микросхемами, переключателями и кнопками, индикаторами, проводами и кабелями, электродвигателями и генераторами, электроизмерительными приборами.

На первом занятии в лаборатории перед выполнением работы № 1 студенты должны быть закреплены за определенными стендами. Им необходимо ознакомиться с правилами техники безопасности, а также общими правилами поведения в лаборатории и оформления лабораторных работ, конструктивной и электрической схемой стенда, осуществить пробное включение стенда.

Для выполнения и оформления лабораторно-практических работ каждый студент должен иметь рабочую тетрадь «Лабораторно-практические работы по электротехнике», в которой оформляются протоколы испытаний и отчеты по всем работам, линейку, карандаш, калькулятор. Форма протокола испытаний и содержание отчета показаны в каждой работе.

#### **Правила выполнения лабораторных работ**

К выполнению работ допускаются студенты:

- прошедшие инструктаж по технике безопасности;
- имеющие в тетради оформленные протоколы испытаний к очередной работе;

- ознакомившиеся с целью и порядком выполнения работы, а также электрическими схемами, которые будут применяться в данной работе;
- изучившие теоретический материал, относящийся к выполняемой работе.

Подготовленность студентов к выполнению лабораторных работ проверяется преподавателем путем индивидуального опроса. Студент, получивший неудовлетворительную оценку, к выполнению работы не допускается.

Подача напряжения на лабораторный стенд без разрешения преподавателя или лаборанта **КАТЕГОРИЧЕСКИ ЗАПРЕЩЕНА!**

По окончании работы электрическая цепь должна быть разобрана, стенд обесточен, мини-блоки и провода убраны на место.

Результаты лабораторной работы студенты заносят в протокол испытаний строго карандашом и представляют преподавателю для проверки. При неправильных результатах лабораторная работа должна быть переделана.

По результатам работы каждый студент (или бригада) оформляет отчет в рабочей тетради «Лабораторно-практические работы по электротехнике». Отчет должен оформляться аккуратно, в полном соответствии с правилами оформления (см. далее). Все графические построения должны выполняться с применением чертежных инструментов. На графиках и векторных диаграммах должны быть нанесены масштабы измеряемых величин и соответствующие обозначения.

Минимум знаний, необходимых для защиты лабораторной работы, отражают контрольные вопросы в конце описания каждой работы.

### Описание лабораторного стенда

Порядок выполнения всех приведенных в настоящем учебнике лабораторных работ по электрическим и магнитным цепям и основам электроники, а также работы, связанной с испытанием трансформатора, предусматривает использование комплекта типового лабораторного оборудования «Электрические цепи и основы электроники» (ЭЦОЭ), выпускаемого ИПЦ «Учебная техника» (г. Челябинск). Внешний вид стенда показан на рис. П1.

Основными компонентами ручного (некомпьютеризованного) варианта комплекта являются:

- блок однофазного источника питания;
- блок генераторов постоянного и переменного напряжений, в том числе трехфазного, с наборным полем;
- набор мини-блоков;
- блок мультиметров;
- электронный ваттметр;
- соединительные провода, перемычки и кабели питания;
- осциллограф.

В комплект может входить лабораторный стол с выдвижными ящиками (стендовый вариант исполнения) либо просто настольная рама (настольный вариант).

При стендовом варианте на лабораторном столе закрепляется вертикальная рама, на которой устанавливаются блок генераторов с наборным

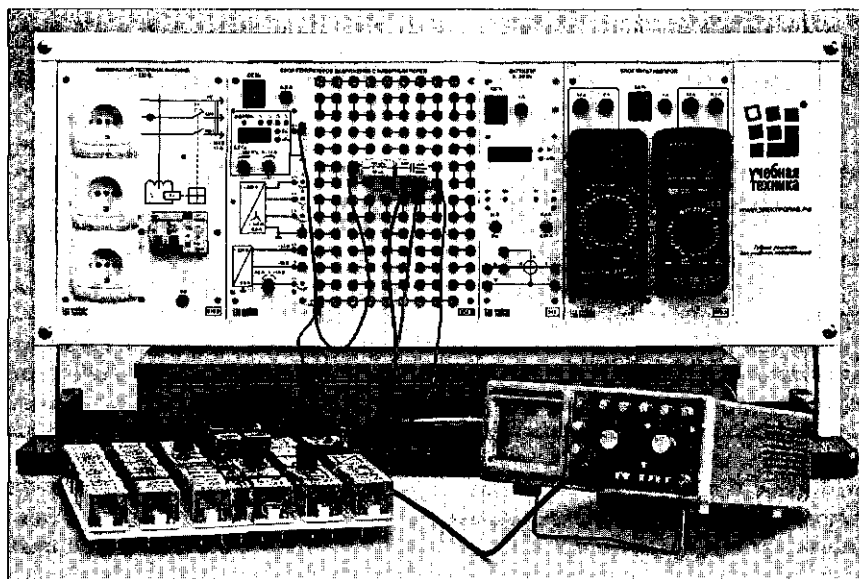


Рис. П1. Внешний вид стенда для лабораторных работ по электрическим и магнитным цепям и основам электроники

полем, блок мультиметров, электронный ваттметр и блок однофазного источника питания. Осциллограф устанавливается на горизонтальной поверхности стола. Однофазный источник питания работает от трехпроводной однофазной сети (фаза, «ноль», «земля») и включает в себя устройство защитного отключения УЗО (срабатывает при нарушении изоляции), автоматы (для защиты от сверхтоков), блок розеток и разъемов для подключения блока мультиметров, ваттметра и осциллографа.

При настольном варианте исполнения все оборудование располагается на столе заказчика. При этом рама устойчиво стоит на столе без какого-либо крепления.

*Блок генераторов напряжений включает в себя:*

- источник постоянных напряжений, содержащий два источника стабилизированного напряжения  $+15\text{ В}$  и  $-15\text{ В}$  и регулируемый источник  $-13 \dots 13\text{ В}$  относительно общей точки  $N$ ;
- генератор напряжений специальной формы (синусоидальной, прямоугольной, треугольной, устанавливаемой переключателем «ФОРМА») с регулируемой частотой (может изменяться от 25 до 102 500 Гц десятиоборотным потенциометром «ЧАСТОТА») и амплитудой (изменяется от 0 до 12,5 В потенциометром «АМПЛ.»);
- преобразователь однофазного напряжения частотой 50 Гц в трехфазное с выходным напряжением 8 В.

Все источники включаются общим выключателем «СЕТЬ», защищены от перегрузок и внешних коротких замыканий самовосстанавливающимися-

ся предохранителями, о срабатывании которых свидетельствует световой индикатор «I>», и имеют выходное сопротивление, близкое к нулю.

*Наборная панель*, расположенная рядом с генераторами напряжений, служит для размещения на ней мини-блоков в соответствии со схемой испытаний. Мини-блоки устанавливаются в гнезда и могут быть соединены между собой и с измерительными приборами с помощью перемычек и проводов со штекерами. Для подключения амперметра используется мини-блок «А», гнездо коаксиального разъёмного соединения которого соединяется коаксиальным кабелем с мультиметром, работающим в режиме амперметра.

