НАЧАЛЬНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

В. М. ПРОШИН

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Учебник

Рекомендовано Федеральным государственным учреждением «Федеральный институт развития образования» в качестве учебника для использования в учебном процессе образовательных учреждений, реализующих программы начального профессионального образования

Регистрационный номер рецензии 427 от 2 июля 2009 г.
ФГУ «ФИРО»

4-е издание, стереотипное

ACADEMIA

Москва
Издательский центр «Академия»
2013

УДК 621.3(075.32)
ББК 31.2я722
П847

Р е ц е н з е н т ы:

преподаватель ГОУ СПО «Политехнический колледж № 13» *С. В. Чубуков*;
заместитель директора Колледжа Автоматизации и радиоэлектроники № 27
им. П. М. Вострухина *В. П. Петров*

Прошин В. М.

П847 Электротехника : учебник для учреждений нач. проф. образования / В. М. Прошин. — 4-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 288 с.

ISBN 978-5-4468-0024-7

Учебник является частью учебно-методического комплекта по дисциплине ОП «Электротехника».

Изложены базовые материалы по всем основным разделам электротехники: электрические и магнитные цепи постоянного и переменного токов, электрические измерения, основы промышленной электроники, электрические машины, производство и распределение электрической энергии. Все главы представляют собой 50 логически завершенных двухчасовых тем. В 24 приложениях приведены примеры расчетов электрических схем, электромагнитных и электронных устройств по всем указанным темам.

Учебник может быть использован при изучении общепрофессиональной дисциплины «Электротехника» в соответствии с ФГОС НПО для профессий технического профиля. Для учащихся учреждений начального 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., 2010
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2010
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2010

ISBN 978-5-4468-0024-7

Уважаемый читатель!

Данный учебник является частью учебно-методического комплекта по профессиям технического профиля.

Учебник предназначен для изучения общепрофессиональной дисциплины ОП. «Электротехника».

Учебно-методические комплекты нового поколения включают традиционные и инновационные учебные материалы, позволяющие обеспечить изучение общеобразовательных и общепрофессиональных дисциплин и профессиональных модулей. Каждый комплект содержит учебники и учебные пособия, средства обучения и контроля, необходимые для освоения общих и профессиональных компетенций, в том числе и с учетом требований работодателя.

Учебные издания дополняются электронными образовательными ресурсами. Электронные ресурсы содержат теоретические и практические модули с интерактивными упражнениями и тренажерами, мультимедийные объекты, ссылки на дополнительные материалы и ресурсы в Интернете. В них включен терминологический словарь и электронный журнал, в котором фиксируются основные параметры учебного процесса: время работы, результат выполнения контрольных и практических заданий. Электронные ресурсы легко встраиваются в учебный процесс и могут быть адаптированы к различным учебным программам.

Учебно-методический комплект разработан на основании Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования с учетом его профиля.

Введение

Казалось бы, зачем электротехника слесарю механосборочных работ или строителю, станочнику широкого профиля или технологу, механику или автослесарю? А разве слесарь не использует в своей производственной деятельности, например, электродрель? Разве строитель не пользуется циклевочной машиной, электрорубанком, подъемным механизмом? Не будем уж говорить о станочнике, который сегодня имеет дело не только с целым рядом электродвигателей и коммутационных устройств, но и с цифровыми устройствами, в том числе с микропроцессором.

Чтобы стать хорошим специалистом в своей области и к тому же не получить «удара в спину» от «обиженной» электроустановки, вам необходимо знать основные законы, которые положены в основу работы самых различных электротехнических устройств, представлять их конструкцию, принцип действия, основные характеристики, методы испытаний, области применения и, наконец, алгоритмы их расчета. Этими устройствами и установками могут быть электрическая система освещения и вентиляции, электроинструмент, система контроля и измерений, электромагнитное реле или электрический двигатель, электронный усилитель или цифровое устройство.

Все эти знания дает нам дисциплина «Электротехника», к изучению которой мы приступаем.

Краткая история и перспективы развития электротехники

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

Она сравнительно молода, и годом ее основания принято считать 1802 г., когда академик В. В. Петров открыл и исследовал явление электрической дуги, а также возможность его применения для освещения, сварки и плавления. 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 законы, названные его именем, *позволяющие рассчитывать сложные электрические цепи*;

1872 г. — А. Г. Столетов снял кривую намагничивания железа $B(H)$, положив 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 — основной *приводной двигатель любого металлорежущего станка*;

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

Все последующие открытия и изобретения были направлены на создание практически действующих источников и приемников электрической энергии, являющихся основными элементами электротехнических установок. Сегодня Россия производит на гидравлических, тепловых, атомных и других электростанциях около 900 млрд кВт · ч электроэнергии в год — почти 7 % мирового производства. Бóльшая часть ее (68 %) вырабатывается на тепловых электростанциях, но в отличие от мировой практики лишь 16 % (в два раза меньше) — за счет сжигания угля. 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, перспектива развития производства электроэнергии — перевод существующих тепловых электростанций на твердое топливо — уголь.

Следующий этап — это увеличение доли производимой электроэнергии на атомных электростанциях с 13 до 25 % к 2020 г.

Наконец, 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.

В перспективе использование и других возобновляемых источников энергии: солнечной, геотермальной, энергии ветра, приливов и др.

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 мощностью. Все чаще покупаем, хотя и дорогие, но энергосберегающие электролампы — окупятся. Аналогично и в производстве: замена старого оборудования и технологий на современные энергосберегающие 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.

И, конечно же, одна из основных задач России — подняться по потреблению электроэнергии на душу населения с 17 места в мире на одно из первых.

Преимущества электрической энергии перед другими видами энергии очевидны:

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

Важно и то, что на ее основе могут создаваться автоматические системы управления самыми различными технологическими процессами и техническими объектами.

Вопросы техники безопасности

У электрической энергии есть лишь один недостаток — ее опасность для жизни человека.

Электрический ток по воздействию на человека можно условно подразделить на три вида:

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

Перечисленное относится к переменному току промышленной частоты (50 Гц). Повышение частоты снижает опасность поражения, так как ток вытесняется на поверхность тела. Постоянный ток менее опасен (в 4—5 раз).

Если учесть, что номинальное сопротивление тела человека $R_ч$ около 3 000 Ом, то при стандартном промышленном напряжении $U = 220$ В сила тока в соответствии с законом Ома $I = U/R_ч = 220/3\,000 = 0{,}073 = 73$ мА, а при напряжении 380 В — $I = 127$ мА. Как мы отметили ранее, эти значения тока, а следовательно, и напряжения смертельны для человека.

Можно ли снизить опасность поражения электрическим током? Можно, если принять меры к увеличению сопротивления ветви, по которой течет ток. Так, если человек стоит на резиновом коврике, который лежит на деревянном сухом полу с общим сопротивлением $R_к + R_п = 150\,000$ Ом, то даже при напряжении 380 В сила тока $I = U/(R_ч + R_к + R_п) = 2{,}5$ мА, что может вызвать лишь раздражение.

Одним из путей повышения электробезопасности при работе с электроустановками является применение изолирующих ковриков, подставок, резиновых рукавиц и бот, штанг, инструмента с изолированными ручками и т. д.

Другой путь — это заземление элементов оборудования, к которым может прикасаться человек, и которые в нормальном состоянии не находятся под напряжением. В этом случае 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 проходит небольшой ток, безопасный для его здоровья.

Все токоведущие части должны быть защищены соответствующими кожухами и ограждениями.

Наиболее действенным способом защиты от воздействия электрического тока является максимально быстрое отключение его 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) — быстродействующий автоматический выключатель. Он предназначается для защиты людей и имущества 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. Соединенные Штаты Америки, которые сегодня производят электроэнергии больше, чем любая другая страна в мире, в том числе в три с лишним раза больше, чем Россия, являются наиболее технически развитой страной в мире. Китай за последние 10 лет практически удвоил производство электроэнергии и вышел на второе место после США. Это привело к невероятно быстрому росту экономики Китая, резкому повышению производительности труда и снижению себестоимости продукции.

Развитие научно-технического прогресса в свою очередь содействует росту электроэнергетики, созданию безопасных атомных электростанций (АЭС), уменьшению выбросов в атмосферу отходов тепловых электростанций (ТЭС), снижению потерь при передаче электроэнергии на значительные расстояния, сокращению расходов на производство электроэнергии и снижению ее себестоимости, созданию энергосберегающих технологий, установок, электроаппаратов и электрооборудования.

Принятый план электрификации России вплоть до 2020 г. — это по существу новый план ГОЭЛРО. Он предусматривает уве-

личение 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.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что изучает электротехника?
2. Назовите основные вехи в развитии электротехники.
3. Перечислите преимущества электрической энергии.
4. Назовите пути повышения электробезопасности при работе с электроустановками.
5. Укажите перспективы развития энергетики в России.

Глава 1

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

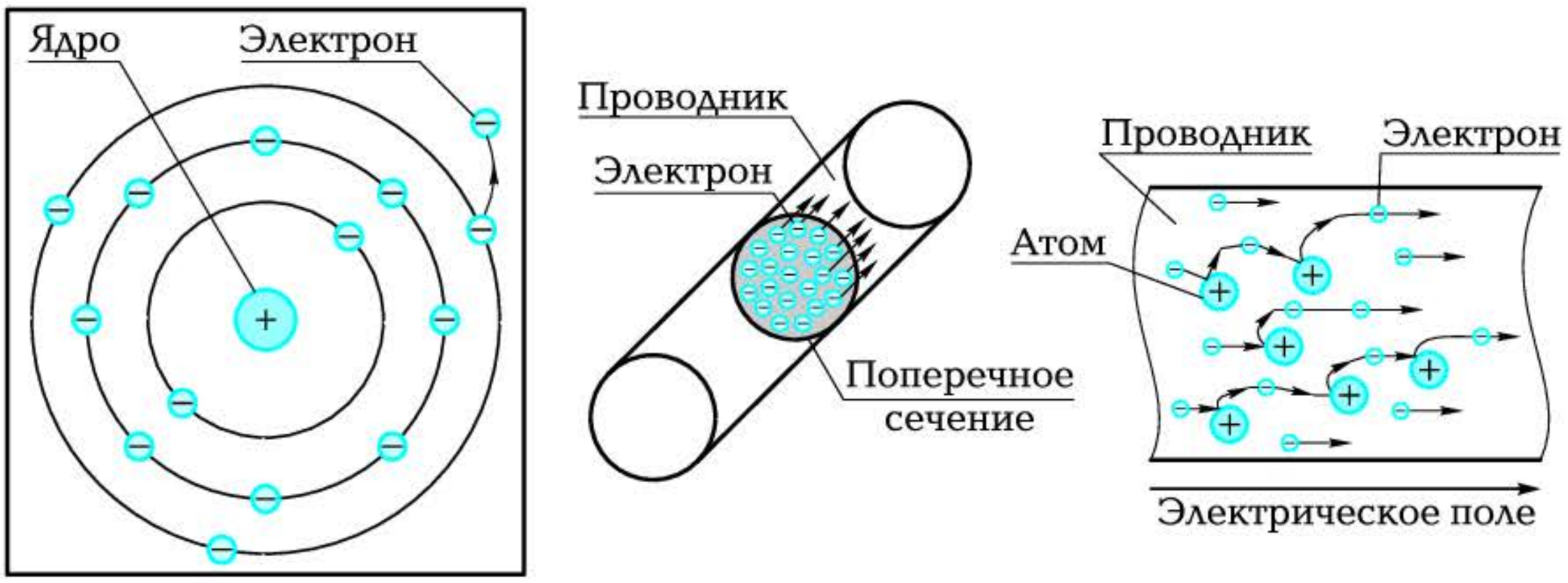
1.1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

1.1.1. Физика электрического тока

Основа всей электротехники — постоянный ток. Усвоив основные понятия и законы постоянного тока, методы расчета электрических и магнитных цепей, несложно понять все остальное в области электротехники.

Итак, что же такое электрический ток? Все тела состоят из атомов. Атом состоит из ядра и электронов. Электроны вращаются вокруг ядра на различных орбитах, одни из которых ближе к ядру, другие дальше (рис. 1.1, *а*). Электротехнику интересуют электроны, вращающиеся на дальних (внешних) орбитах, которые имеют наименьшую связь с ядром и способны покидать атом, становясь свободными. Если эти свободные электроны заставить организованно двигаться под действием внешней энергии, то появится электрический ток.

Итак, в проводнике *электрический ток* — это направленное движение электронов. В действительности — это их дрейф по проводнику с одного конца на другой под действием внешней энергии. Скорость дрейфа невелика (около 1 мм/с), однако распространение электрического взаимодействия осуществляется со скоростью, близкой к скорости света (300 000 км/с). Поэтому после включения лампочки накаливания в сеть все свободные электроны начинают двигаться одновременно и через лампочку течет ток, вызывая нагрев нити накаливания, который приводит к ее свечению. Электрическая энергия преобразуется в тепловую и световую.



а *б* *в*

Рис. 1.1. Физика электрического тока:

а — схема атома; *б* — электроны, проходящие через поперечное сечение проводника; *в* — схема, поясняющая понятие сопротивления

1.1.2. Понятия основных электрических величин

Под *силой электрического тока I* понимают количество электронов, прошедшее через поперечное сечение проводника в единицу времени.

Если за одну секунду через поперечное сечение проходит $6{,}28 \cdot 10^{18}$ электронов — один кулон (q = 1 Кл) электричества, то сила тока равна одному амперу (I = 1 А). На рис. 1.1, *б* через поперечное сечение проводника S проходит всего 20 электронов. Если принять, что ток равномерно распределяется по сечению проводника, то чем больше сила тока I, тем больше его плотность:

$$j = I/S,\ \text{А/мм}^2.$$

Электрон — отрицательно заряженная частица. Поскольку в природе все элементы имеют нейтральный заряд, то ядро должно содержать положительно заряженные частицы — протоны. Причем заряд протона по величине должен быть равен заряду электрона ($q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл). В то же время масса электрона почти в 2 000 раз меньше массы протона. Чем легче частица, тем меньшую энергию надо затратить на приведение ее в движение.

Чтобы заставить электроны двигаться (получить электрический ток), необходимо приложить энергию извне (например, создать электрическое поле). Каждая точка поля характеризуется *потенциалом*.

Напряжение U — это разность потенциалов между двумя точками поля. Она численно равна работе, которую затрачивает поле на перемещение заряда из одной точки в другую.

Под действием приложенной энергии новые электроны покидают орбиты и вместе с другими свободными электронами движутся в определенном направлении. Чем больше приложенная энергия (напряжение), тем больше освобождается электронов и тем больше электрический ток. Электроны несут энергию по проводнику и могут отдать ее потребителю (например, электрической лампе, электрокамину, электромагниту, электродвигателю). В этом случае энергия электрона, полученная от источника, преобразуется на потребителе в любой другой вид энергии: световую для лампы, тепловую для нагревателя, магнитную для электромагнита, механическую для электродвигателя и др.

Электродвижущая сила (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 ними, они отдают им часть своей энергии и заставляют их колебаться еще сильнее (рис. 1.1, *в*). Это ведет к нагреву проводника и потере части энергии. Если проводник нагревается, то атомы колеблются с еще большими амплитудой и частотой, электронам еще сложнее двигаться по проводнику. Следовательно, меньшее число электронов в единицу времени, т. е. меньшая сила тока, поступает к потребителю.

Сопротивление R проводника характеризует его способность препятствовать прохождению тока.

Оно определяется *удельным электрическим сопротивлением* материала ρ или *удельной электрической проводимостью* γ, длиной проводника l и его сечением S:

$$R = \rho l / S = l / \gamma S.$$

Сопротивление проводника зависит от температуры и может быть определено по формуле

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

где R_1 — сопротивление проводника при температуре T_1; α — температурный коэффициент сопротивления; $T_2 - T_1$ — диапазон изменения температур.

Значения ρ и α для различных материалов приводятся в справочной литературе. В приложении 2 даны значения ρ и α для некоторых материалов.

Определим, насколько отличаются сопротивления лампы накаливания в рабочем состоянии и в выключенном.

Пусть известно: мощность электрической лампочки $P = 60$ Вт; напряжение $U = 220$ В; материал нити накаливания — вольфрам; температура в рабочем состоянии $T_2 = 3\,000\,^\circ\text{C}$; температура в выключенном состоянии $T_1 = 20\,^\circ\text{C}$.

По справочнику: $\rho = 0{,}055$ Ом · мм^2/м, $\alpha = 0{,}0045$ 1/К.

Находим сопротивление лампы в рабочем состоянии:

$$R_2 = U^2/P = 806{,}7 \text{ Ом}.$$

Тогда в выключенном состоянии при $T_1 = 20\,^\circ\text{C}$ сопротивление лампы R_1 можно найти из выражения $R_2 = R_1[1 + \alpha\,(T_2 - T_1)]$. Получаем $R_1 = 56$ Ом. Таким образом, сопротивление лампы накаливания в рабочем состоянии более чем на порядок выше сопротивления в холодном состоянии.

А чему равны токи в рабочем и холодном состояниях?

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

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

Проводимостью G называется величина, обратная сопротивлению R:

$$G = 1/R.$$

Мощность P — это скорость, с которой совершается работа, 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

$$P = A/t = (U\,I\,t)/t = U\,I = U^2/R = I^2R.$$

В металлах (медь, алюминий, серебро, сталь и др.), угле и графите электрический ток создается движущимися электронами (рис. 1.2, *а*). Это проводники первого рода. В жидких проводниках и газах (проводниках второго рода) электрический ток создается за счет движения положительно и отрицательно заряженных

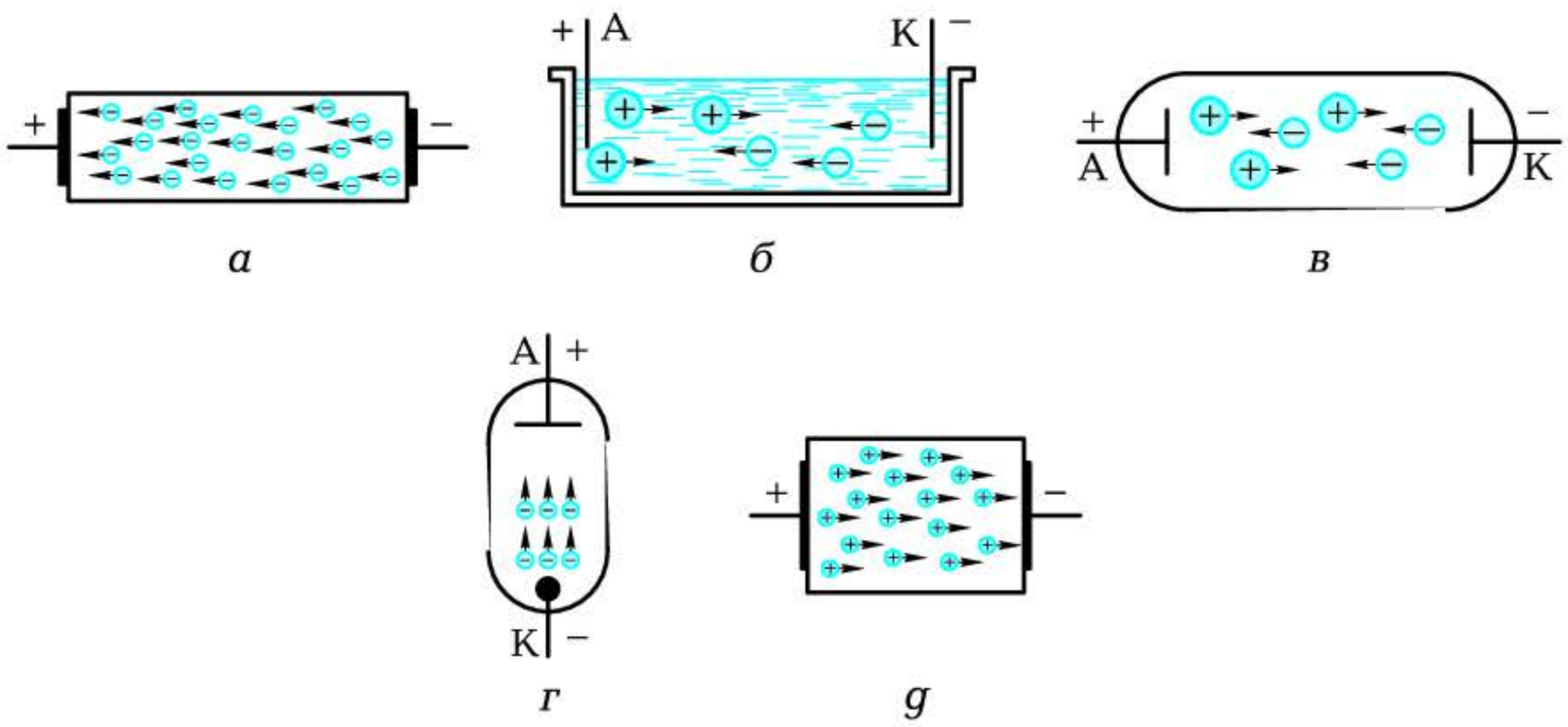


Рис. 1.2. Движение заряженных частиц:

а — электронов в металле; *б* — ионов в жидкости; *в* — ионов в газе; *г* — электронов в вакууме; *д* — дырок в полупроводнике типа *p*

ионов (рис. 1.2, *б*, *в*). В вакууме, например в электронной лампе, — за счет движения электронов с катода К на анод А (рис. 1.2, *г*). В полупроводниках (германий, кремний и др.) — за счет движения электронов или дырок в зависимости от типа полупроводника (рис. 1.2, *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).