*Мини-блоки* представляют собой как отдельные элементы электрических цепей (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды, транзисторы), так и сложные функциональные блоки (усилители, стабилизаторы, измерительные преобразователи, интеграторы и др.), помещённые в прозрачные корпуса со штекерами.

*Блок мультиметров* предназначен для измерения токов, напряжений и сопротивлений и включает в себя два серийно выпускаемых мультиметра: МУ60 и МУ62 или МУ64. Мультиметры получают питание от сети через выключатель «СЕТЬ» и предохранитель.

*Ваттметр* предназначен для измерения мощности, содержит тумблеры для выбора необходимых пределов измерения и световые индикаторы перегрузок. Показание прибора отображается на дисплее в цифровом виде. Питается ваттметр от сети и включается выключателем «СЕТЬ».

### Правила сборки электрических цепей

Перед сборкой электрической цепи необходимо определить все элементы, которые должны входить в нее в соответствии с принципиальной схемой: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды, функциональные блоки, выключатели, измерительные приборы, источники питания и др. Переключатели режимов работы и пределов измерений мультиметров и ваттметра следует установить в соответствующие положения.

При сборке ЭЦ необходимо придерживаться следующих правил:

- начинать сборку от зажимов источника питания;
- в первую очередь собирать главную цепь, состоящую из последовательно соединённых элементов;
- во вторую очередь подсоединять параллельно подключаемые элементы и измерительные приборы.

Разборку ЭЦ следует начинать от источников питания, предварительно отключив напряжение питания.

### Правила оформления отчета

Все таблицы, графики, диаграммы в протоколе испытаний должны быть выполнены карандашом с применением чертежных инструментов.

Масштаб на графиках, за исключением особо оговорённых случаев, должен быть равномерным. Не следует на осях указывать цифры, полученные при измерениях. Для изображения нескольких зависимостей на графике строят несколько вертикальных осей (каждую со своим масштабом).



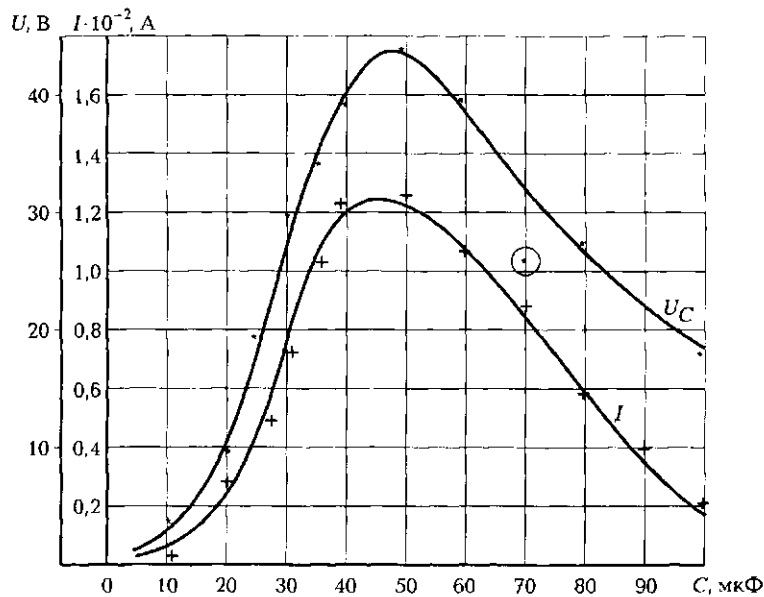


Рис. П2. Пример оформления графика

Кривые на графике в этом случае выделяют соответствующим цветом или способом нанесения точек (+++, "", ... и т. д.). Рядом с каждой кривой наносят в удобном месте обозначение зависимости (рис. П2).

Кривая на графике должна быть плавной. Ее надо проводить так, чтобы полученные в результате испытаний точки отстояли от нее приблизительно на одинаковом расстоянии. Точки, далеко отстоящие от кривой, являются следствием промаха наблюдателя. Их отмечают на графике особо, например обводят кружком (см. рис. П2).

Отчет составляется каждым студентом или бригадой в рабочей тетради «Лабораторно-практические работы по электротехнике».

Отчет должен содержать:

- протокол испытаний, утвержденный преподавателем;
- вычисления и графические построения, предусмотренные подразделом «Требования к расчетно-графической части отчета»;
- краткие выводы по лабораторной работе.

### Техника безопасности при выполнении работ

В лаборатории электротехники студенты должны неукоснительно соблюдать правила поведения и техники безопасности. Работать разрешается строго на своем рабочем месте, перемещения в лаборатории должны быть максимально ограничены.

Ни в коем случае не следует касаться руками неизолированных соединительных проводов и контактов в цепи, находящейся под напряжением.

Любое изменение в схеме, пересоединение проводников должны выполняться при обесточенной ЭЦ. Все переключения и изменения должны быть проверены преподавателем.

Опасность представляют ЭЦ, содержащие катушки индуктивности с большим числом витков. При их размыкании на концах катушки может индуцироваться значительная ЭДС. К таким ЭЦ надо относиться с особой осторожностью.

Перед проведением лабораторных работ студенты обязаны ознакомиться с действующими в учебном заведении инструкциями по охране труда при эксплуатации электроустановок напряжением до 1 000 В, по пожарной безопасности, охране труда при проведении работ в кабинете электротехники и расписаться в соответствующем журнале.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТЕНДЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ

Лабораторные работы по электрическим машинам выполняются на стенде по основам электромеханики (ОЭМ), выпускаемом Инженерно-производственным центром «Учебная техника». Внешний вид стенда приведен на рис. П3. Стенд включает в себя: блок электрических машин, содер-

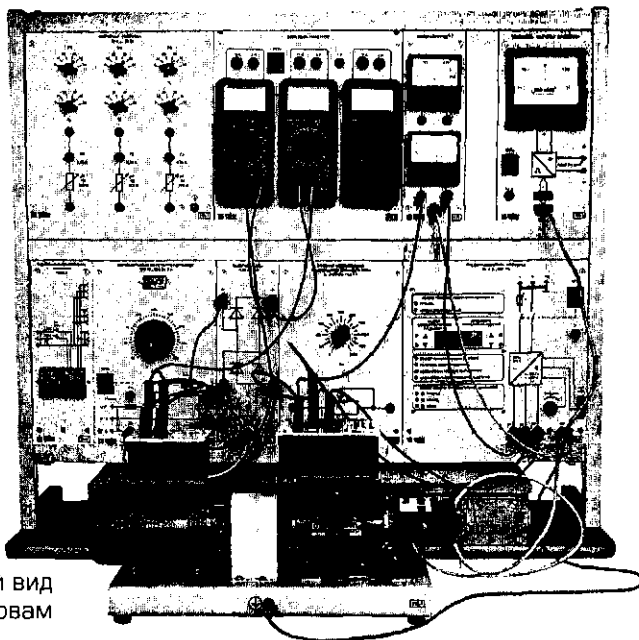


Рис. П3. Внешний вид  
стенда по основам  
электромеханики

жащий трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и машину постоянного тока; преобразователь частоты; преобразователь угловых перемещений; указатель частоты вращения; регулируемый автотрансформатор; выпрямитель; активную нагрузку; реостат возбуждения машины постоянного тока; блок мультиметров и однофазный источник питания.

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

#### ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Измеряемая величина		Базовое выражение	Единица измерения	
Наименование	Обозначение		Наименование	Обозначение
Заряд электрический	$q$	—	кулон	Кл
Сила тока: постоянного переменного	$I$ $i$	$q/t$ $i = \Delta q / \Delta t$	ампер	А
Плотность тока	$j$	$j = I/S$	ампер на квадратный метр	А/м <sup>2</sup>
Потенциал	$\phi$	—	вольт	В
Напряжение электрическое: постоянного тока переменного тока: мгновенное максимальное действующее	$U$ $u$ $U_m$ $U$	$U = \phi_1 - \phi_2$ $u = U_m \sin \omega t$ $0,707 U_m$	вольт	В
Электродвижущая сила: мгновенная максимальная действующая	$e$ $E_m$ $E$	$e = -\Delta \Phi / \Delta t$	вольт	В
Сопротивление электрическое: активное реактивное полное	$R$ $X$ $Z$	$R = \rho l / S$ $X_L - X_C$ $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	ом	Ом

Продолжение табл.

Измеряемая величина		Базовое выражение	Единица измерения	
Наименование	Обозначение		Наименование	Обозначение
Проводимость: активная реактивная полная	$g$ $b$ $y$	$g = R/Z^2$ $b = X/Z^2$ $y = \sqrt{g^2 + b^2}$	сименс	См
Сопротивление электрическое удельное	$\rho$	—	ом-метр	Ом·м
Мощность: активная реактивная полная	$P$ $Q$ $S$	$P = UI \cos \varphi$ $Q = UI \sin \varphi$ $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	ватт вар вольт-ампер	Вт вар В·А
Угол сдвига фаз между напряжением и током	$\varphi$	—	градус	°
Кэффициент мощности	$\cos \varphi$	$\cos \varphi = P/S$	—	—
Емкость	$C$	$C = q/U = \epsilon_a S/d$	фарад	Ф
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	$\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$	фарад на метр	Ф/м
Диэлектрическая проницаемость: абсолютная относительная	$\epsilon_a$ $\epsilon$	$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon$ —	фарад на метр —	Ф/м —
Емкостное сопротивление	$X_C$	$X_C = 1/(\omega C)$	ом	Ом
Индуктивность	$L$	$L = \Psi/I = \mu_a w^2 S/l$	генри	Гн
Магнитная постоянная	$\mu_0$	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	генри на метр	Гн/м
Магнитная проницаемость: абсолютная относительная	$\mu_a$ $\mu$	$\mu_a = \mu_0 \mu$ —	генри на метр —	Гн/м —

Окончание табл.

Измеряемая величина		Базовое выражение	Единица измерения	
Наименование	Обозначение		Наименование	Обозначение
Индуктивное сопротивление	$X_L$	$X_L = \omega L$	ом	Ом
Индукция магнитная	$B$	$B = \Phi/S$	тесла	Тл
Напряженность магнитная	$H$	$H = B/\mu_0$	ампер на метр	А/м
Намагничивающая (магнитодвижущая) сила	$F_M$	$F_M = Iw$	ампер	А
Число витков	$w$	—	—	—
Магнитный поток	$\Phi$	$Iw/R_M$	вебер	Вб
Потокоцепление	$\Psi$	$\Phi w$	вебер	Вб
Напряжение магнитное	$U_M$	$U_M = Hl$	ампер	А
Сопротивление магнитное	$R_M$	$R_M = l/(\mu_0 S)$	генри в минус первой степени	Гн <sup>-1</sup>
Коэффициент трансформации	$k_{21}$	$k_{21} = w_2/w_1$	—	—
Сила электромагнитная	$F_{эм}$	$F_{эм} = c_M BI$	ньютон	Н
Частота колебаний:			радиан в секунду	рад/с
циклическая	$f$	$1/T$	герц	Гц
Период	$T$	—	секунда	с
Число пар полюсов	$p$	—	—	—
Синхронная скорость	$n_1$	$60 f/p$	обороты в минуту	об/мин
Скольжение	$S$	$(n_1 - n)/n_1$	—	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

**ОБОЗНАЧЕНИЕ КРАТНЫХ И ДОЛЬНЫХ ЕДИНИЦ  
ИЗМЕРЕНИЯ**

Мно- житель	При- ставка	Обозначения		Мно- житель	При- ставка	Обозначения	
		русские	латинские, греческие			русские	латинские, греческие
$10^{12}$	тера	Т	T	$10^{-1}$	деци	д	d
$10^9$	гига	Г	G	$10^{-2}$	санти	с	c
$10^6$	мега	М	M	$10^{-3}$	мили	м	m
$10^3$	кило	к	k	$10^{-6}$	микро	мк	μ
$10^2$	гекто	г	h	$10^{-9}$	нано	н	n
$10^1$	дека	да	da	$10^{-12}$	пико	п	p

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

**УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ  
И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ  
СОПРОТИВЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Материал проводника	Удельное электрическое сопротивление $\rho$ , Ом · мм <sup>2</sup> /м	Температурный коэффициент сопротивления $\alpha$ , 1/°C
Серебро	0,016	0,004
Медь	0,0175	0,004
Алюминий	0,029	0,004
Вольфрам	0,056	0,005
Платина	0,1	0,004
Сталь	0,12	0,006
Манганин	0,42	0,000006
Константан	0,48	0,00004
Нихром	1,1	0,0001
Фехраль	1,4	0,0002

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

**СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ  $\epsilon$   
ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Материал	$\epsilon$	Материал	$\epsilon$
Воздух	1	Текстолит	7
Масло трансформаторное	2,2	Стекло	8
Бумага	3,5	Шифер	10
Слюда	5	Спирт	33
Фарфор	6	Вода	81

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

**УСЛОВНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ  
ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ**

Источник ЭДС		Переключатель	
Предохранитель		Выключатель	
Лампа накаливания		Геркон	
Обмотка реле		Контакты реле	
Миллиамперметр		Вольтметр	
Ваттметр		Омметр	
Динамик		Трансформатор	
Разъем		Выпрямительный мост	

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

**ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗАЗЕМЛЕНИИ**

Эксплуатация старого, изношенного электрооборудования и электрических проводов может привести к серьезным последствиям, таким как

удар человека током, короткое замыкание, возгорание и др. Защититься от этого можно, если соблюдать определенные меры безопасности. В первую очередь к ним относится заземление.