Таким образом, с чисто физической точки зрения мы установили:

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

Сказанное ранее можно выразить в виде известной формулы Ома, если обозначить силу электрического тока через I, напряжение через U и сопротивление через R:

$$I = U/R.$$

1.1.3. Единицы измерения электрических величин

Единица измерения напряжения U — вольт (В). Кратные и дольные единицы: 1 мкВ = $1 \cdot 10^{-6}$ В = 0,000001 В; 1 мВ = $1 \cdot 10^{-3}$ В = = 0,001 В; 1 кВ = $1 \cdot 10^{3}$ В = 1 000 В; 1 МВ = $1 \cdot 10^{6}$ В = 1 000 000 В.

Сила тока I измеряется в амперах (А). Кратные и дольные единицы: 1 мкА = $1 \cdot 10^{-6}$ А = 0,000001 А; 1 мА = $1 \cdot 10^{-3}$ = 0,001 А; 1 кА = $1 \cdot 10^{3}$ А = 1 000 А, 1 МА = $1 \cdot 10^{6}$ А = 1 000 000 А.

Сопротивление R измеряется в омах (Ом). Кратные и дольные единицы: 1 мкОм = $1 \cdot 10^{-6}$ Ом = 0,000001 Ом; 1 мОм = $1 \cdot 10^{-3}$ Ом = = 0,001 Ом; 1 кОм = $1 \cdot 10^{3}$ Ом = 1 000 Ом; 1 МОм = $1 \cdot 10^{6}$ Ом = = 1 000 000 Ом.

Проводимость G измеряется в сименсах (См). Кратные и дольные единицы: 1 мкСм = $1 \cdot 10^{-6}$ См = 0,000001 См; 1 мСм = $1 \cdot 10^{-3}$ См = = 0,001 См; 1 кСм = $1 \cdot 10^{3}$ См = 1 000 См; 1 МСм = $1 \cdot 10^{6}$ См = = 1 000 000 См.

Работа А измеряется в джоулях (Дж). На практике часто работу измеряют в ватт-часах (Вт · ч): 1 Вт · ч = 3 600 Дж. Кратные единицы: 1 киловатт-час (кВт · ч) = $1 \cdot 10^{3}$ Вт · ч; 1 МВт · ч = $1 \cdot 10^{6}$ Вт · ч.

Мощность P измеряется в ваттах (Вт). Кратные единицы: 1 мкВт = $1 \cdot 10^{-6}$ Вт = 0,000001 Вт, 1 мВт = $1 \cdot 10^{-3}$ Вт = 0,001 Вт; 1 кВт = = $1 \cdot 10^{3}$ Вт = 1 000 Вт; 1 МВт = $1 \cdot 10^{6}$ Вт = 1 000 000 Вт.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое сила тока, напряжение, электродвижущая сила, сопротивление, проводимость, мощность?
2. Назовите единицы измерения указанных параметров.
3. Объясните закон Ома с физической точки зрения.

1.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ. ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

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. впервые использовал батарею из 4 200 медных и цинковых пластин, соединенных последовательно, для исследования электрической дуги. При этом общая ЭДС равнялась почти 1 700 В. По имени Л. Гальвани, открывшего воздействие электрического тока на живой организм, они были названы гальваническими элементами. До сих пор эти источники широко применяются в виде известных батареек в часах, плеерах, детских игрушках, фонарях и др. (рис. 1.3).

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,

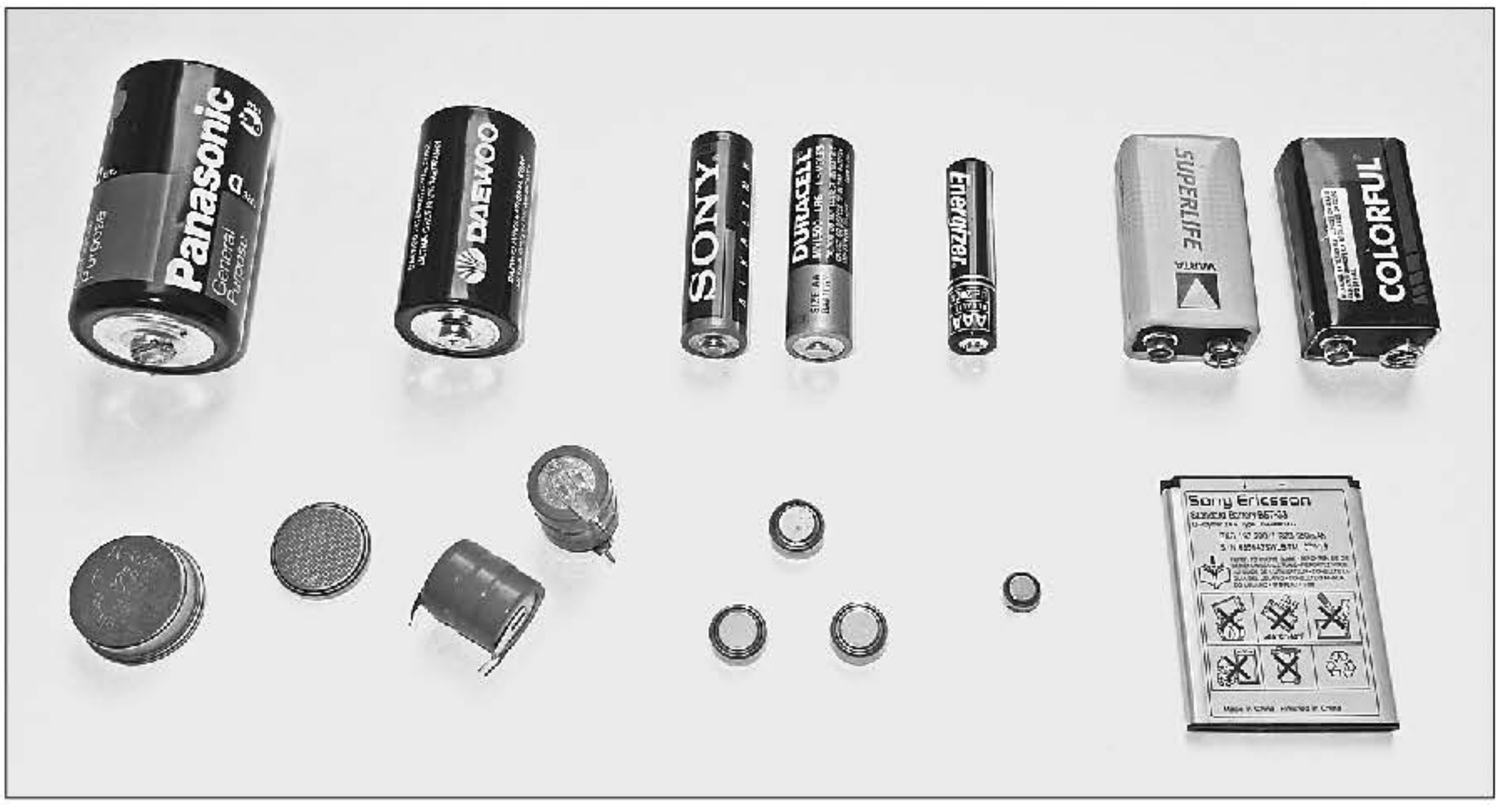


Рис. 1.3. Гальванические источники

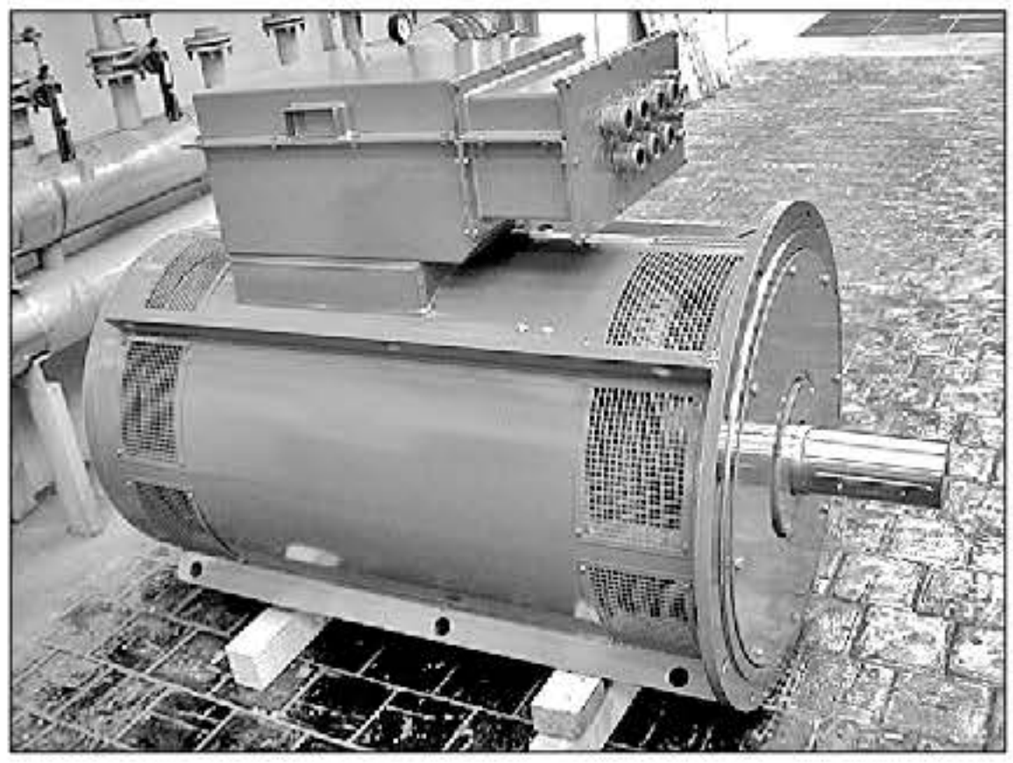


Рис. 1.4. Электромашинный генератор мощностью 4 МВт

весу, стоимости и отсутствию каких-либо пульсаций, что свойственно другим источникам питания.

Электромашинные генераторы постоянного и переменного тока, приводимые в действие, например, паро- или гидротурбинами, используют явление электромагнитной индукции. Они являются сегодня основными источниками питания в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте и в быту. Это источники огромной мощности (рис. 1.4).

Фотоэлектрические 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 солнечной энергии в процессе эксплуатации.

Источник термоЭДС, преобразующий тепловую энергию в электрическую с помощью двух разнородных проводников, спаянных одним концом, — 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.

Источником электрической энергии могут служить также *пьезоэлектрические преобразователи*, вырабатывающие пьезоЭДС при деформации некоторых материалов, например керамики титаната бария или метаниобата бария и свинца. 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 замкнутый путь.

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

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

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

На рис. 1.5 приведена простейшая электрическая цепь, состоящая из источника *E* (гальванический элемент), проводов, выключателя *B*, предохранителя *Пр*, измерительных приборов (миллиамперметра *mA* и вольтметра *V*) и нагрузки в виде переменного резистора *R*, лампочки *Л* и электромагнитного реле *P*, а на рис. 1.6 — ее эквивалентная схема замещения.

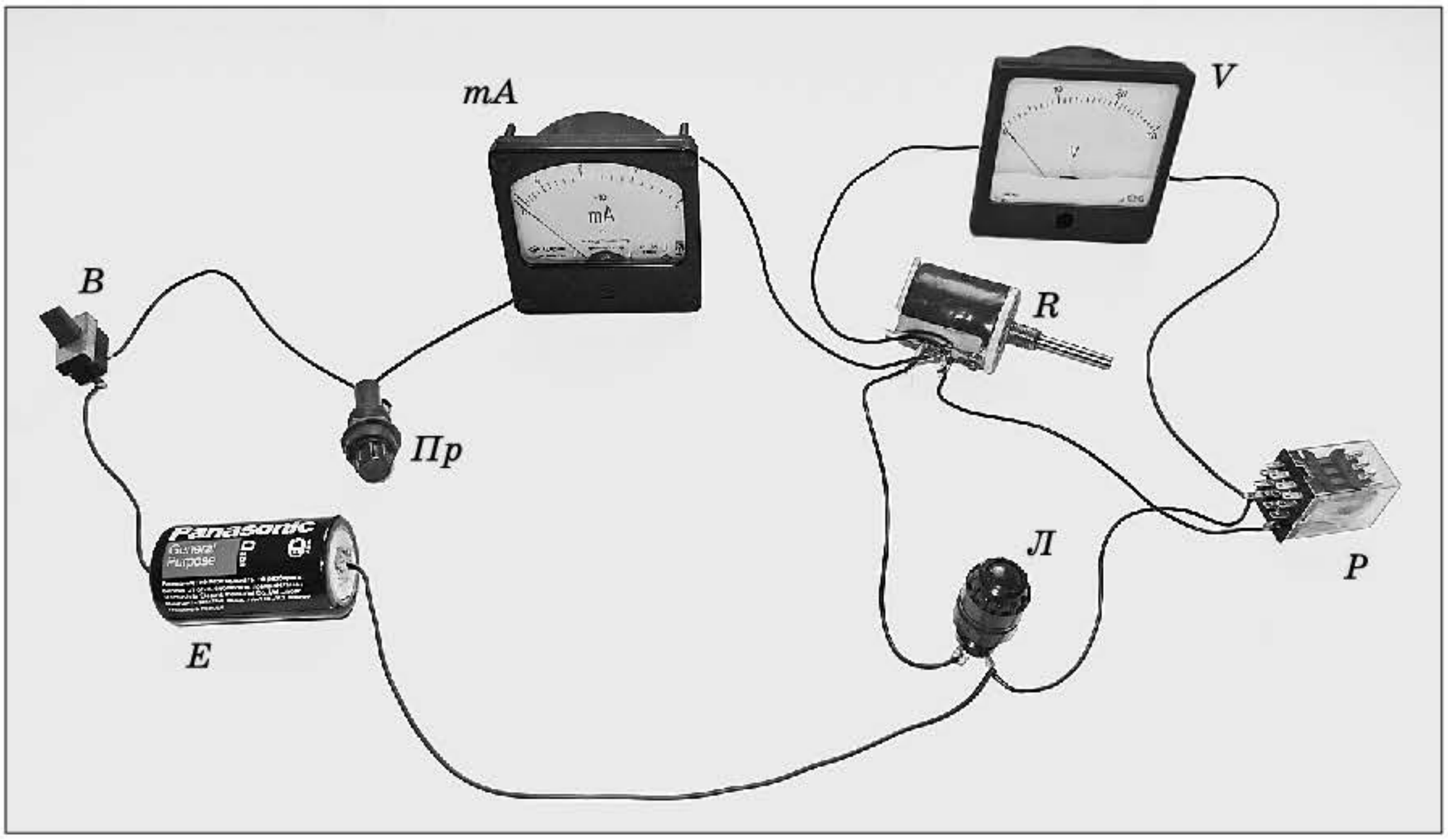


Рис. 1.5. Электрическая цепь

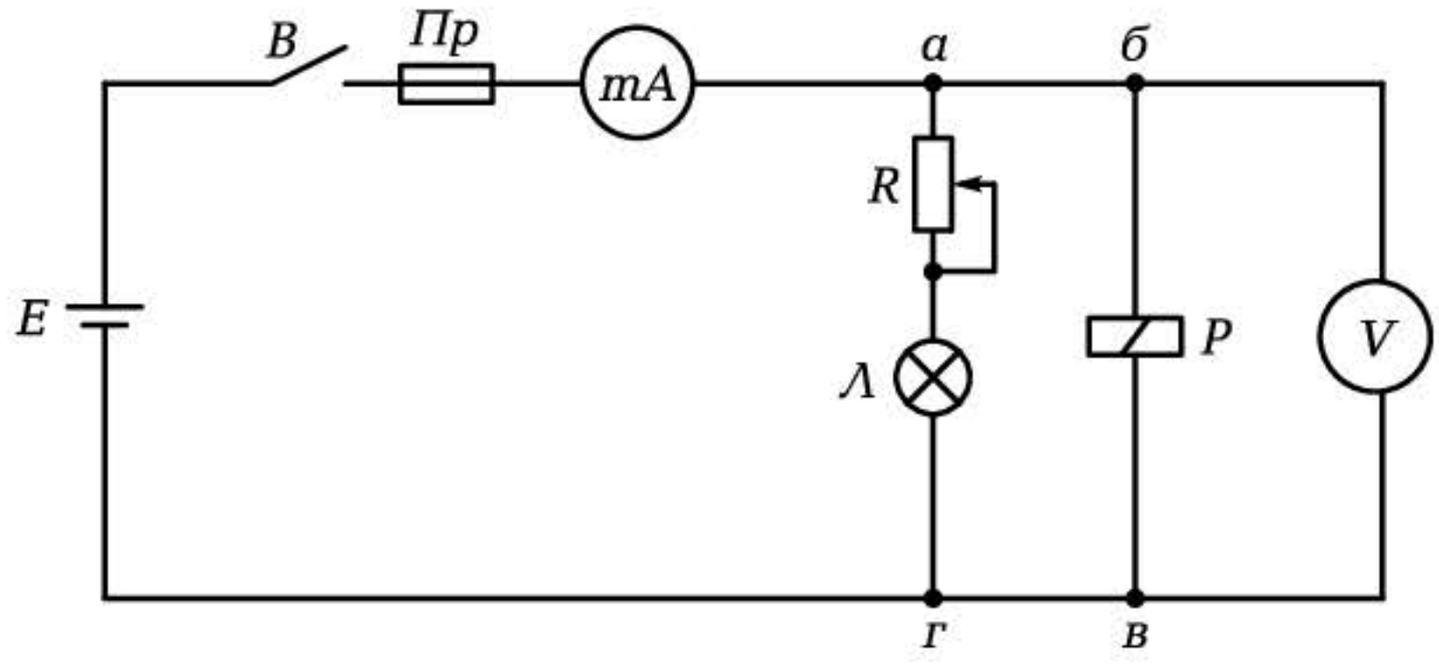


Рис. 1.6. Схема замещения электрической цепи:

E — источник; *P*, *Л*, *R* — потребители; *Пр* — защитное устройство; *mA*,*V* — измерительные приборы; *B* — коммутационное устройство

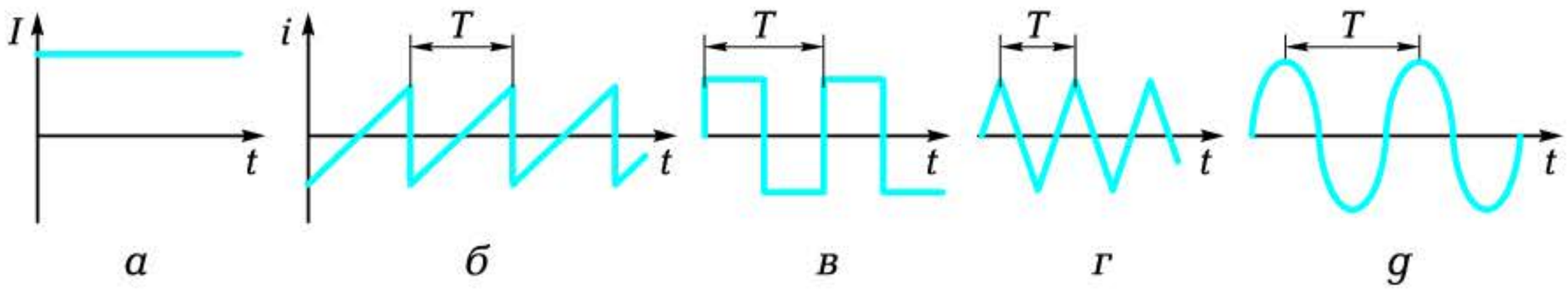


Рис. 1.7. Форма тока:

а — постоянный; *б* — пилообразный; *в* — прямоугольный; *г* — треугольный; *д* — синусоидальный; *T* — период колебаний

При рассмотрении электрической цепи используют понятия:

- *ветвь* — участок цепи, в котором течет один и тот же ток (*а*—*г*; *б*—*в*);
- *узел* — точка, где сходятся не менее трех ветвей (*а*, *г*);
- *контур* — замкнутый участок ЭЦ (*а*—*б*—*в*—*г*).

Постоянный ток — это ток в ЭЦ, который не изменяет ни величины, ни направления (рис. 1.7, *а*). Все параметры, относящиеся к постоянному току, обозначаются прописными 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. 1.7, *б*—*g* приведены возможные виды колебаний переменного тока.

1.2.3. Основные законы электротехники

Для расчетов любых ЭЦ используются законы Ома, Кирхгофа и сохранения энергии.

Закон Ома — ток в замкнутой неразветвленной электрической цепи пропорционален ЭДС и обратно пропорционален полному сопротивлению:

$$I = E/(R + r_0),$$

где r_0 — внутреннее сопротивление источника; R — сопротивление потребителя.

Для участка ЭЦ закон Ома принимает вид

$$I = U/R,$$

где U — падение напряжения на сопротивлении R.

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

$$\sum I = 0.$$

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

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

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

$$\sum P_{\text{ист}} = \sum P_{\text{нагр}} + \sum P_{\text{всп}}.$$

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные виды источников электрической энергии.

2. Что собой представляет электрическая цепь и каковы ее основные элементы?
3. Дайте определение постоянного и переменного тока.
4. Сформулируйте основные законы электротехники.

1.3. ПРИЕМНИКИ И ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. РАСЧЕТ ПРОСТОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

1.3.1. Способы соединения приемников электрической энергии

Любая ЭЦ включает в себя источники электрической энергии (генераторы, аккумуляторы, батареи) и потребители электрической 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 (освещение промышленных и бытовых помещений, улиц) и смешанно. На рис. 1.8 приведены эквивалентные схемы указанных электрических цепей, а на рис. 1.9 — схемы замещения.

При *последовательном* соединении элементов конец цепи первого потребителя соединяется с началом цепи второго, конец цепи второго с началом цепи третьего и т. д. Начало цепи первого и конец цепи последнего потребителей подключаются к зажимам источника питания (рис. 1.8, *а*).

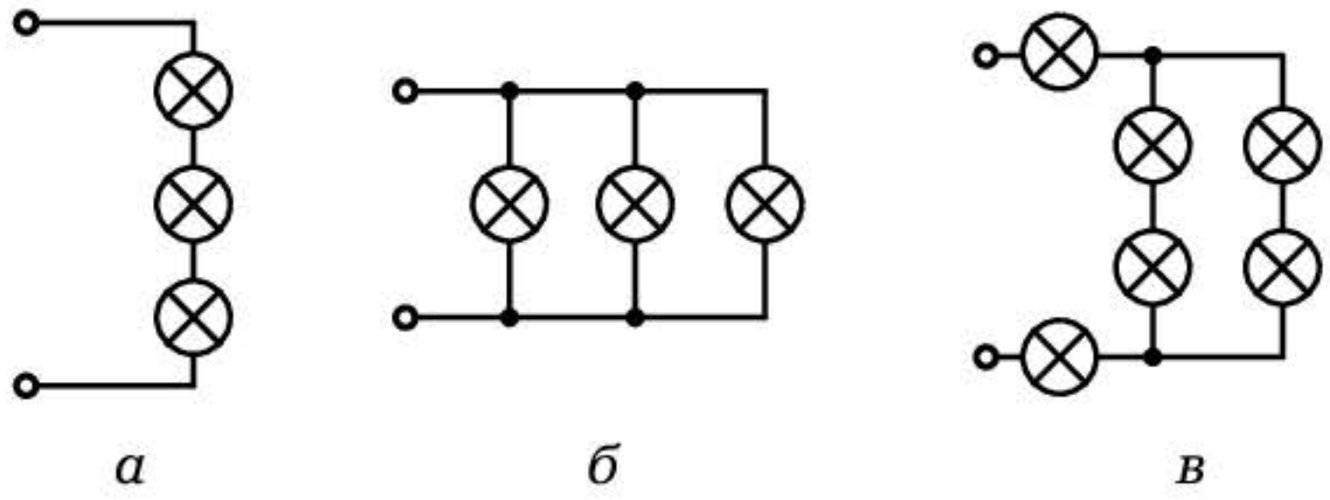
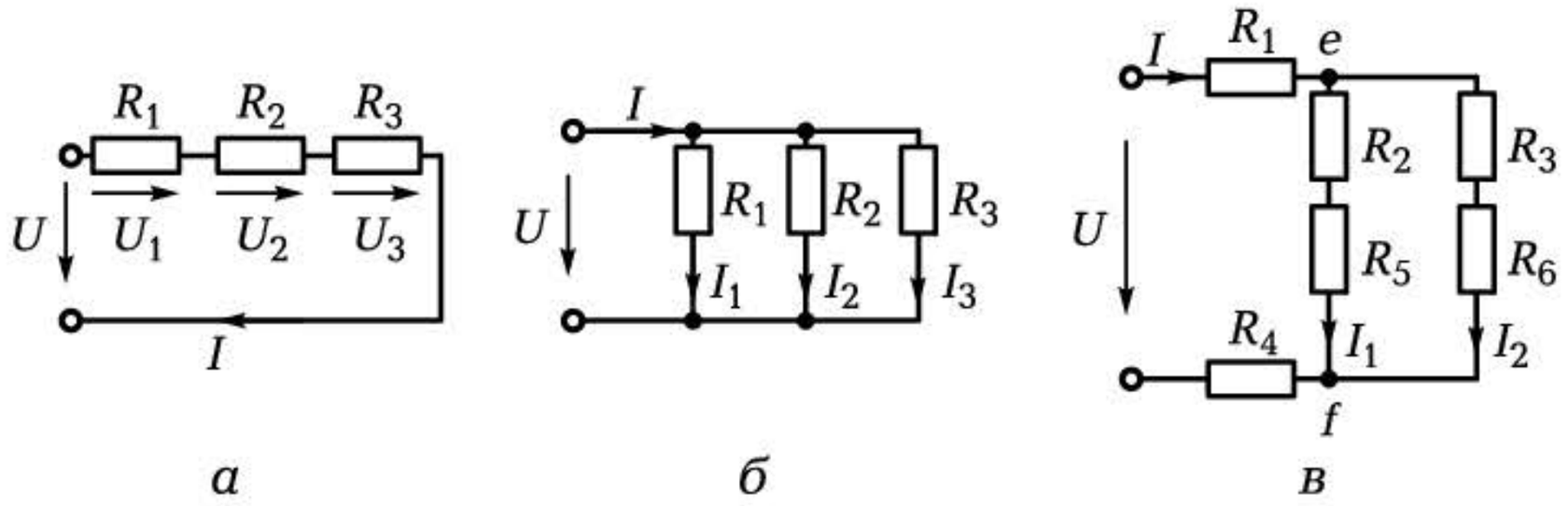


Рис. 1.8. Схемы включения ламп:
а — последовательная; *б* — параллельная; *в* — смешанная



а *б* *в*

Рис. 1.9. Схемы замещения:
а — последовательное включение нагрузки; *б* — параллельное; *в* — смешанное

На каждом из потребителей падает напряжение, определяемое значениями тока и сопротивления:

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

В соответствии *со вторым законом Кирхгофа*

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

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

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

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, т. е. имеет место баланс мощностей:

$$P_{\text{ист}} = U\,I = I^2\,R = U^2/R.$$

При *параллельном* соединении потребителей начала их цепей соединяются в одной точке (узел 1), а концы — в другой (узел 2). Оба узла подключаются к разноименным зажимам источника питания (рис. 1.8, *б*).

В соответствии с *первым законом Кирхгофа* (законы свои он сформулировал в возрасте 26 лет) алгебраическая сумма токов для любого узла ЭЦ равна нулю:

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

Следовательно, сумма входящих в узел токов равна сумме выходящих. Поскольку напряжение для всех потребителей одно и то же, то в соответствии с законом Ома

$$I_1 = U/R_1;\ I_2 = U/R_2;\ I_3 = U/R_3;\ I = U/R,$$

или

$$U/R = U/R_1 + U/R_2 + U/R_3,$$

откуда

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3,$$

или

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

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

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

Для общего сопротивления можно записать:

$$R = 1/(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3).$$

Умножив полученное выражение на U^2, получим

$$U^2/R = U^2/R_1 + U^2/R_2 + U^2/R_3,$$

или

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

Как и при последовательном соединении элементов, потребляемая ЭЦ мощность равна сумме мощностей, потребляемых каждым элементом цепи, и равна мощности, отдаваемой источником.

Схема замещения при *смешанном* соединении потребителей приведена на рис. 1.9, *в*.

Расчет такой ЭЦ может быть выполнен на основе приведенных ранее соотношений. Так, общее сопротивление схемы может быть вычислено в соответствии с выражением

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

где

$$R_{ef} = 1/[1/(R_2 + R_3) + 1/(R_5 + R_6)].$$

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

Как и соединение приемников электрической энергии, соединение источников энергии может быть:

последовательным — для повышения напряжения питания.

Как правило, последовательно соединяются одинаковые по типу источники. При этом их ЭДС E и внутренние сопротивления r_0 складываются, образуя один источник с эквивалентной ЭДС $E_э$ и эквивалентным внутренним сопротивлением $r_{0э}$ (рис. 1.10, *а*):

$$E_э = \sum E;\ r_{0э} = \sum r_0;$$

параллельным — для повышения мощности источника.

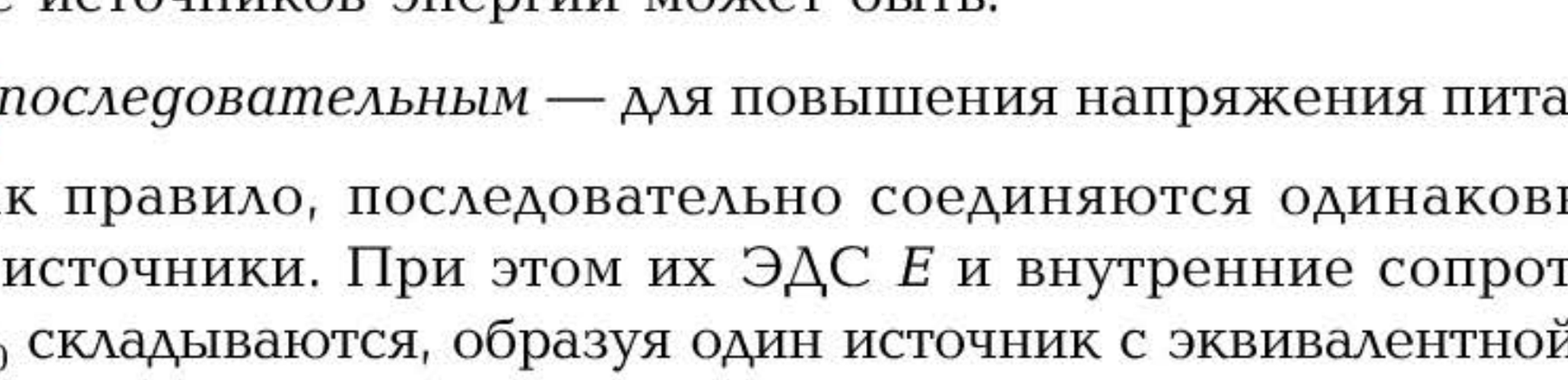


Рис. 1.10. Схемы включения источников:

а — последовательная; *б* — параллельная

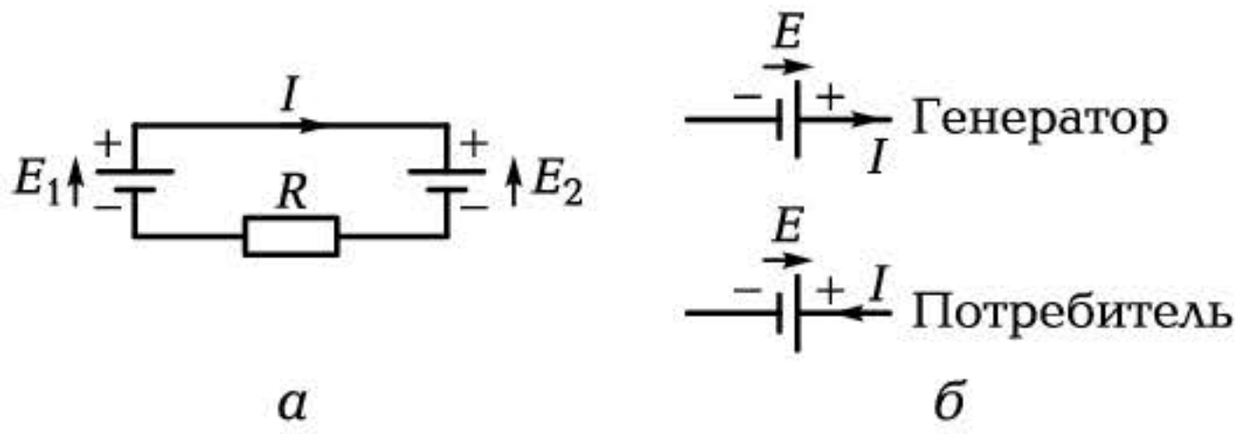


Рис. 1.11. Встречное включение источников:

а — схема; *б* — режимы работы

Так включаются источники с одинаковыми ЭДС. При этом эквивалентная ЭДС равна ЭДС источника, а эквивалентное внутреннее сопротивление $r_{0э}$ определяется, как эквивалентное сопротивление параллельно включенных резисторов (см. рис. 1.9, *б*):

$$E_э = E;\ r_{0э} = 1/(\sum 1/\ r_0);$$

групповым — для повышения и напряжения, и мощности.

В ЭЦ с несколькими источниками, включенными встречно друг другу (например, аккумулятор и его зарядное устройство), необходимо различать источник, работающий в режиме генератора, и источник, работающий в режиме потребителя (рис. 1.11).

Согласно второму закону Кирхгофа

$$E_1 - E_2 = I\,R.$$

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.

1.3.3. Алгоритм расчета простой неразветвленной электрической цепи

Расчет ЭЦ обычно сводится к определению токов, падений напряжений, вычислению мощностей в отдельных ее ветвях. При этом считаются известными схема ЭЦ и значения параметров всех ее элементов.

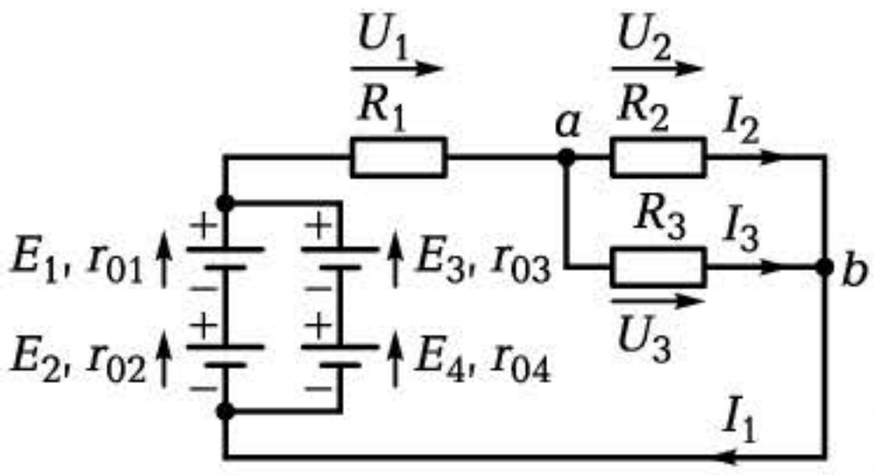


Рис. 1.12. Расчетная схема простой ЭЦ

Рассмотрим алгоритм расчета простой неразветвленной ЭЦ, схема которой приведена на рис. 1.12

Дано: $E_1 = E_2 = E_3 = E_4 = E_0$; $r_{01} = r_{02} = r_{03} = r_{04} = r_0$; R_1, R_2, R_3.

Найти: I_1, I_2, I_3, U_1, U_2, U_3, P_1, P_2, P_3.

Расчет выполняем в такой последовательности.

1. Эквивалентное сопротивление нагрузки ЭЦ

$$R_э = R_1 + 1/(1/R_2 + 1/R_3).$$

2. Эквивалентная ЭДС источника питания

$$E_э = E_1 + E_2 = 2E_0.$$

3. Эквивалентное внутреннее сопротивление источника питания

$$r_{0э} = 1/[1/(2\,r_0)] + 1/(2\,r_0).$$

4. Полный ток, потребляемый ЭЦ,

$$I_1 = E_э/(R_э + r_{0э}).$$

5. Падение напряжения на участке $a — b$

$$U_{ab} = U_2 = U_3 = I_1\,[1/(1/R_2 + 1/R_3)].$$

6. Ток через резистор R_2

$$I_2 = U_{ab}/R_2.$$

7. Ток через резистор R_3

$$I_3 = U_{ab}/R_3.$$

8. Падение напряжения на резисторе R_1

$$U_1 = I_1R_1.$$

9. Мощности, рассеиваемые на резисторах R_1, R_2, R_3,

$$P_1 = I_1{}^2R_1;\ P_2 = I_2^2R_2;\ P_3 = I_3^2R_3.$$

10. Мощность, отдаваемая источниками,

$$P_{\text{ист}} = I_1(E_1 + E_2) = 2E_0I_1.$$

11. Мощность, расходуемая на внутреннем сопротивлении источников,

$$P_{r0э} = I_1^2 r_{0э}.$$

Проверяем правильность расчетов, используя баланс мощностей:

$$P_{\text{ист}} = P_1 + P_2 + P_3 + P_{r0э}.$$

Пример расчета простой ЭЦ приведен в приложении 3.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите способы соединения приемников электрической энергии.
2. Чему равны общие сопротивления ЭЦ при последовательном и параллельном соединении приемников электрической энергии?
3. Назовите способы соединения источников электрической энергии.
4. С какой целью источники включают последовательно или параллельно?

1.4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ

1.4.1. Электрические методы измерений

При выполнении лабораторных работ по электротехнике, которые проводятся уже в самом начале изучения курса, обязательно используются электроизмерительные приборы. Поэтому следует дать общие сведения о них.