*Заземление электроустановки* — это электрическое соединение ее корпуса, который из-за неисправности может оказаться под напряжением, с заземляющим устройством. Различают два вида заземления: защитное заземление и зануление.

*Защитное заземление* — это искусственное соединение с землей отдельных частей или всей электроустановки. При возникновении пробоя изоляции корпус электроустановки может оказаться под напряжением. Если к корпусу в это время прикоснется человек, то через его тело потечет ток. Благодаря защитному заземлению проходящий через человека ток не будет представлять для него опасности, потому что основная часть тока при пробое изоляции потечет по заземляющей цепи, сопротивление которой гораздо меньше сопротивления тела человека. Цепь защитного заземления состоит из заземлителя и заземляющих проводников.

Существует два вида *заземлителей*: естественные и искусственные. К естественным относятся металлические конструкции зданий, надежно соединенные с «землей». В качестве искусственных заземлителей используют стальные трубы, стержни или уголки длиной не менее 2,5 м, забитые в землю и соединенные друг с другом стальными полосами или приваренной проволокой.

В качестве *заземляющих проводников*, соединяющих заземлитель с электроустановками, обычно используют стальные или медные шины, которые либо приваривают к корпусам электроустановок, либо соединяют с ними болтами.

Защитному заземлению подлежат металлические корпуса электрических машин, трансформаторов, распределительных шкафов, щитов и др. При выполнении заземления требуется максимально уменьшить сопротивление заземлителя относительно земли. Этого можно достигнуть, например, увеличив число искусственных заземлителей.

Сопротивление заземляющего устройства в любое время года должно быть не более 2, 4 и 8 Ом при линейных напряжениях соответственно 660, 380 и 220 В источника трехфазного тока или 380, 220 и 127 В источника однофазного тока.

*Зануление* — это искусственное электрическое соединение частей или всей электроустановки, в нормальном состоянии не находящихся под напряжением, с глухозаземленной нейтралью (с нулевым проводом). В данном случае замыкание любой из фаз на корпус электроустановки превращается в короткое замыкание этой фазы с нулевым проводом. Ток короткого замыкания приводит к срабатыванию защитной аппаратуры (автоматы, предохранители) и быстрому отключению поврежденного оборудования.

Различают нулевой рабочий и нулевой защитный проводники.

*Нулевой рабочий проводник* служит для питания электроустановок, имеет одинаковую с другими проводами изоляцию и достаточную площадь сечения для прохождения рабочего тока.



Нулевой защитный проводник предназначен для создания кратковременного тока короткого замыкания при замыкании фазы на корпус электроустановки в целях срабатывания защиты и быстрого отключения поврежденной электроустановки от питающей сети. В качестве нулевого защитного проводника могут использоваться стальные трубы и нулевые провода, не имеющие предохранителей и выключателей.

Правила устройства электроустановок (ПУЭ), отвечающие требованиям Международной электротехнической комиссии, предусматривают три системы заземления и несколько их подсистем:

- система TN (подсистемы TN-C, TN-S, TN-C-S);
- система TT;
- система IT.

*Система TN* — это система с глухозаземленной нейтралью (на трансформаторной подстанции нейтраль непосредственно подключена к заземляющему контуру), при которой открытые проводящие части электроустановки присоединены к глухозаземленной нейтрали источника с помощью нулевых защитных проводников.

*Подсистема TN-C* — это разновидность системы TN, в которой нулевой защитный PE и нулевой рабочий N проводники совмещены на всем ее протяжении, образуя провод PEN (рис. П4, а). Такая система применялась ранее, при новом строительстве не используется.

*Подсистема TN-S* — это разновидность системы TN, в которой на всем ее протяжении нулевой защитный и нулевой рабочий проводники разделены (рис. П4, б). Это самая безопасная, но и самая дорогая система.

*Подсистема TN-C-S* — это разновидность системы TN, в которой нулевой защитный и нулевой рабочий проводники совмещены лишь на каком-то участке, например до ввода в главный щит здания (рис. П4, в). Далее по всему зданию эти проводники разделены. Такая система оптимальна.

*Система IT* — это система, в которой «ноль» источника изолирован от земли, а открытые проводящие части электроустановки заземлены с помощью заземляющих устройств. В настоящее время такая система практически не используется.

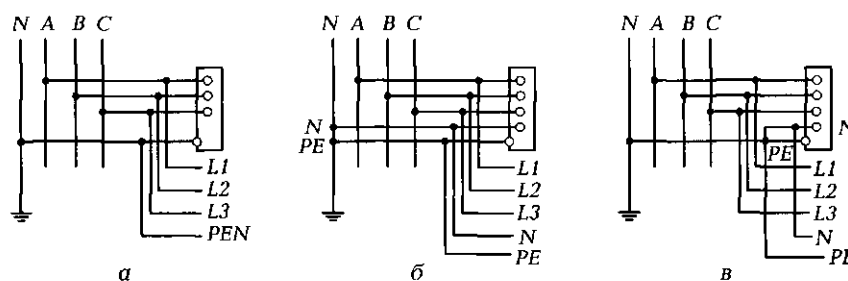


Рис. П4. Схемы заземления:

а — подсистема TN-C (combined); б — подсистема TN-S (separated); в — подсистема TN-C-S

*Система TT* — это система, в которой трансформаторная подстанция имеет непосредственную связь токоведущих частей с «землей» («ноль» источника заземлен), а открытые проводящие части электроустановки заземлены с помощью заземляющего устройства, электрически независимо от заземленного «нуля» источника. Иными словами, используется автономный контур заземления на объекте, никак не связанный с «нулем». Такая система обычно применяется на мобильных сооружениях (например, строительных бытовках).

## ПРИЛОЖЕНИЕ 9

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

*Электрической связью* называется связь, при которой передача информации любого вида (речевой, буквенно-цифровой, зрительной и т. д.) осуществляется электрическими сигналами, передаваемыми по проводам, или радиосигналами, распространяющимися в свободном пространстве. В зависимости от способа передачи сигналов различают проводную связь и радиосвязь.

Задачей любой связи является передача сообщений на расстояние от отправителя к получателю. В электросвязи переносчиком сообщений является электрический сигнал, способный распространяться в определенных средах. Следовательно, для передачи сообщения оно должно быть преобразовано в набор электрических сигналов. На месте приема полученные сигналы необходимо преобразовать в сообщение, предназначенное получателю. Чтобы выполнять все эти операции, необходимы соответствующие технические устройства, которые в совокупности со средой распространения сигналов образуют систему электросвязи. Она связывает источники сообщений с их получателями, которыми могут быть как люди, так и автоматические производства с различными датчиками, исполнительными механизмами и ЭВМ.

В системах электросвязи применяют различные по устройству и принципу работы преобразователи сообщения в сигналы (передатчик) и сигналов в сообщения (приемник). В системах передачи оптических сообщений таковыми являются фотоэлектрические преобразователи, в системе передачи звуковых сообщений — электроакустические преобразователи.

Системы звукового вещания обеспечивают одностороннюю передачу звуковых сообщений (речи, музыки) от источника до большого числа слушателей, рассредоточенных в пространстве. В зависимости от технических средств различают системы радиовещания и проводного вещания. В первом случае сигналы передаются по радиоканалу, в котором средой распространения является открытое пространство. Радиоканал сформирован с помощью специальных устройств, основными из которых являются радиопередатчик, передающая антенна, приемная антенна и радиоприемник.

Радиопередатчик преобразует первичный низкочастотный сигнал на выходе микрофона в высокочастотный сигнал, излучаемый передающей

антенной в окружающее пространство в виде электромагнитных волн. Под воздействием этих волн в приемной антенне возникает высокочастотный ток, характер изменения которого такой же, как у высокочастотного сигнала. В радиоприемнике из высокочастотного сигнала после соответствующей обработки выделяется первичный сигнал. Далее низкочастотный первичный сигнал преобразуется громкоговорителем в звуковое сообщение.

Основным видом радиоканала являются *радиорелейные линии* (РРЛ), обеспечивающие двустороннюю передачу сигналов. Каждый оконечный пункт РРЛ имеет радиопередатчик и радиоприемник для одновременной передачи и приема сигналов. Передача и прием производятся на разных частотах, поэтому передающая аппаратура не мешает работе приемной. На каждой промежуточной станции имеется по два радиопередатчика и радиоприемника для одновременного приема и передачи сигналов в двух направлениях. Цепочка радиорелейных станций образует радиорелейную линию связи. Сигналы от первой станции принимаются второй, усиливаются и передаются далее к третьей станции, где вновь усиливаются и передаются к четвертой станции и т.д. Чем выше опоры станций РРЛ, тем на большее расстояние могут быть переданы радиосигналы. Высота опор современных РРЛ достигает 300 м.

*Тропосферная радиорелейная система* (ТРРС) использует эффект рассеяния и отражение радиоволн в нижней области тропосферы. Тропосфера — это нижний слой атмосферы Земли. Ее верхняя граница находится на высоте примерно 10...12 км. В тропосфере всегда есть локальные объемные неоднородности, обусловленные различными физическими процессами. Радиоволны диапазона 0,3...5,0 ГГц способны рассеиваться этими неоднородностями. Поскольку неоднородности находятся на значительной высоте, рассеянные ими радиоволны могут распространяться на сотни километров. Это дает возможность расположить радиорелейные станции на расстоянии 200...400 км друг от друга, что значительно больше расстояния прямой видимости. Такие линии строятся, как правило, в труднодоступных и удаленных районах страны, где сложно и дорого строить РРЛ прямой видимости.

Разновидностью радиорелейных линий являются также *спутниковые радиолинии*. Радиосигналы с наземной передающей станции излучаются в направлении искусственного спутника Земли (ИСЗ), принимаются им, усиливаются и передаются с помощью радиопередатчика в направлении наземной станции приема. Радиотехническое оборудование ИСЗ выполняет функцию промежуточной станции радиорелейной линии, находящейся на большой высоте.

*Проводная связь* — это связь, в которой сигналы распространяются вдоль специальной, искусственно созданной непрерывной среды. Проводные линии, образованные проводами, имеющими изоляционные покрытия и помещенными в специальные защитные оболочки, называются *кабельными линиями связи*. Сегодня они являются основным типом проводных линий.

В зависимости от конструкции и взаимного расположения проводников различают симметричные и коаксиальные кабели. Основными элементами

ми кабелей являются токопроводящие жилы, образующие электрическую цепь. В симметричных кабелях цепи образуются с помощью одинаковых по конструкции изолированных проводников. Электрические цепи в коаксиальных кабелях образуются двумя цилиндрическими проводниками с совмещенными осями, при этом один проводник (сплошной) расположен внутри другого (полого).

К проводным относятся также линии, использующие в качестве среды распространения сигналов диэлектрические материалы, в частности тонкие стеклянные волокна. Такие линии получили название *волоконно-оптических линий связи* (ВОЛС). По ВОЛС можно организовать передачу до 1 млн телефонных сигналов одновременно. Внешне оптические кабели мало отличаются от кабелей связи, однако вместо токопроводящих металлических жил в них применяются тонкие (диаметром 125...150 мкм) двухслойные стеклянные волокна-световоды. Именно они являются средой, по которой передаются сигналы электросвязи в оптическом диапазоне частот ( $10^{11}$ ... $10^{15}$  Гц).

Сигнал (луч) распространяется по внутреннему слою волокна за счет последовательного и полного отражения от границы раздела диэлектрических слоев. В оптическом кабеле стекловолокна свободно размещаются внутри полиэтиленовых трубок, скрученных вокруг прочного пластмассового сердечника. Оптические кабели, как и обычные, имеют защитные полиэтиленовые оболочки и различные внешние покровы. Их можно прокладывать в земле и воде. Они не чувствительны к электромагнитным помехам и поэтому не нуждаются в металлических экранах. Существенным достоинством волоконно-оптических линий является отсутствие в их конструкции дефицитных материалов: меди, алюминия и др.

По характеру передаваемых сообщений электросвязь подразделяется на следующие основные виды:

- телефонная связь и звуковое вещание;
- телеграфная связь, предназначенная для передачи буквенно-цифровых сообщений — телеграмм;
- факсимильная связь, при которой передается графическая информация: неподвижные изображения текста или таблиц, чертежей, схем, графиков, фотографий, факсимильных копий газет;
- передача данных — вид электросвязи, обеспечивающий передачу данных, под которыми понимаются сведения, являющиеся объектом обработки на ЭВМ;
- видеотелефонная связь и телевизионное вещание, обеспечивающие одновременную передачу оптических и звуковых сообщений. Видеотелефонная связь обеспечивает двустороннюю передачу индивидуальных сообщений, позволяя вести переговоры, при которых собеседники видят друг друга, а телевизионное вещание — одностороннюю передачу массовых сообщений.

Системы электросвязи, в которых в результате прямого преобразования сообщений получается непрерывный (аналоговый) сигнал, называются *аналоговыми* системами. Системы телефонной, факсимильной,

видеотелефонной связи, звукового и телевизионного вещания относятся к непрерывным системам. Системы телеграфной связи и передачи данных являются системами передачи *дискретных* сигналов.

В системах передачи дискретных сообщений используется кодовый метод преобразования сообщения в сигнал и обратно. Суть данного метода заключается в том, что знаки сообщения при передаче заменяются кодовыми комбинациями, составляемыми из определенных элементов. При этом каждому знаку сообщения соответствует своя комбинация. Совокупность всех используемых комбинаций составляет телеграфный код. Старейшим и наиболее известным является код Морзе, комбинации которого состояются из двух различных элементов — точки и тире. Передача данных также осуществляется кодированной информацией. Основа работы любой ЭВМ — двоичный код, представляющий собой комбинацию нулей и единиц.