Процесс испытаний и исследований любой электрической схемы всегда включает в себя измерение ее основных параметров: сопротивлений, напряжений, токов, мощностей и т. д. Правиль-

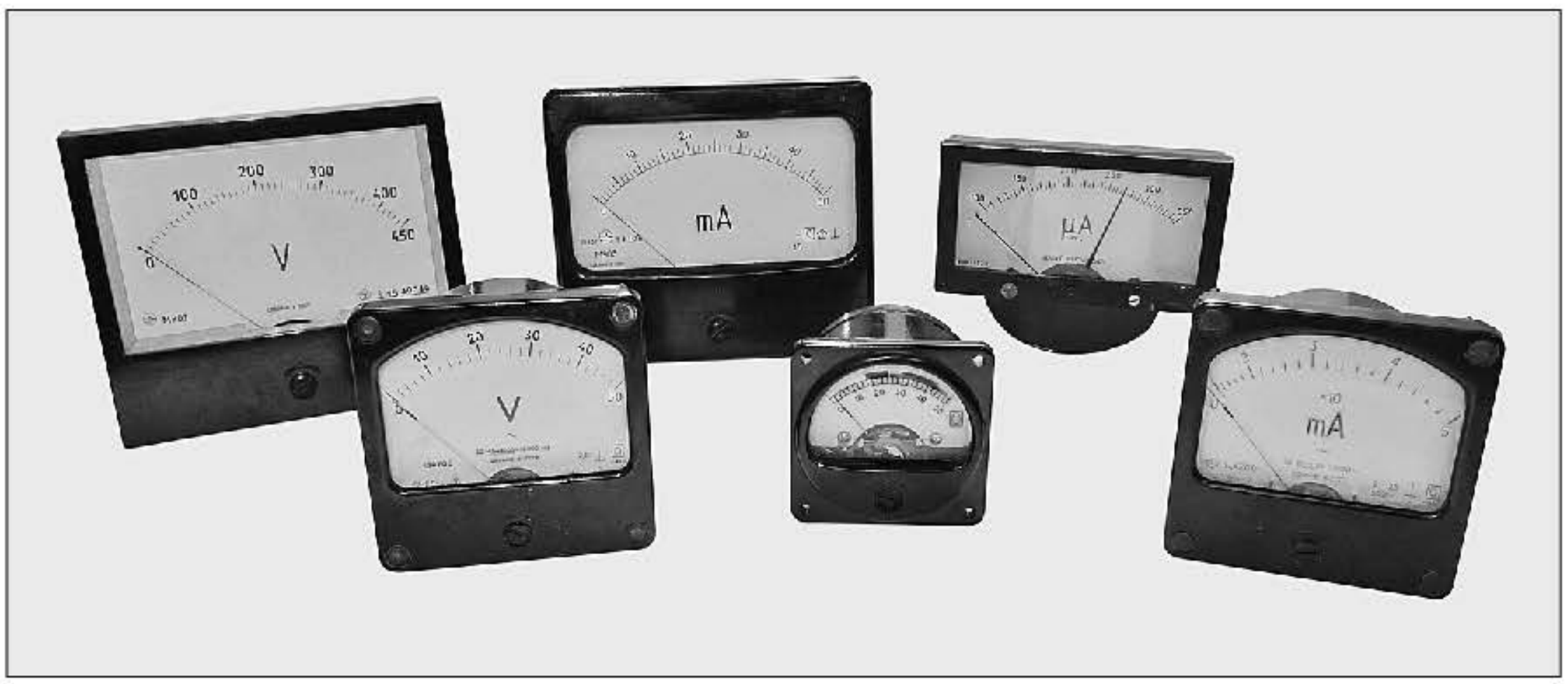


Рис. 1.13. Щитовые электромеханические измерительные приборы

ность полученных результатов определяется тем, насколько грамотно используются имеющиеся средства измерений.

Выполняемые в процессе изучения курса «Электротехника» лабораторные работы также сопровождаются измерением токов, напряжений, сопротивлений и мощностей. Для измерения электрических величин используются электромеханические измерительные приборы (рис. 1.13).

1.4.2. Измерение напряжения

Прибор для измерения напряжения называется вольтметром. Его общий вид приведен на рис. 1.13, а условное изображение — на рис. 1.14. Вольтметр включается параллельно нагрузке (рис. 1.14, *а*). Чтобы он не оказывал влияния на параметры измеряемой ЭЦ, его внутреннее сопротивление должно быть большим (стремиться к бесконечности).

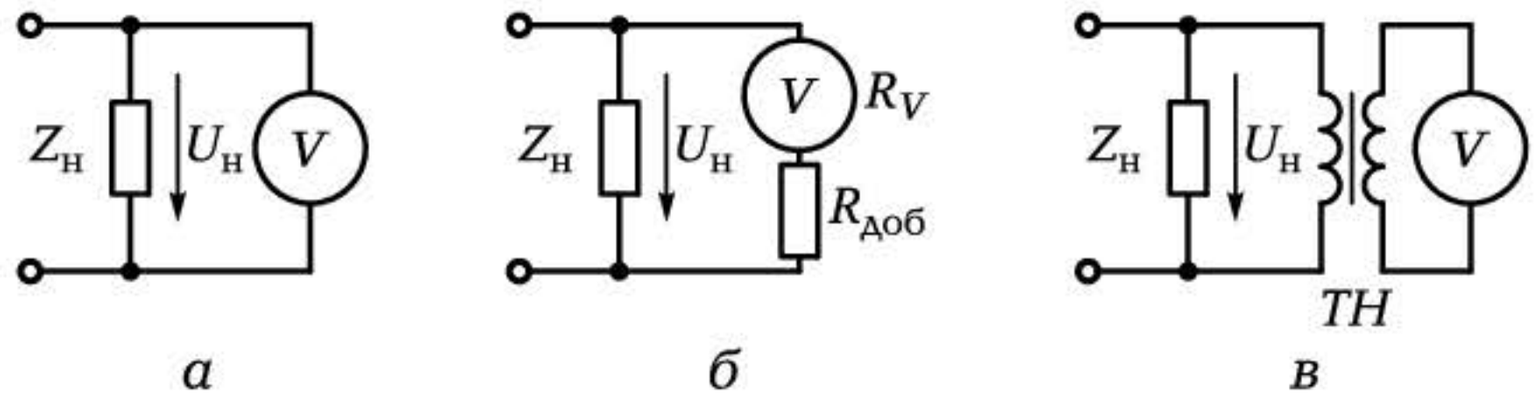


Рис. 1.14. Схемы включения вольтметра:

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. 1.14, *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; U_0 — номинальная величина вольтметра.

На переменном токе для расширения пределов измерения используются трансформаторы напряжения *ТН* (рис. 1.14, *в*). Коэффициент трансформации выбирается из условия $n = U_{\text{н}}/U_0$.

1.4.3. Измерение тока

Прибор для измерения тока называется амперметром. Его общий вид приведен на рис. 1.13, а условное изображение — на рис. 1.15. Амперметр включается последовательно с нагрузкой (рис. 1.15, *а*). Чтобы он не оказывал влияния на параметры измеряемой ЭЦ, его внутреннее сопротивление должно быть минимальным (стремиться к нулю).

Для измерения постоянного тока чаще используется прибор магнитоэлектрической системы, переменного — электромагнитной.

Для расширения пределов измерения амперметра на постоянном токе используется добавочный резистор (шунт), включаемый параллельно прибору (рис. 1.15, *б*). При этом

$$R_{\text{ш}} = R_A I_0/(I_{\text{н}} - I_0),$$

где R_A — внутреннее сопротивление амперметра; $I_{\text{н}}$ — измеряемый ток; I_0 — номинальная величина амперметра.

На переменном токе для расширения пределов измерения используются трансформаторы тока *ТТ* (рис. 1.15, *в*). Коэффициент трансформации выбирается из условия $n = I_{\text{н}}/I_0$.

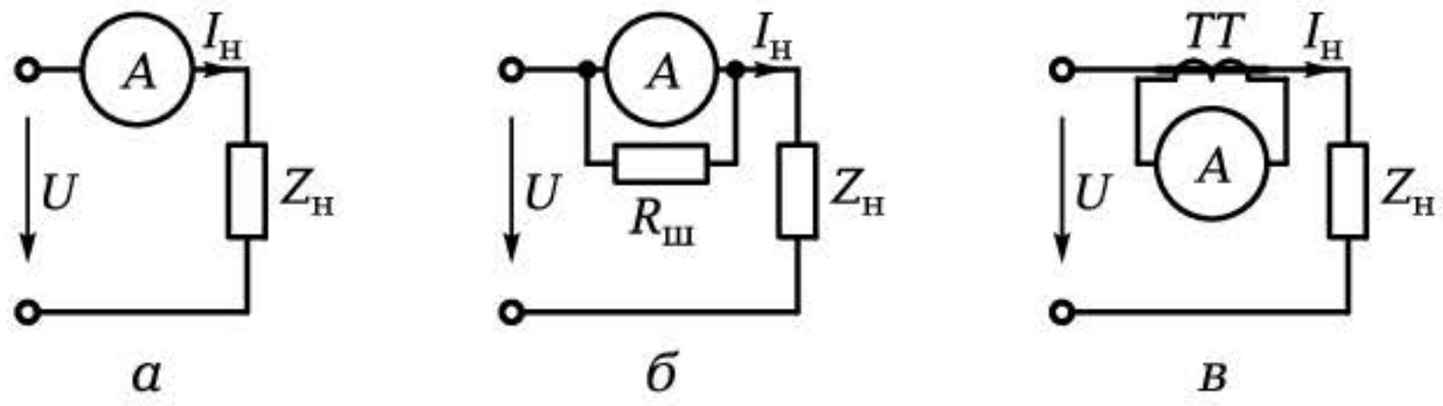


Рис. 1.15. Схемы включения амперметра:

а — напрямую к нагрузке; *б* — с помощью шунта; *в* — через измерительный трансформатор тока

1.4.4. Измерение мощности

Мощность, потребляемая нагрузкой, может быть измерена косвенным методом с помощью амперметра и вольтметра ($P = UI$) (рис. 1.16, *а*) или непосредственно прибором электродинамической системы — ваттметром, включаемым по схеме, приведенной на рис. 1.16, *б*.

Для расширения пределов измерения ваттметра на постоянном токе используются добавочный резистор (шунт), включаемый параллельно токовой катушке прибора, и резистор, включаемый последовательно с катушкой вольтметра. На переменном токе для расширения пределов измерения используются трансформаторы тока и напряжения.

1.4.5. Измерение сопротивления

Сопротивление может быть измерено косвенным методом с помощью амперметра и вольтметра ($R_н = U_н / I_н$) (см. рис. 1.16, *а*)

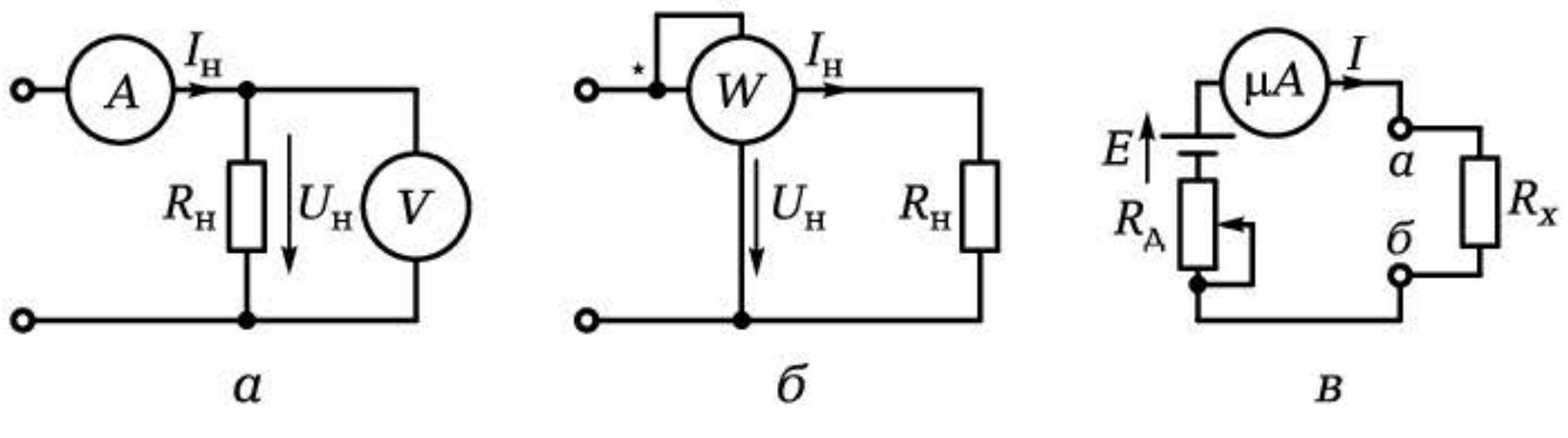


Рис. 1.16. Схемы измерения:

а — мощности и сопротивления косвенным методом; *б* — мощности ваттметром; *в* — сопротивления омметром

или непосредственно омметром, включаемым по схеме, приведенной на рис. 1.16, *в*.

Здесь E — ЭДС источника питания, входящего в состав прибора; $R_д$ — резистор переменного сопротивления, включаемый последовательно с микроамперметром магнитоэлектрической системы; R_x — измеряемое сопротивление. Поскольку ток в цепи $I = E/(R_д + R_x)$ обратно пропорционален сопротивлению, то максимальному отклонению стрелки микроамперметра будет соответствовать минимальное сопротивление.

Если закоротить точки *а* и *б*, то можно с помощью резистора $R_д$ 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 используется источник напряжения до 2 500 В, например небольшой генератор с ручным приводом, входящий в состав прибора, или преобразователь напряжения, питаемый от сети.

1.4.6. Основные показатели электроизмерительных приборов

Основными показателями являются:

- номинальная величина $A_н$ — наибольшая величина, которая может быть измерена прибором;
- постоянная прибора (цена деления) C — значение измеряемой величины, вызывающее отклонение стрелки на одно деление шкалы;
- погрешности измерения.

Различают абсолютную, приведенную и относительную погрешности измерения.

Абсолютная погрешность — разность между измеряемым $A_и$ и действительным $A_д$ значениями контролируемой величины:

$$\Delta A = A_{и} - A_{д}.$$

Эта погрешность не позволяет оценить точность измерения, так как при измерении U = 100 В с ΔA = 1 В точность высока, а при измерении U = 1 В с ΔA = 1 В точность низка.

Приведенная погрешность — отношение абсолютной погрешности к номинальной величине прибора, выраженное в процентах:

$$\gamma_{пр} = (\Delta A / A_{н})100.$$

Именно приведенная погрешность определяет класс точности прибора, указываемый на его шкале. Так, класс точности 0,5 соответствует погрешности ±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.

Относительная погрешность — отношение абсолютной погрешности к действительному (или с достаточной точностью к измеренному) значению, выраженное в процентах:

$$\gamma = (\Delta A / A_{и})100.$$

Именно она определяет точность измерения. Поскольку $\Delta A = \gamma_{пр} A_{н} = \gamma A_{и}$, то

$$\gamma = \gamma_{пр} A_{н} / A_{и},$$

т.е. относительная погрешность зависит от действительного значения измеряемой величины и возрастает при ее уменьшении.

Поэтому для повышения точности измерения пользуются обычно последней третью шкалы. Существуют многопредельные приборы, допускающие переключения при измерениях существенно различающихся величин.

1.4.7. Системы электроизмерительных приборов

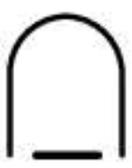
Значительная часть измерительных приборов принадлежит к электромеханической группе. Общим для них является то, что электромагнитная энергия, подводимая к прибору из измеряемой цепи, непосредственно преобразуется в механическую энергию перемещения подвижной части.

Электромеханический прибор состоит из двух частей: измерительной цепи и измерительного механизма.

Измерительная цепь — это совокупность элементов, служащих для преобразования измеряемой электрической величины (I, U, P, R, L) в другую электрическую промежуточную величину, на которую реагирует измерительный механизм. В некоторых случаях в состав измерительной цепи вводят полупроводниковый выпрямитель. Свойства измерительного прибора при этом могут существенно изменяться. Например, прибор магнитоэлектрической системы с полупроводниковым выпрямителем способен измерять не только постоянное напряжение, но и переменное.

Измерительный механизм — это преобразователь электрической величины в перемещение (угол отклонения), которое с помощью отсчетного устройства (стрелки) воспринимается визуально наблюдателем.

По *способу преобразования* электрической величины, т. е. по способу создания механической силы, измерительные механизмы подразделяются на ряд систем. Основными из них являются системы:

- магнитоэлектрические —  ;
- электромагнитные —  ;
- электродинамические —  ;
- индукционные —  .

По *роду тока* приборы подразделяются на приборы:

- постоянного тока — ⎓;
- переменного тока — ~;
- постоянного и переменного тока — ⩧;
- трехфазного тока — ≋ (3~).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нарисуйте схему включения в электрическую цепь вольтметра, амперметра, ваттметра, омметра.
2. Как расширить пределы измерения вольтметра и амперметра?
3. Назовите основные показатели электроизмерительных приборов.
4. Перечислите основные системы электроизмерительных приборов.

1.5. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ. РАСЧЕТ ПРОВОДОВ. РАЗВЕТВЛЕННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ

1.5.1. 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 генератора — номинальные значения напряжения и тока. При этом под номинальным током понимается такое его значение, которое генератор длительное время может отдавать во внешнюю цепь без перегрева.

- ***Режим холостого хода*** (ХХ) — это режим, при котором через источник или приемник не протекает ток ($I_{xx} = 0$). Напряжение на источнике 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). Это аварийный режим, так как ток КЗ во много раз превышает номинальный ток установки и может вызвать ее повреждение. Для защиты от токов КЗ используются предохранители, рассчитанные на определенное значение тока.
- ***Согласованный режим*** — это режим, при котором мощность, передаваемая от источника к потребителю, имеет максимальную величину. На первый взгляд, это наиболее выгодный режим. Но так как максимальная мощность от источника к нагрузке передается при $R_н = r_0$, то КПД установки

$$\eta = P_н/P_и = U_н I/(EI) = U_н/E = E\,(R_н/(R_н+r_0))/E = R_н/(R_н + r_0) = 0{,}5.$$

Подобный режим в общей электротехнике 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 η стремится к единице.

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.

1.5.2. Расчет проводов на потерю напряжения и на нагревание

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

При расчетах известны следующие параметры:

- напряжение источника питания U_0;
- напряжение на нагрузке $U_н$, обеспечивающее номинальный режим работы оборудования;
- ток нагрузки $I_н$;
- длина линии передачи l.

Потери напряжения ΔU в линии передачи в этом случае будут определяться площадью сечения проводов S. Действительно, $\Delta U = = U_0 - U_н = = 2R_л I_н = 2I_н \rho l/S$, откуда

$$S = 2\,\rho l I_н/\Delta U.$$

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

Таким образом, для уменьшения потерь напряжения в проводах необходимо увеличивать их сечение.

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

$$Q_{пр} = I^2 R_{пр} t.$$

Одну и ту же мощность по проводам можно передавать при высоком напряжении и низком токе или при низком напряжении и высоком токе. Поскольку потери пропорциональны квадрату тока ($P = I^2R$), то очевидно, что передачу энергии выгоднее осуществлять при высоком напряжении и малом токе. Это позволяет уменьшить сечение 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.

Расчет на нагревание сводится к выбору по справочнику площади сечения провода, обеспечивающей длительные допустимые токовые нагрузки.

Таким образом, расчет проводов — это определение площади сечения провода для обеспечения допустимого падения напряжения, а затем проверка по справочнику соответствия полученного значения площади сечения заданной токовой нагрузке. Если в справочнике указан ток, меньший заданного, то площадь сечения увеличивают таким образом, чтобы она соответствовала требованиям нагрузки.

Выполним расчет площади сечения провода. Пусть необходимо осуществить подводку 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 $I_н =$ $= 20$ А.