Процесс преобразования знаков сообщения в сигнал начинается с кодирования, в результате которого знаки заменяются кодовыми комбинациями. Затем элементы комбинации последовательно преобразуются в элементы сигнала, т. е. в импульсы тока. Эти функции выполняются специальными устройствами передающей части оконечного аппарата.

Приемник системы телеграфной связи выполняет обратное преобразование сигнала в сообщение. Вначале элементы сигнала поочередно принимаются, преобразуются в элементы кодовой комбинации и запоминаются. Затем осуществляется обратная кодированию операция, называемая декодированием. Процесс приема заканчивается записью знака на бумаге. Все перечисленные операции выполняются специальными устройствами приемной части оконечных телеграфных аппаратов.

Системы передачи данных не имеют принципиальных отличий от систем телеграфной связи. В них также используется кодовый метод преобразования сообщений в сигнал и обратно, поэтому процесс передачи сообщений и устройство передатчика и приемника такие же, как в системе телеграфной связи. Однако системы передачи данных способны передавать дискретные сообщения значительно быстрее и точнее, т. е. обеспечивать более высокую скорость и качество передачи сообщений. Они гарантируют заданную верность передачи при любой скорости передачи сообщений. Это достигается благодаря использованию дополнительных устройств повышения качества передачи сообщений, которые конструктивно объединяются с передатчиками и приемниками систем передачи данных.

Прогнозы показывают, что в XXI в. большая часть жителей Земли получит возможность мгновенно связываться друг с другом, получать, используя всемирную сеть Интернет, интересующую информацию из многочисленных банков данных, формируемых в разных странах, решать возникающие деловые проблемы, создавать локальные компьютерные и производственные сети связи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беглецов Н. Н. Электрические цепи и основы электроники : Руководство по выполнению базовых экспериментов / Н. Н. Беглецов, Ю. П. Галишиников, П. Н. Сенигов. — Челябинск : ООО «Учебная техника», 2006.
2. Прошин В. М. Электротехника / В. М. Прошин. — М. : Изд. центр «Академия», 2017.
3. Прошин В. М. Сборник задач по электротехнике / В. М. Прошин, Г. В. Ярочкина. — М. : Изд. центр «Академия», 2014.
4. Прошин В. М. Лабораторно-практические работы по электротехнике / В. М. Прошин. — М. : Изд. центр «Академия», 2014.
5. Прошин В. М. Рабочая тетрадь к лабораторно-практическим работам по электротехнике / В. М. Прошин. — М. : Изд. центр «Академия», 2014.
6. Прошин В. М. Электротехника для электротехнических профессий : Рабочая тетрадь / В. М. Прошин. — М. : Изд. центр «Академия», 2012.
7. Сенигов П. Н. Основы электромеханики : Руководство по выполнению базовых экспериментов / П. Н. Сенигов. — Челябинск : ИПЦ «Учебная техника», 2009.
8. Ярочкина Г. В. Контрольные материалы по электротехнике / Г. В. Ярочкина. — М. : Изд. центр «Академия», 2013.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Краткая история электротехники.....	4
Работа с электроустановками.....	5
Роль электротехники в развитии научно-технического прогресса .....	6
<b>Глава 1. Электрические цепи постоянного тока .....</b>	<b>9</b>
1.1. Физика электрического тока. Основные электрические величины и их единицы измерения .....	9
Теория.....	9
Практика .....	14
Контрольные тесты .....	17
1.2. Источники электрической энергии. Электрическая цепь. Законы электротехники .....	18
Теория.....	18
1.2.1. Виды источников электрической энергии .....	18
1.2.2. Понятие электрической цепи.....	20
1.2.3. Основные законы электротехники .....	22
Практика .....	24
Контрольные тесты .....	28
1.3. Схемы включения приемников и источников электрической энергии .....	29
Теория.....	29
1.3.1. Способы соединения приемников электрической энергии .....	29
1.3.2. Способы соединения источников электрической энергии .....	32
Практика .....	34
Контрольные тесты .....	37
1.4. Режимы работы электрических цепей. Расчет проводов. Ответственная электрическая цепь.....	39
Теория.....	39
1.4.1. Режимы работы электрических цепей .....	39

1.4.2. Расчет проводов на потерю напряжения и на нагревание.....	40
1.4.3. Разветвленная электрическая цепь. Метод контурных токов.....	41
Практика .....	42
Контрольные тесты .....	44
1.5. Нелинейные электрические цепи .....	45
Теория .....	45
1.5.1. Виды вольт-амперных характеристик нелинейных элементов .....	45
1.5.2. Последовательное соединение нелинейных элементов .....	46
1.5.3. Параллельное соединение нелинейных элементов .....	47
Практика .....	48
Контрольные тесты .....	54
Лабораторная работа № 1. Измерение напряжения, силы тока, мощности и сопротивления в электрических цепях постоянного тока.....	54
Лабораторная работа № 2. Испытания электрической цепи постоянного тока при последовательном соединении приемников электрической энергии.....	59
Лабораторная работа № 3. Испытания электрической цепи постоянного тока при смешанном соединении приемников электрической энергии .....	63
Лабораторная работа № 4. Испытания нелинейных электрических цепей постоянного тока .....	67
<b>Глава 2. Электрические цепи переменного тока .....</b>	<b>73</b>
2.1. Понятие электрических цепей переменного тока. Векторные диаграммы. Понятие емкостного и индуктивного сопротивлений.....	73
Теория .....	73
2.1.1. Основные понятия и определения .....	73
2.1.2. Векторные диаграммы.....	75
2.1.3. Емкость .....	76
2.1.4. Индуктивность .....	79
Практика .....	80
Контрольные тесты .....	83
2.2. Электрические цепи переменного тока с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью.....	84
Теория.....	84
2.2.1. Цепь с активным сопротивлением .....	84



2.2.2. Цепь с индуктивностью .....	85
2.2.3. Цепь с индуктивностью и активным сопротивлением .....	86
2.2.4. Цепь с емкостью .....	87
2.2.5. Цепь с емкостью и активным сопротивлением .....	88
Практика .....	89
Контрольные тесты .....	91
2.3. Электрическая цепь переменного тока с последовательным включением конденсатора и катушки индуктивности. Резонанс напряжений .....	93
Теория .....	93
2.3.1. Колебательный контур .....	93
2.3.2. Последовательное включение катушки индуктивности и конденсатора .....	94
2.3.3. Резонанс напряжений .....	94
Практика .....	96
Контрольные тесты .....	99
2.4. Электрическая цепь переменного тока с параллельным включением конденсатора и катушки индуктивности. Резонанс токов. Пути повышения коэффициента мощности .....	100
Теория .....	100
2.4.1. Понятие проводимостей на переменном токе .....	100
2.4.2. Резонанс токов .....	101
2.4.3. Пути повышения коэффициента мощности .....	102
Практика .....	103
Контрольные тесты .....	106
Лабораторная работа № 5. Исследование электрической цепи с последовательным соединением катушки индуктивности и конденсатора при синусоидальных напряжениях .....	107
Лабораторная работа № 6. Исследования электрической цепи с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора при синусоидальных напряжениях .....	112
<b>Глава 3. Трехфазные электрические цепи .....</b>	<b>118</b>
3.1. Основные понятия и определения. Способы соединения фаз источников и приемников электрической энергии .....	118
Теория .....	118
3.1.1. Основные понятия и определения .....	118
3.1.2. Способы соединения фаз источника .....	119
3.1.3. Виды нагрузок. Соединение фаз нагрузки треугольником .....	122
Практика .....	124
Контрольные тесты .....	126