Выбираем в качестве материала провода медь с $\rho = 0{,}0175$ Ом $\cdot$ мм^2/м. Вычисляем площадь сечения провода: $S = 2\rho l I_н / \Delta U =$ $= 2 \cdot 0{,}0175 \cdot 20 \cdot 20/(36 - 35) = 14$ мм^2. По справочнику выбираем ближайшую бóльшую площадь сечения $S = 16$ мм^2. Проверяем по справочнику допустимый ток в изолированных проводах при продолжительной нагрузке: он равен 75 А, что значительно превышает заданное значение. Таким образом, для питания лаборатории трехфазным напряжением 36 В с нейтральным проводом необходимо выбрать четырехжильный кабель с площадью сечения жил 16 мм^2.

1.5.3. Разветвленная электрическая цепь. Метод контурных токов

Разветвленные ЭЦ — это многоконтурные цепи с несколькими источниками питания. Для их расчета разработан ряд методов, основные из которых следующие:

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

Наиболее широкое применение нашел метод контурных токов благодаря своей универсальности. 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 $n - 1$, где n — число контуров.

Для ЭЦ, схема которой приведена на рис. 1.17, число контуров равно трем, поэтому уравнений должно быть два.

Покажем на схеме ЭЦ условно положительные направления контурных токов (I_{I} и I_{II}) и токов в ветвях (I_1, I_2, I_3).

Для смежных контуров *а—б—в—г—а* и *а—ж—g—б—а* в соответствии с вторым законом Кирхгофа, обходя контур по часовой стрелке, запишем:

$$E_1 - E_2 = I_{\text{I}}(R_1 + r_{01} + R_2 + r_{02}) - I_{\text{II}}\,(R_2 + r_{02});$$

$$E_2 - E_3 = I_{\text{II}}(R_2 + r_{02} + R_3 + r_{03}) - I_{\text{I}}\,(R_2 + r_{02}).$$

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

Ток ветви *б—в—г—а* I_1 равен контурному току I_{I}.

Ток ветви *а—ж—g—б* I_3 равен контурному току $-I_{\text{II}}$.

Ток смежной ветви *а—б* I_2 равен разности контурных токов $I_{\text{II}} - I_{\text{I}}$ (подробнее см. приложение 6).

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

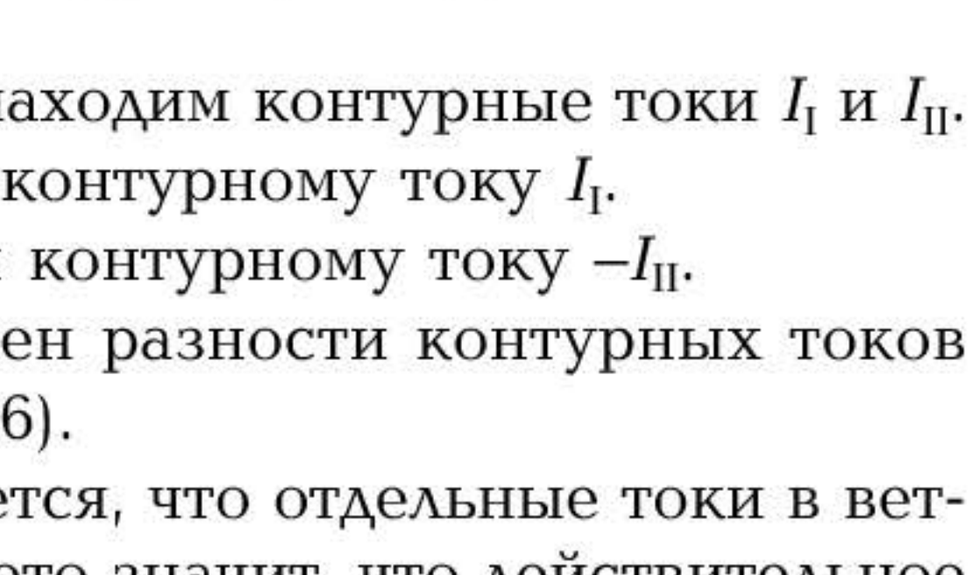


Рис. 1.17. Схема разветвленной электрической цепи

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите и охарактеризуйте основные режимы работы электрических цепей.
2. Что определяется в результате расчета проводов на потерю напряжения и на нагревание?
3. Что собой представляет разветвленная электрическая цепь?
4. В чем суть метода контурных токов?

1.6. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

1.6.1. 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. 1.18, *а*;
- несимметричные (полупроводниковый диод) — рис. 1.18, *б*;
- управляемые (транзистор) — рис. 1.18, *в*.

Нелинейность ВАХ лампы накаливания определяется зависимостью удельного электрического сопротивления материала нити ρ от температуры.

В свою очередь температура нити накаливания зависит от силы тока I, протекающего по ней:

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

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

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

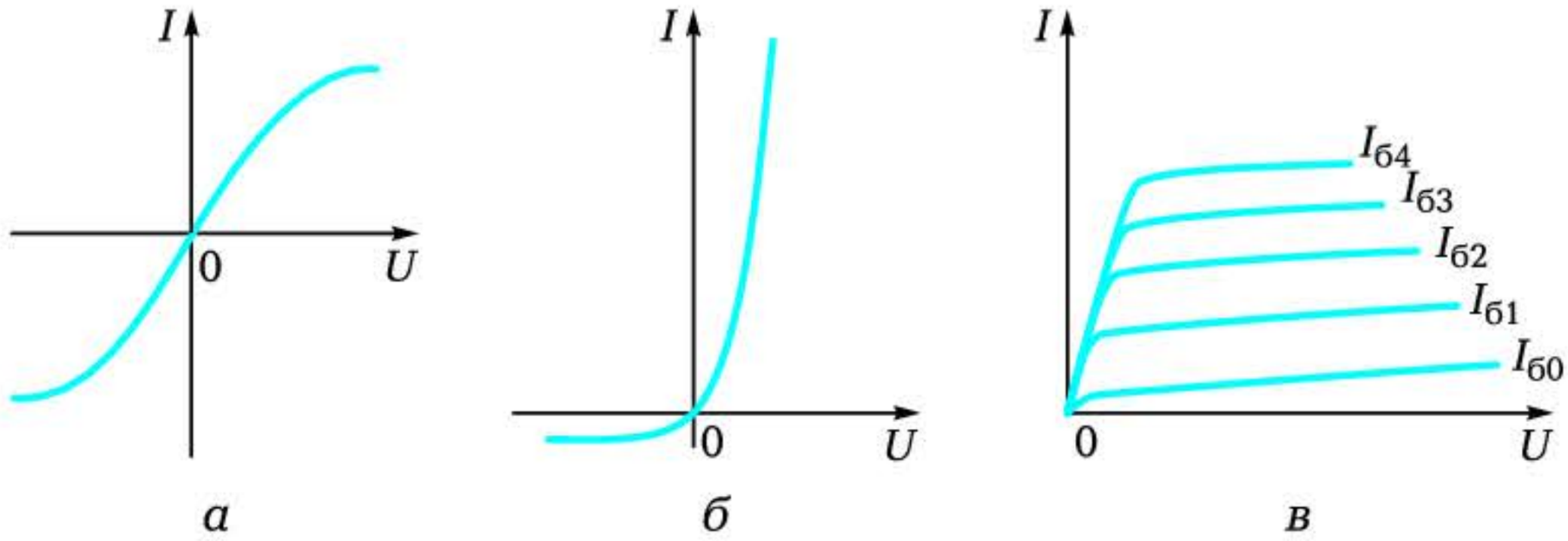


Рис. 1.18. Виды вольт-амперной характеристики нелинейных элементов:

а — симметричная; *б* — несимметричная; *в* — управляемая

лампы накаливания увеличивается ($R_{T2} = R_{T1}(1 + \alpha\Delta T)$) и ток уменьшается 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 электромагнитного поля на границе $n-p$-перехода существует внутреннее поле, препятствующее свободному перемещению электронов и дырок. Сопротивление перехода значительно. Если направление внешнего поля совпадает с направлением внутреннего, то сопротивление еще более растет и сила тока через $n-p$-переход чрезвычайно мала. Если же внешнее поле направлено навстречу внутреннему, то сопротивление $n-p$-перехода уменьшается и через переход может протекать значительный ток (подробнее см. подразд. 6.2).

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 вольт-амперная характеристика приведена на рис. 1.18, *б*.

Для стабилитрона (опорного диода) обратная ветвь ВАХ имеет участок, на котором напряжение при изменении тока практически не меняется. Это свойство стабилитрона положено в основу работы стабилизаторов напряжения.

Биполярный транзистор строится на основе двух $n-p$-переходов и обладает управляемой ВАХ (рис. 1.18, *в*). Если к одному $n-p$-переходу (база — эмиттер) прикладывать небольшое напряжение, обеспечивающее протекание токов $I_{б0}$, $I_{б1}$, $I_{б2}$, $I_{б3}$, $I_{б4}$, то мож-

но управлять значительным током $I_к$ через второй $n-p$-переход (коллектор — эмиттер).

1.6.2. Последовательное соединение нелинейных элементов

К нелинейным ЭЦ применимы основные законы электротехники. Однако при расчетах таких цепей удобно пользоваться графоаналитическим методом.

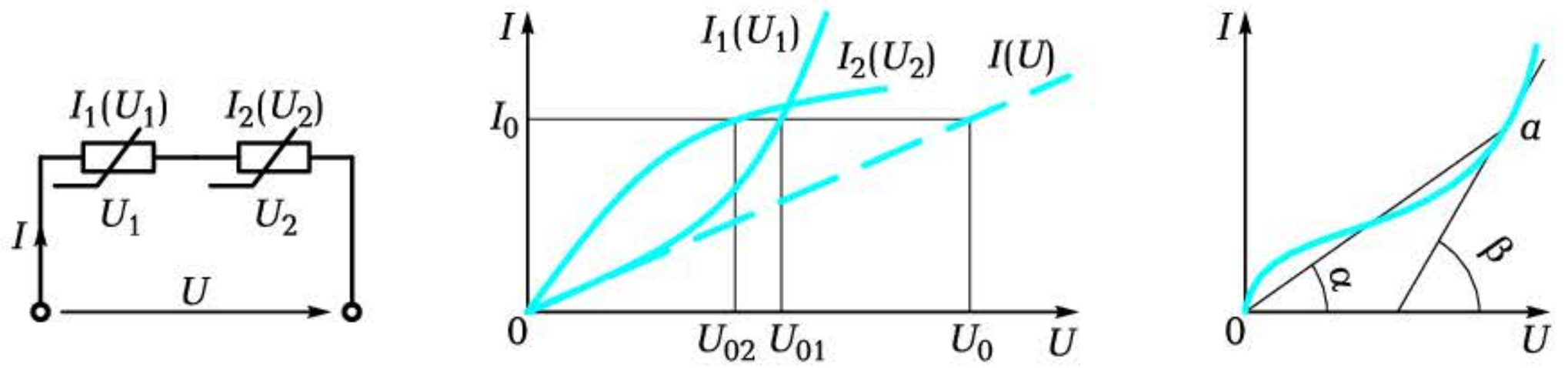
Суть его заключается в том, что по известным ВАХ элементов строятся ВАХ отдельных участков или всей цепи и далее по результирующей ВАХ определяются или токи в ветвях, или напряжения на элементах.

Для показанной на рис. 1.19, *а* ЭЦ с *последовательным* соединением НЭ (например, лампы накаливания и полупроводникового диода) результирующая ВАХ $I(U)$ (рис. 1.19, *б*) строится на основе второго закона Кирхгофа суммированием абсцисс точек ВАХ отдельных элементов при общем для них значении тока.

При этом $U = U_1 + U_2$. Для полученной ВАХ ($I(U)$) 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 *а* (рис. 1.19, *в*) можно рассматривать сопротивления:



а *б* *в*

Рис. 1.19. Электрическая цепь с последовательным включением нелинейных элементов:

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

- *статическое*, пропорциональное tg α;
- *дифференциальное*, позволяющее судить о приращении напряжения и тока. Оно пропорционально tg β, где β — угол между осью ординат и касательной к ВАХ.

1.6.3. Параллельное соединение нелинейных элементов

При *параллельном* соединении нелинейных элементов (рис. 1.20, *а*) результирующая ВАХ ($I(U)$) строится на основе первого закона Кирхгофа суммированием ординат точек ВАХ отдельных нелинейных элементов при общих для них значениях напряжения (рис. 1.20, *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. 1.20, *в*, и в алгоритм имеет следующий вид:

- строится суммарная ВАХ двух последовательно включенных нелинейных элементов *НЭ1* и *НЭ2*;
- полученная суммарная ВАХ складывается графически с ВАХ нелинейного элемента *НЭ3*, включенного параллельно;

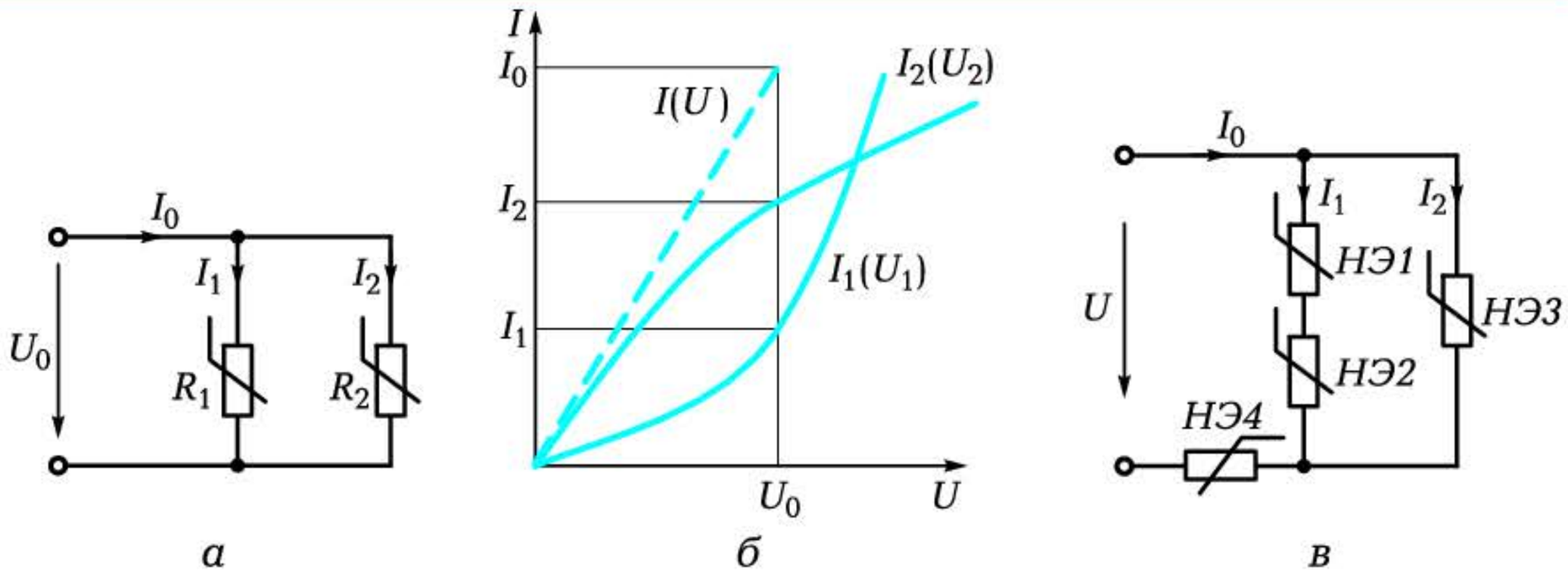


Рис. 1.20. Электрическая цепь с параллельным включением нелинейных элементов:

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

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите виды ВАХ нелинейных элементов.
2. В чем особенность расчета ЭЦ с нелинейными элементами?
3. Как построить результирующую ВАХ при последовательном включении нелинейных элементов?
4. Как построить результирующую ВАХ при параллельном включении нелинейных элементов?

Глава 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

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

2.1.1. Основные понятия и определения

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

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

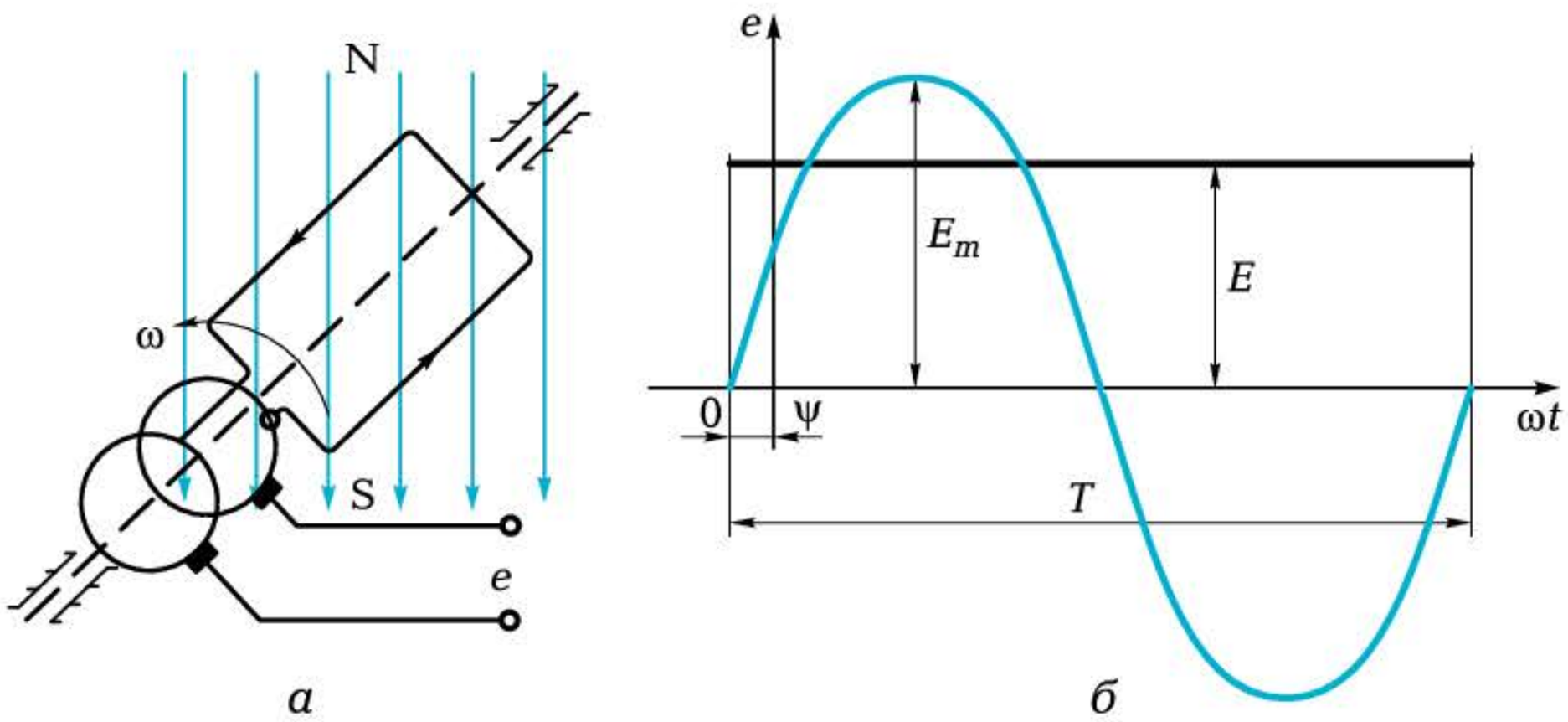


Рис. 2.1. Способ получения синусоидальной ЭДС; форма синусоидальной ЭДС:

а — схема ЭЦ; *б* — временна́я диаграмма

Если поместить рамку в равномерное магнитное поле (рис. 2.1, *а*) и вращать ее с частотой ω, то в ней в соответствии с законом электромагнитной индукции наведется переменная ЭДС (рис. 2.1, *б*)

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

где e — мгновенное значение ЭДС; E_m — амплитудное значение ЭДС; ψ — начальная фаза, определяющая значение e при $t = 0$; $(\omega t + \psi)$ — текущее значение фазы; $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ — угловая частота, 1/с; f — линейная частота, Гц; T — период колебаний.

Расчет цепей с использованием мгновенных значений ЭДС, токов и напряжений достаточно сложен, поэтому мгновенные значения заменяют действующими (эффективными) значениями. На рис. 2.1, *б* E — действующее значение ЭДС.

Действующее значение переменного тока I — это такая неизменная во времени величина, которая выделяет в сопротивлении R за период столько же теплоты, что и реальный синусоидальный ток $i = I_m \sin(\omega t + \psi)$.

Если синусоидальный ток нагревает проводник на 100 °С, то постоянный ток, значение которого равно амплитуде синусоидального, нагреет тот же проводник сильнее. Чтобы нагреть проводник постоянным током на те же 100 °С, необходимо его значение уменьшить. Равновесие установится при токе, равном

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

Именно в действующих значениях тока и напряжения отградуированы шкалы измерительных приборов переменного тока. Вольтметр, включенный в розетку промышленной сети, покажет напряжение 220 В. Это действующее значение синусоидального напряжения, амплитудное значение которого равно 311 В.

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

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

$$I/I_{ср} = (I_m/\sqrt{2})/(2I_m/\pi) = 1{,}11.$$

Именно в 1,11 раза показания прибора магнитоэлектрической системы с выпрямителем будут меньше 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 или период $f = 1/T$;
- начальную фазу ψ.

В линейных цепях синусоидальная ЭДС создает синусоидальный ток как в ветви с активным сопротивлением, так и в ветви с емкостью и индуктивностью. Однако в отличие от постоянного тока в ЭЦ переменного тока на отдельных участках напряжение и ток могут не совпадать по фазе, т. е. их начальные фазы ψ_U и ψ_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 свойствами инерционности.

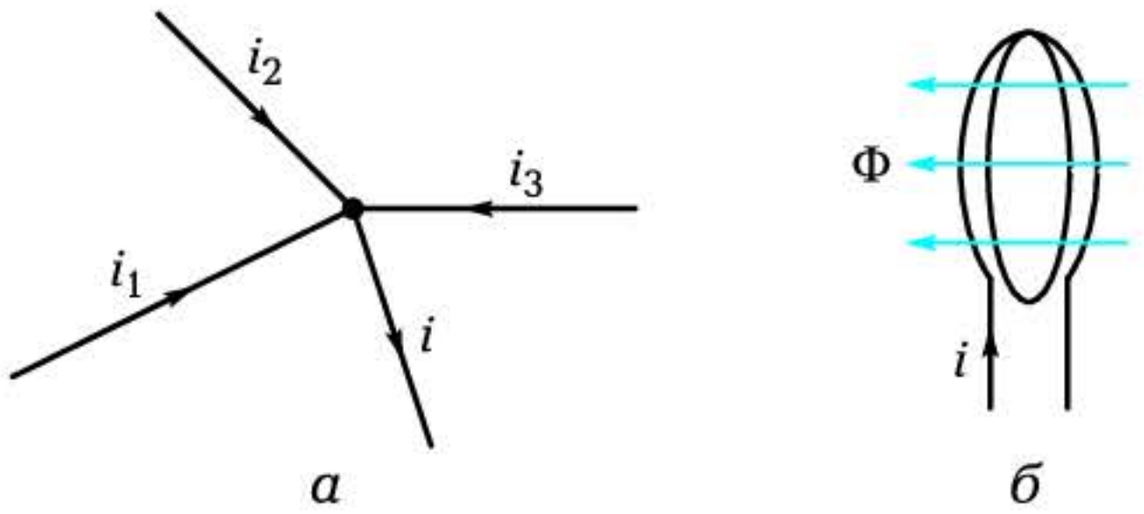
2.1.2. Векторные диаграммы

Поскольку синусоидальная функция описывается амплитудой и начальной фазой, то она может быть изображена вектором, длина которого пропорциональна амплитуде, а полярный угол — начальной фазе.

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

$$i_1 = I_{1m}\sin(\omega t + \psi_1);$$
$$i_2 = I_{2m}\sin(\omega t - \psi_2);$$
$$i_3 = I_{3m}\sin(\omega t + \psi_3).$$

Например, если заданы токи в узле ЭЦ (рис. 2.2, *а*), то в соответствии с первым законом Кирхгофа результирующий ток $i = i_1 + i_2 + i_3$.



а *б*

Рис. 2.2. Узел электрической цепи с четырьмя токами (*а*); контур с током (*б*)

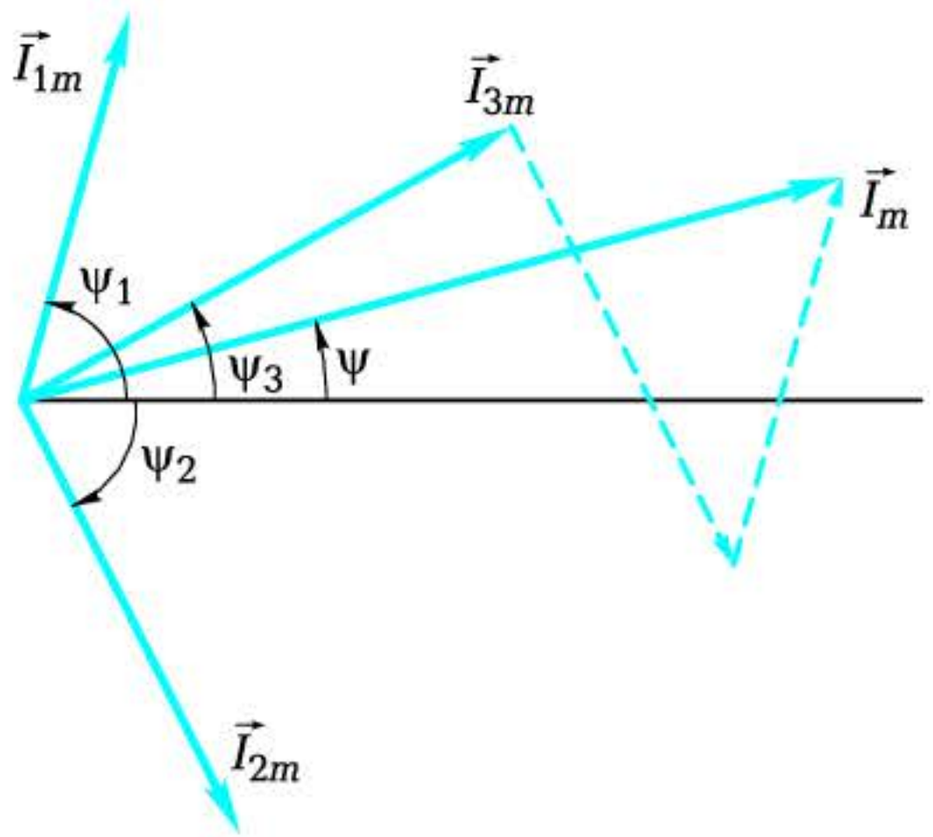


Рис. 2.3. Векторная диаграмма токов

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 и, соответственно, амплитудное значение тока I_m и его начальную фазу ψ (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*). Конденсатор обладает свойством накапливать и удерживать на проводниках (обкладках) равные по величине и противоположные по знаку электрические заряды.

Отношение заряда q одной из обкладок к напряжению U между ними — величина постоянная, называемая емкостью конденсатора:

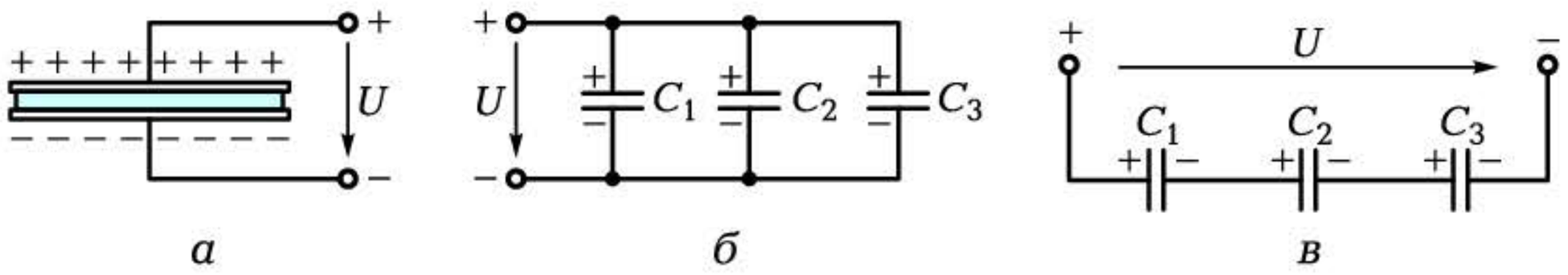


Рис. 2.4. Конденсатор (*а*); параллельное (*б*) и последовательное (*в*) соединение нескольких конденсаторов

$$C = q/U.$$

Единицей емкости служит фарад (Ф).

Один фарад — это емкость конденсатора, заряд которого равен 1 Кл при напряжении 1 В. Величина эта чрезвычайно значительна (емкость земного шара равна 6 Ф), поэтому на практике пользуются кратными величинами: микрофарад (1 мкФ = $1 \cdot 10^{-6}$ Ф), нанофарад (1 нФ = $1 \cdot 10^{-9}$ Ф) и пикофарад (1 пФ = $1 \cdot 10^{-12}$ Ф).

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

$$C = \varepsilon\, \varepsilon_0 S/d,$$

где S — площадь обкладки; d — расстояние между обкладками; ε_0 — электрическая постоянная (абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума), равная $8{,}86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Для повышения емкости конденсатора используются материалы с большой относительной диэлектрической проницаемостью. У отдельных видов керамики ε достигает нескольких тысяч (например, у $BaTiO_3$ — 5 000).

В то же время при необходимости увеличения емкости можно воспользоваться соединением нескольких конденсаторов *параллельно* между собой (рис. 2.4, *б*). При этом как бы увеличивается площадь обкладок и общая емкость равна сумме емкостей каждого конденсатора:

$$C_{общ} = C_1 + C_2 + C_3.$$

Если отдельные конденсаторы включить *последовательно* (рис. 2.4, *в*), то общая емкость конденсаторов уменьшается. Она может быть вычислена по формуле

$$1/C_{общ} = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3.$$

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

Если к зажимам конденсатора подвести синусоидальное напряжение

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

то заряд также изменяется синусоидально:

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

Поскольку ток — это скорость изменения заряда, то

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

Таким образом, ток в электрической цепи с емкостью изменяется синусоидально, *опережая напряжение по фазе на 90°*.

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

$$X_C = 1/(\omega C).$$

Это сопротивление получило название *реактивного емкостного* сопротивления. Оно измеряется в омах и обратно пропорционально зависит от частоты приложенного напряжения и емкости.

2.1.4. Индуктивность

Если в контуре течет синусоидальный ток $i = I_m \sin \omega t$, то он создает в контуре синусоидальный магнитный поток Φ (рис. 2.2, *б*).

Причем этот магнитный поток пропорционален току, который его создает.

Индуктивностью L (или коэффициентом самоиндукции) называется коэффициент пропорциональности между магнитным потоком и током:

$$\Phi = Li.$$

Индуктивность измеряется в генри (Гн). Она зависит от геометрических размеров и формы контура (для катушки: S — пло-

щадь сечения; l — длина; w — число витков), от свойств окружающей среды (магнитной проницаемости μ):

$$L = \mu_0 \mu w^2 S/l,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная (магнитная проницаемость) воздуха.

Созданный магнитный поток, пересекая контур, наводит в нем (в соответствии с законом электромагнитной индукции) ЭДС e_L, которая равна скорости изменения магнитного потока Φ. Эта ЭДС уравновешивает приложенное напряжение u и направлена навстречу ему:

$$e_L = -u.$$

Тогда $u = \Delta\Phi/\Delta t = L\Delta i/\Delta t = L\Delta(I_m \sin \omega t)/\Delta t = \omega L I_m \cos \omega t = U_m \sin(\omega t + 90°)$, т. е. напряжение также изменяется синусоидально, *опережая* ток на 90°.

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

$$X_L = \omega L.$$

Это сопротивление получило название *реактивного индуктивного* сопротивления. Оно измеряется в омах и прямо пропорционально зависит от частоты приложенного напряжения ω и индуктивности L.

Итак, в индуктивной катушке *ток отстает по фазе от приложенного напряжения на 90°* (он как бы «запутался» в витках катушки и пришел на второй ее конец позже).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что собой представляет переменный электрический ток?
2. Назовите основные параметры синусоидального тока.
3. Дайте определение действующего значения синусоидального тока.
4. Пользуясь векторной диаграммой, найдите сумму двух мгновенных значений синусоидальных токов.
5. Дайте определения емкости и емкостного сопротивления.
6. Чему равен угол сдвига фаз между током и напряжением в ветви с емкостью (индуктивностью)?
7. Дайте определения индуктивности и индуктивного сопротивления.

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

2.2.1. Цепь с активным сопротивлением

Пусть к ЭЦ с сопротивлением R (рис. 2.5, *а*) приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$. Тогда ток в цепи $i = u/R = (U_m/R)\sin \omega t = I_m \sin \omega t$, т. е. он совпадает по фазе с приложенным напряжением (рис. 2.5, *б*).

Векторная диаграмма имеет вид, приведенный на рис. 2.5, *в*.

Мгновенная мощность в цепи с активным сопротивлением

$$p = u \cdot i = U_m I_m \sin^2 \omega t = U_m I_m/2 - (U_m I_m/2)\cos 2\omega t = \\ = UI - UI \cos 2\omega t = P - P \cos 2\omega t.$$

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 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.

Такая мощность называется активной, обозначается символом P и измеряется в ваттах (Вт).

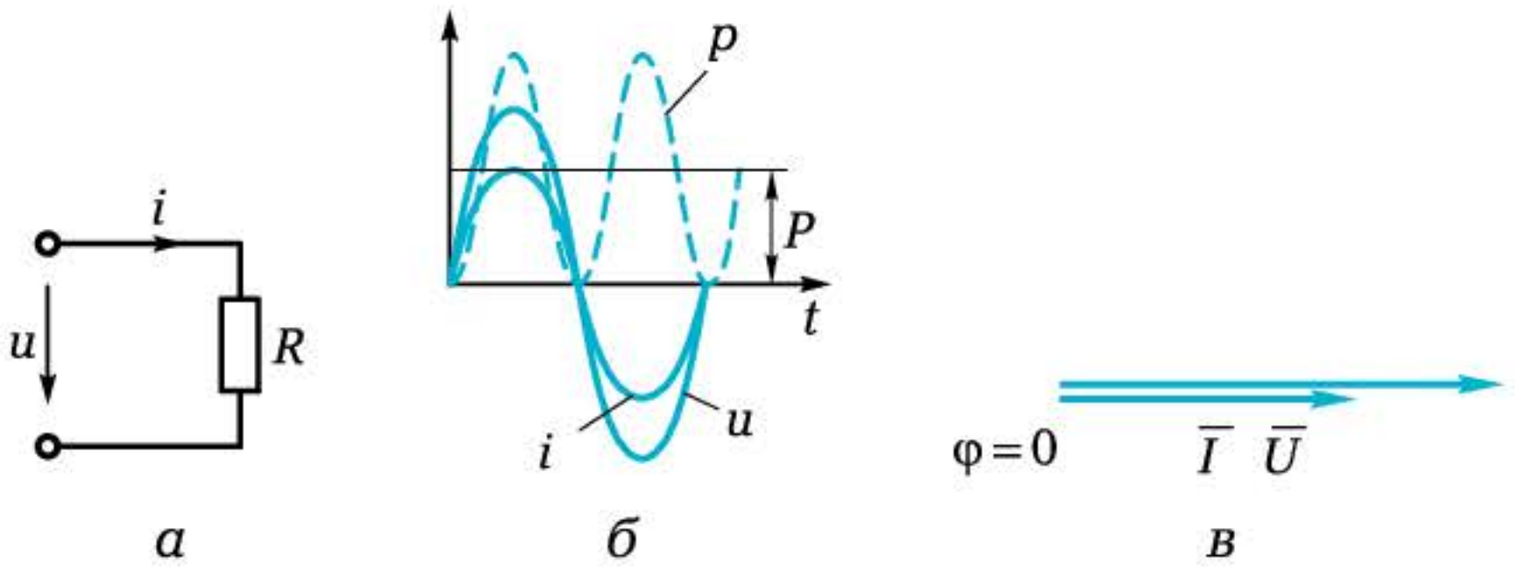


Рис. 2.5. Электрическая цепь с активным сопротивлением:
а — схема ЭЦ; *б* — временна́я диаграмма; *в* — векторная диаграмма

2.2.2. Цепь с индуктивностью

Пусть в ЭЦ (рис. 2.6, *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° (рис. 2.6, *б*). Векторная диаграмма цепи с идеальной катушкой индуктивности принимает вид, приведенный на рис. 2.6, *в*.

Мгновенная мощность в цепи с индуктивностью

$$p = ui = U_m \cos \omega t \cdot I_m \sin \omega t = (U_m I_m / 2) \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t.$$

Мгновенная мощность изменяется с двойной частотой. При нарастании тока (независимо от его направления) происходит накопление энергии магнитного поля, которая поступает из сети, от нуля до максимального значения. Таким образом, цепь работает в режиме потребителя.

При уменьшении тока происходит уменьшение энергии магнитного поля катушки 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 индуктивной катушкой.

Средняя мощность за период равна нулю, активная мощность P также равна нулю. Максимальное значение мощности в цепи

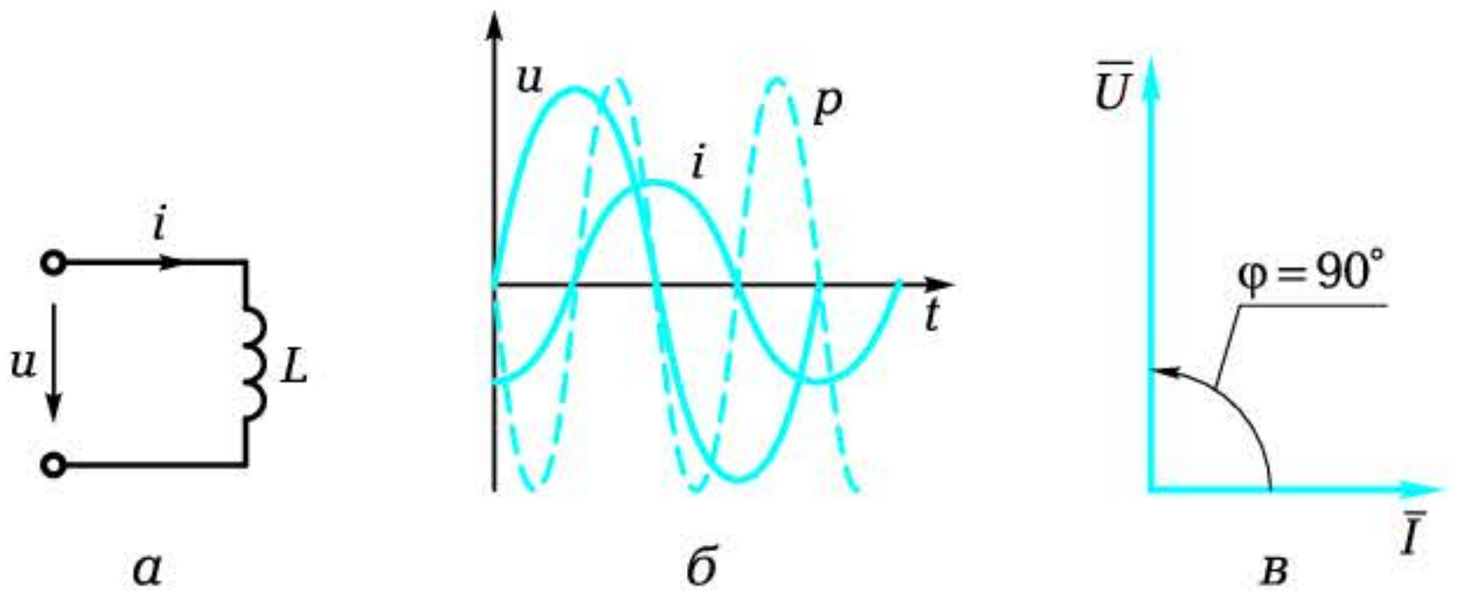


Рис. 2.6. Электрическая цепь с идеальной катушкой индуктивности:
а — схема ЭЦ; *б* — временна́я диаграмма; *в* — векторная диаграмма

с индуктивностью принято называть реактивной мощностью и обозначать символом Q_L:

$$Q_L = U_L I = I^2 \omega L = U_L^2 / \omega L.$$

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, поскольку выполнена медным или алюминиевым проводом (рис. 2.7, *а*).