3.2. Соединение фаз нагрузки звездой. Мощность трехфазной электрической цепи. Методы расчета трехфазных электрических цепей.....	127
Теория.....	127
3.2.1. Симметричная нагрузка, включенная звездой.....	127
3.2.2. Несимметричная нагрузка, включенная звездой. Роль нейтрального провода.....	128
3.2.3. Мощность трехфазной электрической цепи и методы ее измерения.....	129
3.2.4. Методы расчета трехфазных электрических цепей.....	130
Практика.....	133
Контрольные тесты.....	136
Лабораторная работа № 7. Исследование трехфазной электрической цепи при активной нагрузке однофазных приемников, соединенных звездой.....	137
Лабораторная работа № 8. Исследование трехфазной электрической цепи при активно-реактивной нагрузке однофазных приемников, соединенных звездой.....	142
Лабораторная работа № 9. Исследование трехфазной электрической цепи при активной нагрузке однофазных приемников, соединенных треугольником.....	147
Лабораторная работа № 10. Исследование аварийных режимов работы трехфазных электрических цепей.....	152
<b>Глава 4. Магнитные цепи.....</b>	<b>159</b>
4.1. Общие сведения о магнитном поле.....	159
Теория.....	159
4.1.1. Индукционное и силовое действия магнитного поля.....	159
4.1.2. Основные характеристики магнитного поля.....	160
4.1.3. Физика ферромагнитных материалов.....	161
Практика.....	163
Контрольные тесты.....	165
4.2. Понятие магнитной цепи. Аналогия между магнитными и электрическими цепями. Электромагнитные устройства.....	166
Теория.....	166
4.2.1. Понятие магнитной цепи. Закон полного тока.....	166
4.2.2. Аналогия между магнитными и электрическими цепями.....	167
4.2.3. Электромагнитные устройства.....	169
Практика.....	172
Контрольные тесты.....	175

4.3.	Расчет магнитных цепей. Магнитные цепи переменного тока .....	176
	Теория .....	176
4.3.1.	Расчет магнитных цепей постоянного тока .....	176
4.3.2.	Магнитные цепи переменного тока. Магнитные потери .....	178
	Практика .....	180
	Контрольные тесты .....	184
	Лабораторная работа № 11. Исследование магнитной цепи постоянного тока .....	185
	Лабораторная работа № 12. Исследование магнитной цепи переменного тока .....	189
<b>Глава 5.</b>	<b>Электрические измерения</b> .....	<b>195</b>
5.1.	Основные характеристики и конструктивные элементы электромеханических измерительных приборов.....	195
	Теория.....	195
5.1.1.	Основные понятия и определения .....	195
5.1.2.	Основные характеристики электроизмерительных приборов .....	197
5.1.3.	Конструктивные элементы электромеханических измерительных приборов .....	199
	Практика .....	201
	Контрольные тесты .....	203
5.2.	Конструктивные схемы и принцип действия электромеханических измерительных приборов.....	204
	Теория.....	204
5.2.1.	Магнитоэлектрические приборы .....	204
5.2.2.	Электромагнитные приборы .....	207
5.2.3.	Электродинамические приборы .....	208
5.2.4.	Индукционные приборы .....	210
5.2.5.	Самопишущие и регистрирующие приборы .....	211
	Практика .....	212
	Контрольные тесты .....	214
5.3.	Электронные измерительные приборы .....	216
	Теория.....	216
5.3.1.	Особенности электронных измерительных приборов... ..	216
5.3.2.	Электронно-лучевой осциллограф.....	217
5.3.3.	Электронный вольтметр.....	220
5.3.4.	Электронный измерительный генератор .....	222
5.3.5.	Мультиметры.....	223

Практика .....	224
Контрольные тесты .....	225
5.4. Измерение электрических и неэлектрических величин.....	226
Теория .....	226
5.4.1. Измерение напряжения .....	226
5.4.2. Измерение тока.....	228
5.4.3. Измерение мощности .....	228
5.4.4. Измерение сопротивления .....	229
5.4.5. Измерение неэлектрических величин.....	230
Практика .....	231
Контрольные тесты .....	234
Лабораторная работа № 13. Изучение электронной измерительной аппаратуры .....	235
<b>Глава 6. Основы промышленной электроники .....</b>	<b>241</b>
6.1. Линейные и нелинейные элементы промышленной электроники.....	241
Теория .....	241
6.1.1. Общие сведения.....	241
6.1.2. Линейные элементы промышленной электроники .....	241
6.1.3. Физика проводимости полупроводников .....	245
6.1.4. Приборы на основе полупроводников <i>n</i> - и <i>p</i> -типа .....	246
6.1.5. Свойство электронно-дырочного перехода.....	247
6.1.6. Диоды.....	248
6.1.7. Полевые транзисторы.....	251
6.1.8. Биполярные транзисторы .....	253
6.1.9. Тиристоры .....	257
6.1.10. Интегральные микросхемы .....	258
Контрольные тесты .....	259
6.2. Выпрямительные устройства .....	261
Теория .....	261
6.2.1. Состав и назначение элементов выпрямительного устройства.....	261
6.2.2. Однополупериодный однофазный выпрямитель.....	263
6.2.3. Двухполупериодные однофазные выпрямители .....	263
6.2.4. Схемы трехфазных выпрямителей .....	265
6.2.5. Сглаживающие фильтры .....	267
6.2.6. Инверторы .....	268
6.2.7. Стабилизаторы постоянного напряжения.....	269
Практика .....	272
Контрольные тесты .....	276