Тогда в соответствии со вторым законом Кирхгофа $u = u_R + u_L$, или применительно к векторам $\bar{U} = \bar{U}_R + \bar{U}_L$. Векторная диаграмма в этом случае имеет вид, приведенный на рис. 2.7, *б*.

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

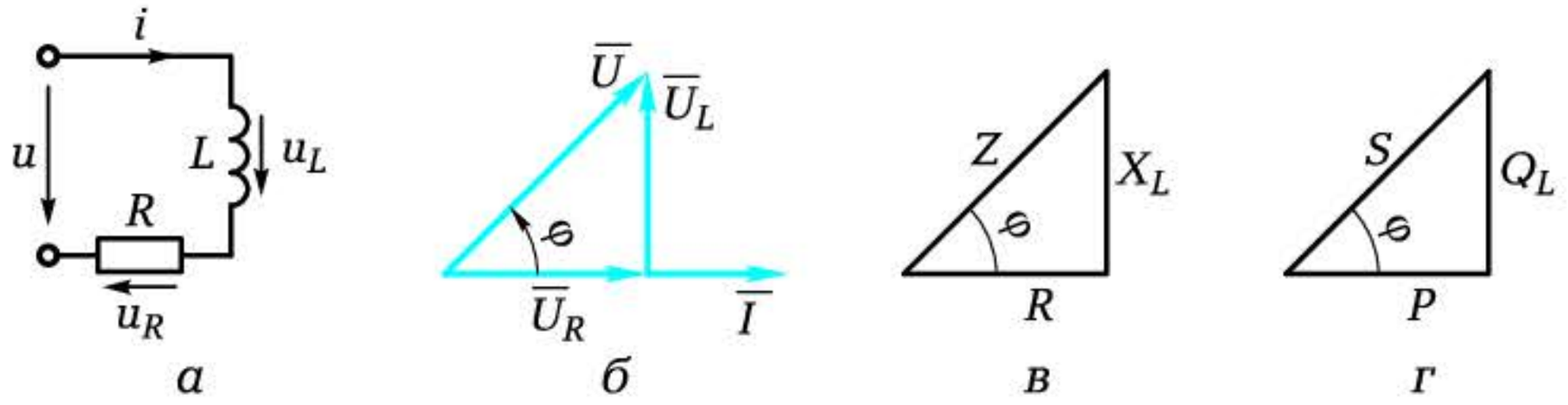
$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}, \text{ или } IZ = \sqrt{(IR)^2 + (IX_L)^2}.$$

Отсюда выражение для треугольника сопротивлений принимает вид (рис. 2.7, *в*)

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

где Z — полное сопротивление; R — активное сопротивление; X_L — индуктивное сопротивление, измеряемое в омах.

Из треугольника сопротивлений следует, что угол φ зависит только от параметров цепи R и X_L. Значение угла откладывается от направления тока I.



а *б* *в* *г*

Рис. 2.7. Электрическая цепь с реальной катушкой индуктивности:
а — схема ЭЦ; *б* — треугольник напряжений; *в* — треугольник сопротивлений; *г* — треугольник мощностей

Умножив выражение для треугольника сопротивлений на квадрат силы тока, получим выражение для треугольника мощностей (рис. 2.7, *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).

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. 2.8, *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° (рис. 2.8, *б*). Векторная диаграмма цепи с емкостью принимает вид, приведенный на рис. 2.8, *в*.

Мгновенная мощность в цепи с емкостью

$$p = ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \cos \omega t = (U_m I_m / 2) \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t,$$

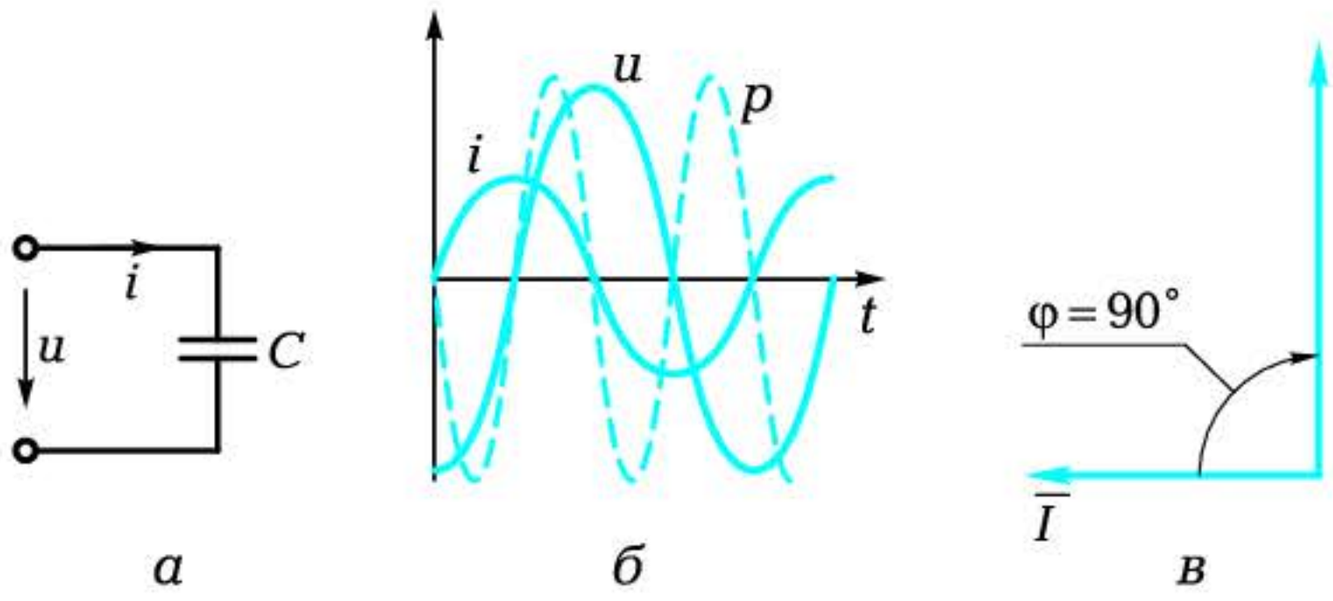
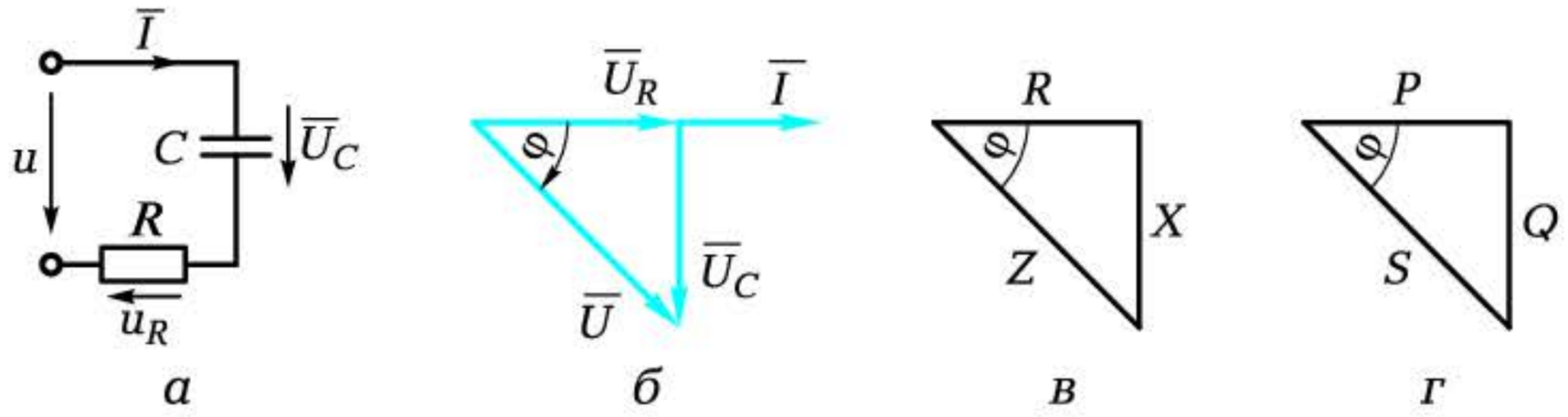


Рис. 2.8. Электрическая цепь с емкостью:

а — схема ЭЦ; *б* — временна́я диаграмма; *в* — векторная диаграмма



а *б* *в* *г*

Рис. 2.9. Электрическая цепь с емкостью и активным сопротивлением:
а — схема ЭЦ; *б* — треугольник напряжений; *в* — треугольник сопротивлений; *г* — треугольник мощностей

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 индуктивностью, энергия от сети не расходуется, а происходит периодический обмен ею между источником и конденсатором.

Максимальное значение мощности в цепи с емкостью принято называть реактивной мощностью $Q_C = U_C I = I^2/(\omega C)$.

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. 2.9, *а*) могут быть проанализированы по аналогии с цепью, содержащей индуктивность и активное сопротивление.

Отметим только, что напряжение цепи отстает от тока на угол φ (рис. 2.9, *б*). При этом полное сопротивление $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ можно найти из треугольника сопротивлений (рис. 2.9, *в*), а полную мощность $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ — из треугольника мощностей (рис. 2.9, *г*).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что характерно для электрической цепи с активным сопротивлением?

2. Что характерно для электрической цепи с индуктивным сопротивлением?
3. Что характерно для электрической цепи с емкостным сопротивлением?
4. Что собой представляют треугольники сопротивлений, напряжений, мощностей?
5. В каких единицах измеряются реактивные сопротивления и мощности?

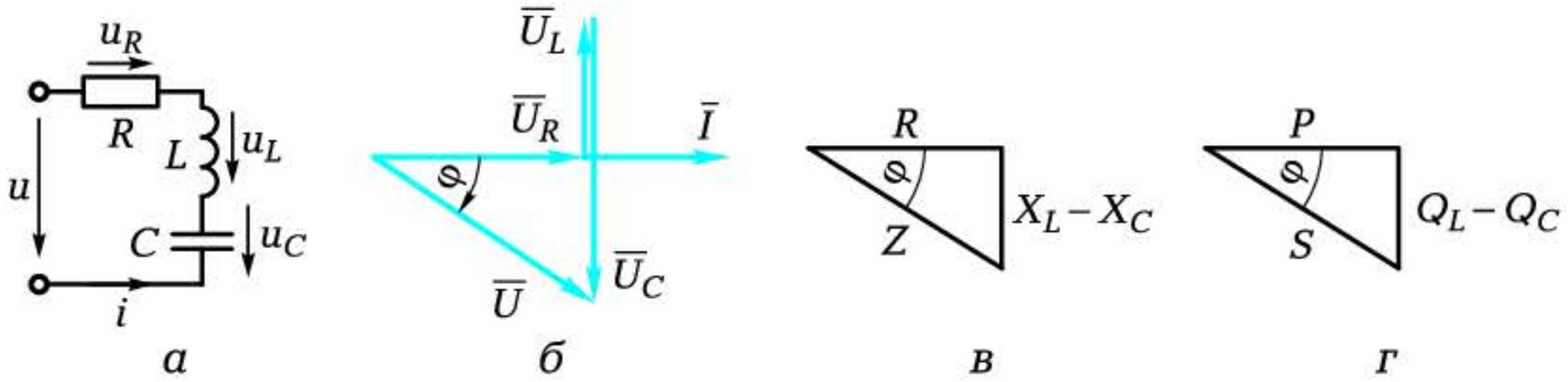
2.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ КОНДЕНСАТОРА И КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

2.3.1. Колебательный контур

Совместное включение индуктивной катушки и конденсатора позволяет получить ЭЦ, в которой при определенных условиях может возникнуть колебательный процесс. Определяется он способностью конденсатора разряжаться на индуктивную катушку с преобразованием электрической энергии в магнитную и затем способностью магнитного поля катушки перезаряжать конденсатор, возвращая ему электрическую энергию. Такая цепь получила название *колебательного контура*. 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 организован как при последовательном включении индуктивной катушки и конденсатора, так и при параллельном.

2.3.2. Последовательное включение индуктивной катушки и конденсатора

Для неразветвленной ЭЦ, содержащей индуктивную катушку с активным сопротивлением R и индуктивностью L и конденсатор с емкостью C (рис. 2.10, *а*), полное сопротивление:



а *б* *в* *г*

Рис. 2.10. Электрическая цепь с реальной индуктивной катушкой и конденсатором:

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

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

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

Если $X_L < X_C$, то ЭЦ носит емкостный 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 — $\overline{U} = \overline{U}_R + \overline{U}_C + \overline{U}_L$. Векторную диаграмму напряжений строим относительно общего для всех элементов ЭЦ тока I (рис. 2.10, *б*). Треугольник сопротивлений принимает вид, приведенный на рис. 2.10, *в*, а треугольник мощностей — на рис. 2.10, *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 электрической цепи, совпадают с вынужденными колебаниями, поступающими от источника питания. При этом $U = IR$, т.е. сдвиг фаз между U и I отсутствует. Величина тока $I = U/R$ максимальна, так как минимальна величина сопротивления ($Z = R$). В связи с этим напряжения на катушке индуктивности и конденсаторе ($U_L = U_C$) возрастают и могут значительно превышать напряжение питания, если $X_L = X_C >> R$.

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

Резонансная частота 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

$$f_{\text{рез}} = 1/(2\pi\sqrt{LC}).$$

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

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

Поскольку при резонансе напряжений ток в цепи определяется только лишь активной составляющей сопротивления цепи, обмен реактивной мощностью 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 $\cos\varphi = P/S = 1$.

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

Следствием же резонанса являются:

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

Получение резонанса напряжений возможно либо за счет изменения частоты источника питания, либо за счет изменения собственной частоты контура, т. е. индуктивности L или емкости C. На практике чаще используется переменная емкость, изменение которой позволяет настроить контур в резонанс. При этом индук-

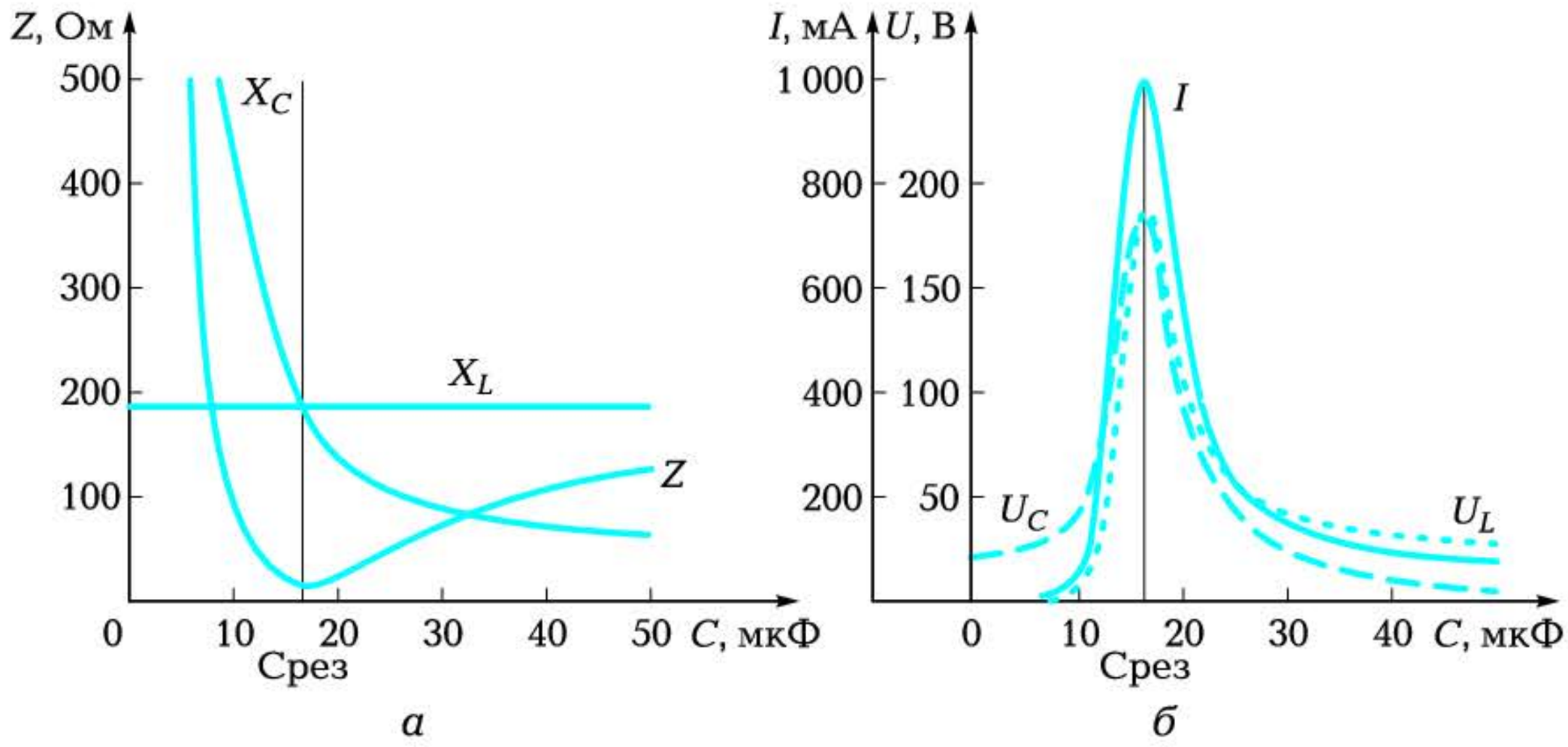


Рис. 2.11. Графики изменения сопротивлений (*а*), тока и напряжений (*б*) на элементах ЭЦ

тивное сопротивление $X_L = 2\pi fL$ остается неизменным, 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. 2.11, *а*), что ведет к изменению тока $I = U/Z$, потребляемого ею, и напряжения на элементах цепи $U_L = IX_L$ и $U_C = IX_C$ (рис. 2.11, *б*).

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимается под резонансом напряжений?
2. Назовите условие и следствия резонанса напряжений.
3. Поясните графики изменения тока и напряжений в электрической цепи при изменении емкости.
4. Изобразите с помощью векторных диаграмм момент резонанса напряжений.
5. Какими параметрами определяется резонансная частота?
6. Почему резонанс напряжений — явление опасное?
7. Где используется явление резонанса напряжений?

2.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ КОНДЕНСАТОРА И КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ. РЕЗОНАНС ТОКОВ

2.4.1. Понятие проводимостей на переменном токе

По аналогии с постоянным током при параллельном соединении элементов ЭЦ анализ проще вести, пользуясь понятиями проводимостей. В цепях переменного тока существует три проводимости: полная (y), активная (q) и реактивная (b).