6.3. Усилительные устройства .....	278
Теория .....	278
6.3.1. Назначение и классификация усилителей .....	278
6.3.2. Параметры и характеристики усилителя.....	279
6.3.3. Принцип и режимы работы усилителя.....	280
6.3.4. Обратная связь в усилителях.....	282
6.3.5. Принцип термостабилизации .....	284
6.3.6. Многокаскадные усилители напряжения.....	285
6.3.7. Операционные усилители.....	288
6.3.8. Усилители мощности.....	290
Практика .....	292
Контрольные тесты .....	294
6.4. Электронные генераторы .....	295
Теория.....	295
6.4.1. Классификация электронных генераторов .....	295
6.4.2. LC-генераторы синусоидальных колебаний.....	296
6.4.3. RC-генераторы синусоидальных колебаний .....	297
6.4.4. Релаксационные генераторы.....	298
6.4.5. Мультивибратор .....	300
6.4.6. Триггер.....	301
Практика .....	302
Контрольные тесты .....	304
Лабораторная работа № 14. Испытания выпрямителей.....	305
Лабораторная работа № 15. Испытания двухкаскадного тран- зисторного усилителя .....	310
Лабораторная работа № 16. Испытания стабилизаторов по- стоянного напряжения.....	316
<b>Глава 7. Электрические машины .....</b>	<b>323</b>
7.1. Общие сведения об электрических машинах. Конструкция и принцип действия трансформаторов .....	323
Теория.....	323
7.1.1. Основные понятия и определения .....	323
7.1.2. Принципы, положенные в основу работы электрических машин.....	324
7.1.3. Назначение, конструктивная схема и принцип действия трансформатора.....	325
Практика .....	329
Контрольные тесты .....	331
7.2. Характеристики трансформатора. Трансформаторы специ- ального назначения.....	333

Теория.....	333
7.2.1. Уравнения напряжений и коэффициент трансформации .....	333
7.2.2. Потери мощности и КПД трансформатора .....	335
7.2.3. Внешняя характеристика трансформатора .....	336
7.2.4. Трехфазные трансформаторы.....	337
7.2.5. Автотрансформатор.....	339
7.2.6. Измерительные трансформаторы .....	340
7.2.7. Сварочный трансформатор .....	341
Практика .....	342
Контрольные тесты .....	344
7.3. Принцип работы, конструкция и характеристики асинхронного двигателя .....	346
Теория.....	346
7.3.1. Принцип создания вращающегося магнитного поля .....	346
7.3.2. Конструкция асинхронной машины .....	347
7.3.3. Принцип работы трехфазного асинхронного двигателя .....	349
7.3.4. Механическая и рабочие характеристики асинхронного двигателя.....	351
7.3.5. Потери в асинхронной машине. Энергетическая диаграмма.....	352
Практика .....	353
Контрольные тесты .....	355
7.4. Пуск и регулирование частоты вращения асинхронного двигателя. Однофазные и универсальные асинхронные двигатели.....	357
Теория.....	357
7.4.1. Реверсирование и схемы пуска трехфазного асинхронного двигателя.....	357
7.4.2. Регулирование частоты вращения трехфазного асинхронного двигателя.....	359
7.4.3. Однофазные асинхронные двигатели .....	360
7.4.4. Универсальные асинхронные двигатели.....	363
Практика .....	364
Контрольные тесты .....	364
7.5. Синхронные машины .....	365
Теория.....	365
7.5.1. Конструкция синхронной машины .....	365
7.5.2. Принцип действия синхронной машины при работе в режиме двигателя .....	367

7.5.3. Принцип действия синхронной машины при работе в режиме генератора.....	368
7.5.4. Особенности пуска синхронного двигателя.....	368
7.5.5. Синхронные машины малой мощности.....	370
Практика .....	371
Контрольные тесты .....	371
7.6. Общие сведения о машинах постоянного тока. Генератор постоянного тока.....	373
Теория.....	373
7.6.1. Принцип получения постоянной ЭДС.....	373
7.6.2. Конструкция и принцип действия машины постоянного тока .....	374
7.6.3. ЭДС и электромагнитный момент машины постоянного тока .....	375
7.6.4. Способы возбуждения машин постоянного тока .....	375
7.6.5. Работа машины постоянного тока в режиме генератора.....	377
7.6.6. Характеристика холостого хода генератора.....	378
7.6.7. Внешняя характеристика генератора.....	379
Практика .....	379
Контрольные тесты .....	382
7.7. Двигатель постоянного тока .....	383
Теория.....	383
7.7.1. Работа машины постоянного тока в режиме двигателя .....	383
7.7.2. Регулирование частоты вращения двигателя.....	385
7.7.3. Пуск двигателя и роль пускового реостата .....	386
7.7.4. Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением.....	387
7.7.5. Универсальные коллекторные двигатели.....	388
Практика .....	389
Контрольные тесты .....	390
Зачетное практическое занятие по разделу «Электрические машины». Сравнительная оценка основных типов электрических машин.....	392
Лабораторная работа № 17. Испытания однофазного трансформатора.....	394
Лабораторная работа № 18. Испытания генератора постоянного тока.....	398
Лабораторная работа № 19. Испытания двигателя постоянного тока .....	404

Лабораторная работа № 20. Испытания трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором .....	410
<b>Глава 8. Производство и распределение электрической энергии.....</b>	<b>416</b>
8.1. Производство электроэнергии .....	416
Теория .....	416
8.1.1. Традиционные источники электрической энергии.....	416
8.1.2. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии .....	418
Контрольные тесты .....	420
8.2. Передача и распределение электроэнергии.....	422
Теория .....	422
8.2.1. Передача электрической энергии .....	422
8.2.2. Распределение электрической энергии.....	424
Контрольные тесты .....	426
Приложения .....	428
1. Общие указания к выполнению лабораторных работ по электрическим и магнитным цепям и основам электроники.....	428
2. Общие сведения о стенде для выполнения лабораторных работ по электрическим машинам .....	433
3. Основные электрические величины.....	434
4. Обозначение кратных и дольных единиц измерения.....	437
5. Удельное электрическое сопротивление и температурный коэффициент сопротивления основных электротехнических материалов.....	437
6. Среднее значение относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon$ основных электротехнических материалов.....	438
7. Условные графические изображения элементов электрической цепи .....	438
8. Общие сведения о заземлении .....	438
9. Общие сведения об электрической связи.....	441
Список литературы .....	445



*Учебное издание*

**Прошин Владимир Михайлович**

**Электротехника для неэлектротехнических профессий**

**Учебник**

2-е издание, стереотипное

Редактор *Е. М. Зубкович*

Компьютерная верстка: *Д. В. Федотов*

Корректор *Н. В. Савельева*

Изд. № 102119174. Подписано в печать 11.10.2017. Формат 60 × 90/16.  
Гарнитура «Ballisa». Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 29,0.  
Тираж 2000 экз. Заказ № 40844.

ООО «Издательский центр «Академия». [www.academia-moscow.ru](http://www.academia-moscow.ru)  
129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1.  
Тел./факс: (495)648-0507, 616-0029.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU.АД44.Н01603 от 31.05.2017.

Отпечатано в соответствии с качеством предоставленных издательством  
электронных носителей в АО «Саратовский полиграфкомбинат».  
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59. [www.sarpk.ru](http://www.sarpk.ru)

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
ДЛЯ НЕЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ  
ПРОФЕССИЙ**

ISBN 978-5-4468-6158-3



**Издательский центр «Академия»**  
[www.academia-moscow.ru](http://www.academia-moscow.ru)