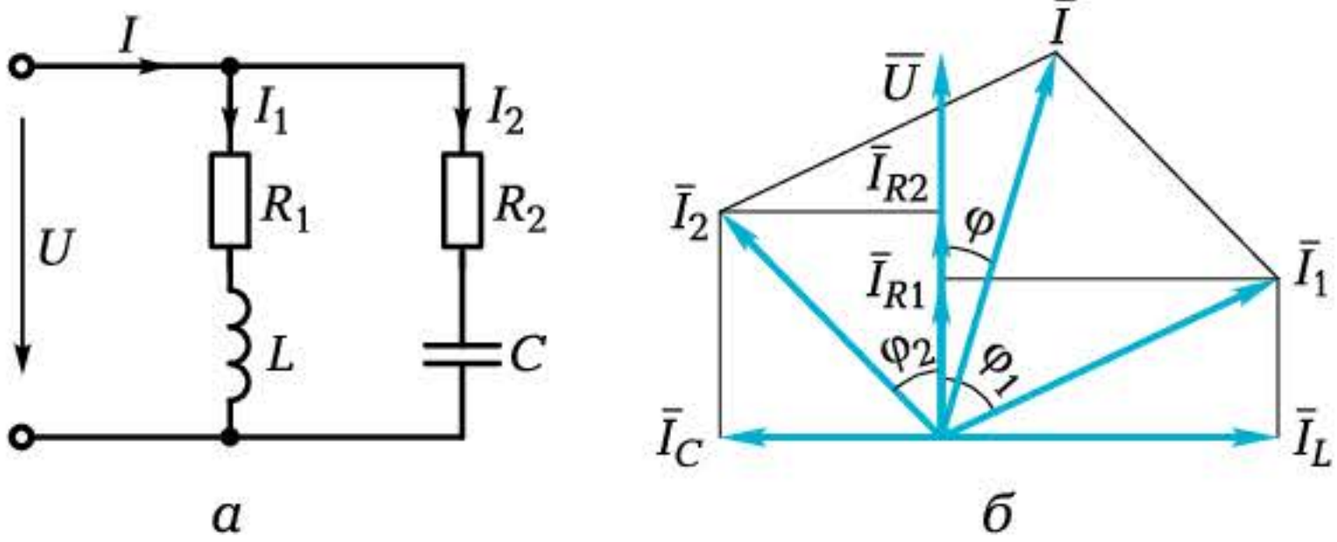
Пусть для ЭЦ (рис. 2.12, *а*) известны U, R_1, R_2, L и C. Для определения токов в ветвях и построения векторной диаграммы воспользуемся следующими формулами:

$$I_1 = U/Z_1;\ I_2 = U/Z_2;\ \cos\varphi_1 = R_1/Z_1;\ \cos\varphi_2 = R_2/Z_2;\ \sin\varphi_1 = X_L/Z_1;\ \sin\varphi_2 = X_C/Z_2.$$

В этом случае активные и реактивные составляющие токов:

$$I_{1R} = I_1\cos\varphi_1 = UR_1/Z_1^2 = Uq_1;\ I_{2R} = Uq_2;\ I_L = I_1\sin\varphi_1 = UX_L/Z_1^2 = Ub_L;\ I_C = Ub_C,$$

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 прово-



а *б*

Рис. 2.12. Схема ЭЦ с параллельным включением индуктивной катушки и конденсатора с резистором (*а*) и векторная диаграмма (*б*)

димостей (b_L — индуктивная; b_C — емкостная); $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_L^2}$ 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. 2.12, *б*) начинаем с вектора напряжения U, так как оно является общим для двух параллельных ветвей.

Векторы составляющих токов откладываем под соответствующими углами: для активных составляющих $\varphi = 0$, для реактивных $\varphi_1 = 90°$ (для L) и $\varphi_2 = -90°$ (для C).

На основании активных и реактивных составляющих токов строим векторы токов I_1 и I_2, далее по правилу параллелограмма находим общий ток I, потребляемый цепью, и угол сдвига фаз между током и напряжением φ.

2.4.2. Резонанс токов

При параллельном соединении источника и колебательного контура, состоящего из катушки индуктивности и конденсатора, может иметь место явление *резонанса токов*.

В общем случае угол φ между общим током цепи и напряжением может изменяться от $-\pi/2$ до $+\pi/2$ и определяется соотношением реактивных составляющих токов ветвей с индуктивностью и емкостью. Равенство их наступает при равенстве реактивных проводимостей ($b_L = b_C$). В этом случае $\varphi = 0$, общий ток I совпадает по фазе с напряжением источника U. При этом ток I имеет только активную составляющую. Ток, потребляемый ЭЦ, определяется лишь активной проводимостью $q = R/Z^2$.

В идеальном случае при $R_1 = R_2 = 0$ активная проводимость q равна нулю и общий потребляемый ток $I = Uq$ также равен нулю. Однако токи в ветвях с индуктивностью I_L и емкостью I_C отличаются от нуля, равны и противоположны по фазе. При этом ток в случае $b_L = b_C >> q$ может достигать значительных значений. Поэтому данное явление получило название резонанс токов.

Энергетические процессы в цепи 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. Коэффициент мощности и пути его повышения

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 обусловливает неполное использование мощности генераторов, линий передач и трансформаторов. Они бесполезно загружаются реактивным током индуктивного характера. Кроме того, низкий коэффициент мощности требует большей площади сечения подводящих проводов.

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 разгрузить источники энергии и передающие устройства от бесполезных колебаний энергии, замкнув их в контуре, образуемом индуктивной катушкой и конденсатором (рис. 2.13, *а*).

Подключение параллельно двигателю батареи конденсаторов $C_к$ или синхронной машины переменного тока, работающей в режиме компенсатора, позволяет уменьшить реактивную составляющую тока, а следовательно, снизить реактивную мощность $Q = Q_L - Q_C$ и тем самым повысить коэффициент мощности $\cos\varphi$ (рис. 2.13, *б*).

Здесь $I_{L\text{дв}}$ — реактивный ток до компенсации, $I_{\text{р.к}}$ — реактивный ток после компенсации, $I_к$ — реактивный ток в ветви с кон-

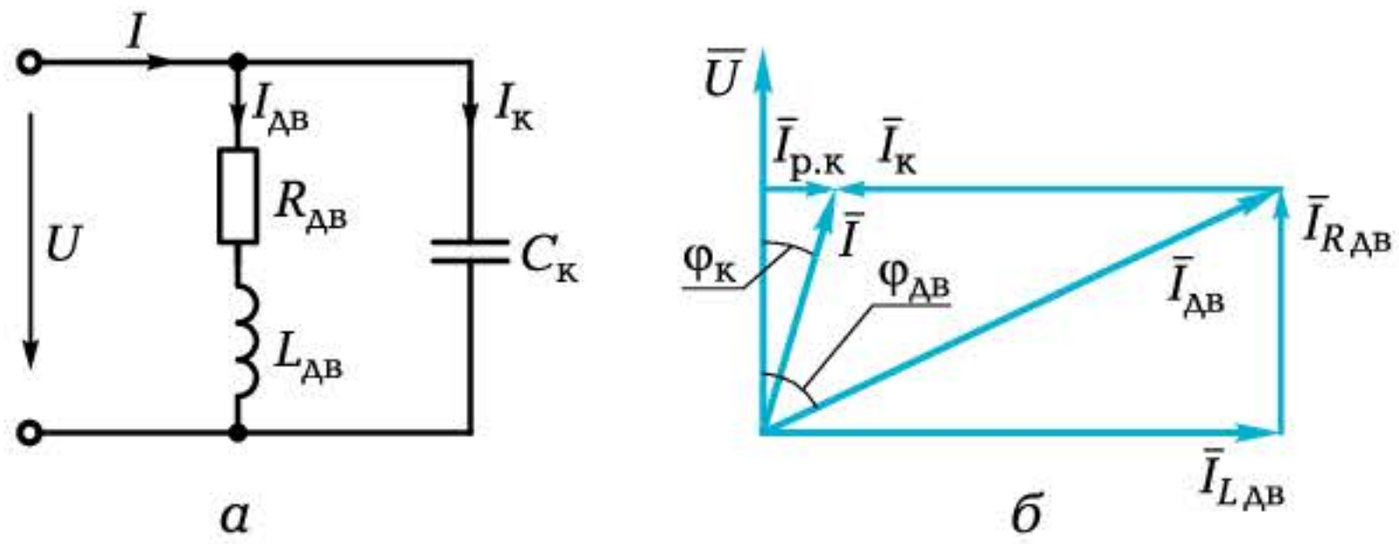


Рис. 2.13. Схема ЭЦ с обмоткой двигателя и параллельно включенным конденсатором (*а*) и векторная диаграмма (*б*)

денсатором, $\varphi_{ДВ}$ — угол сдвига фаз между током и напряжением до компенсации, $\varphi_К$ — угол сдвига фаз между током и напряжением после компенсации.

Предприятиям устанавливается вполне определенная величина cosφ (от 0,95 до 0,98). За невыполнение заданной величины cosφ предприятия подвергают штрафу, поэтому главные энергетики борются за повышение коэффициента мощности даже на сотые доли.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое резонанс токов и при каких условиях он возникает?
2. Что характерно для резонанса токов?
3. К чему стремится ток, потребляемый цепью при резонансе?
4. Где используется явление резонанса токов?
5. Что такое коэффициент мощности и что он определяет?

2.5. НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

2.5.1. Несинусоидальные токи

Любой элемент ЭЦ обладает той или иной нелинейностью. У одних элементов ею пренебрегают (например, у резистора, хотя на высоких частотах нельзя не считаться с изменением R за счет поверхностного эффекта), у других же она явно выражена (диод, стабилитрон, катушка со стальным сердечником и др.)

- Первая причина появления в ЭЦ несинусоидального тока — это наличие в ней нелинейного элемента. Например, на выходе выпрямителя, основу которого составляет диод, синусоидальное напряжение превращается в пульсирующее.
- Вторая причина: несинусоидальный ток может быть создан специальными несинусоидальными генераторами треугольных, пилообразных, прямоугольных и других колебаний, которые будут рассмотрены далее.

В основу расчета ЭЦ, работающей при несинусоидальном токе, положены

- две теоремы.

Теорема № 1. Любая периодически изменяющаяся величина $u(t)$ может рассматриваться как сумма постоянной величины U_0 и ряда синусоидальных величин с кратными частотами (теорема Фурье):

$$u(t) = U_0 + U_{1m}\sin(\omega t + \psi_1) + U_{2m}\sin(2\omega t + \psi_2) + \ldots + U_{km}\sin(k\omega t + \psi_k).$$

Эквивалентная схема цепи для этого случая приведена на рис. 2.14.

Теорема № 2. Ток в цепи, содержащей несколько источников питания, может быть определен с помощью метода наложения (метода суперпозиции):

$$i(t) = U_0/Z_0 + (U_{1m}/Z_1)\sin(\omega t + \psi_1 + \varphi_1) + (U_{2m}/Z_2)\sin(2\omega t + \psi_2 + \varphi_2) + \\ + \ldots\ldots\ldots + (U_{km}/Z_k)\sin(k\omega t + \psi_k + \varphi_k).$$

В общем случае сопротивление нагрузки для несинусоидального тока является величиной переменной и зависит от частоты гармоник. Так, индуктивное сопротивление пропорционально ча-

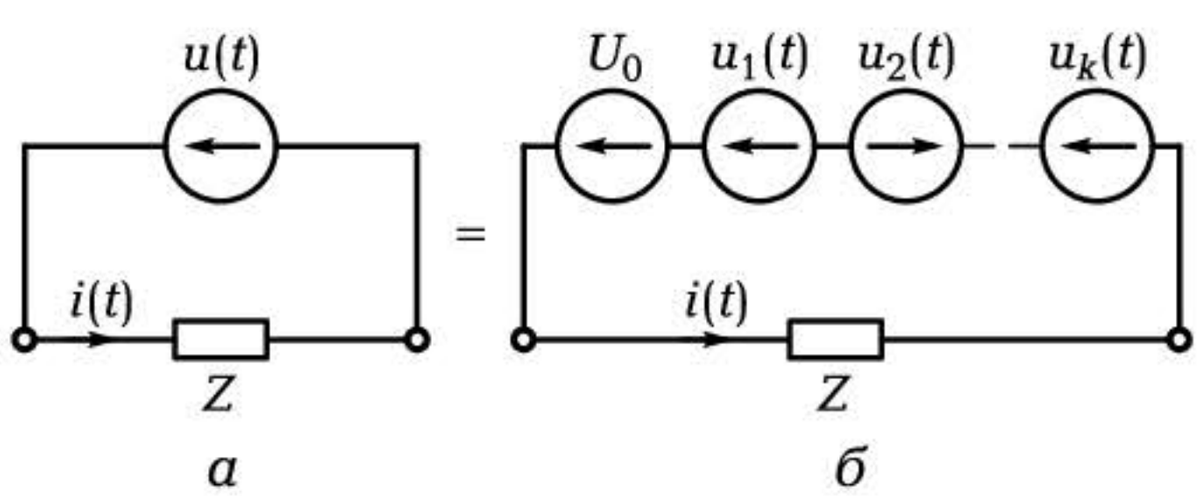


Рис. 2.14. Электрическая цепь с несинусоидальной ЭДС:

а — схема ЭЦ; *б* — эквивалентная схема ЭЦ с гармоническими источниками

стоте и возрастает с увеличением порядкового номера гармоники: $X_{Lk} = k\omega L$. Емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте и уменьшается с увеличением порядкового номера гармоники: $X_{Ck} = 1/(k\omega C)$.

Действующие значения несинусоидального тока и напряжения

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots I_k^2};\ \ U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots U_k^2}.$$

Активная мощность $P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos\varphi_1 + U_2 I_2 \cos\varphi_2 + \dots + U_k I_k \cos\varphi_k$.

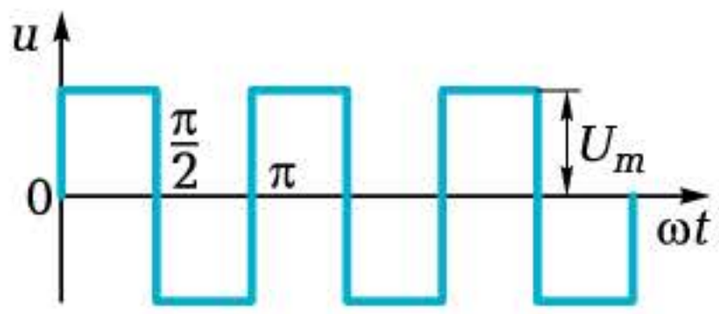
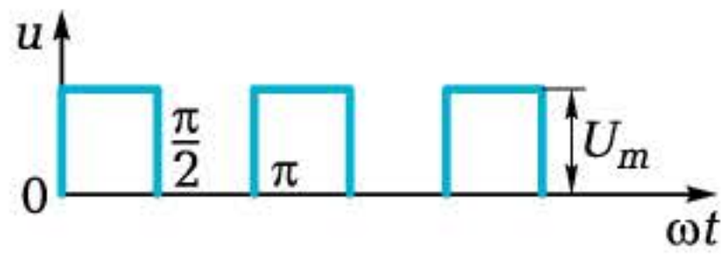
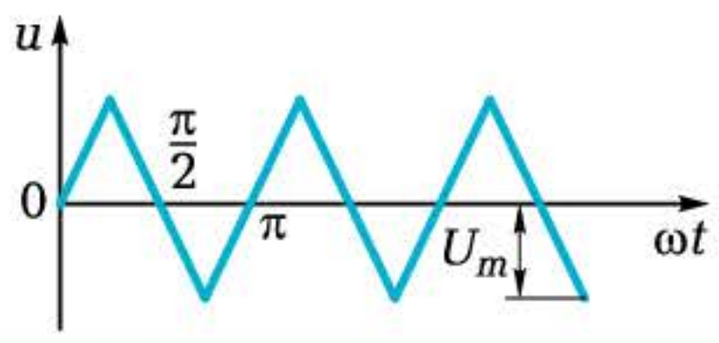
Реактивная мощность $Q = U_1 I_1 \sin\varphi_1 + U_2 I_2 \sin\varphi_2 + \dots + U_k I_k \sin\varphi_k$.

Для расчета ЭЦ, работающей при несинусоидальной ЭДС, основная задача — представление временно́й функции в виде ряда Фурье.

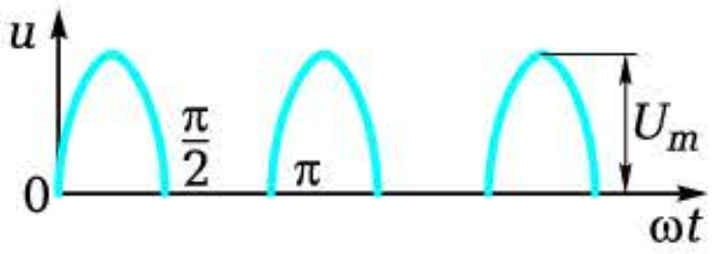
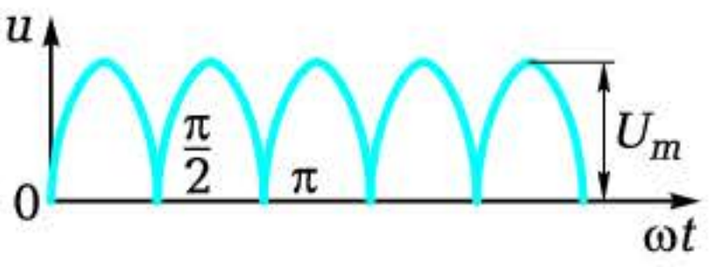
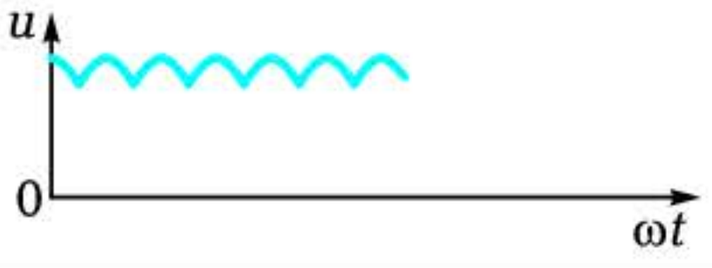
2.5.2. Ряды Фурье для наиболее типичных видов несинусоидальных напряжений

Наиболее характерные и часто встречающиеся на практике виды несинусоидальных напряжений и их разложение в ряд Фурье приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Форма гармонических колебаний	Гармонический ряд Фурье
	$u = 4U_m/\pi(\sin\omega t + {}^1/_3 \sin 3\omega t + {}^1/_5 \sin 5\omega t + \dots)$
	$u = U_m/2 + 2U_m/\pi(\sin\omega t + {}^1/_3 \sin 3\omega t + {}^1/_5 \sin 5\omega t + \dots)$
	$u = 8U_m/\pi^2\ (\sin\omega t - {}^1/_9 \sin 3\omega t + {}^1/_{25} \sin 5\omega t - {}^1/_{49} \sin 7\omega t \dots)$

Окончание табл. 2.1

Форма гармонических колебаний	Гармонический ряд Фурье
	$u = U_m/\pi(1 + \pi/2 \sin \omega t - {}^2/_3 \cos 2\omega t - {}^2/_{15} \cos 4\omega t - {}^2/_{35} \cos 6\omega t - \ldots)$
	$u = 2U_m/\pi(1 - {}^2/_3 \cos 2\omega t - {}^2/_{15} \cos 4\omega t - {}^2/_{35} \cos 6\omega t - \ldots)$
	$u = 3\sqrt{3}3U_m/2\pi(1 - {}^1/_4 \sin 3\omega t + {}^2/_{35} \cos 6\omega t + {}^1/_{40} \sin 9\omega t - {}^2/_{143} \cos 12\omega t - \ldots)$

2.5.3. Понятие переходного процесса

До сих пор рассматривались электрические цепи, работающие в стационарном режиме, т. е. когда в результате длительного действия источников питания в цепях устанавливаются постоянные или синусоидальные токи.

На практике часто встречаются случаи, когда необходимо знать поведение цепи или системы в переходном режиме, вызываемом коммутацией (включением или выключением) источников питания или изменением элементов электрической цепи: резисторов, конденсаторов или индуктивных катушек.

В электрических цепях, содержащих лишь активные сопротивления, переходные процессы отсутствуют, токи и напряжения устанавливаются практически мгновенно.

Если же в электрических цепях содержатся элементы, способные накапливать и отдавать энергию, то токи и напряжения устанавливаться мгновенно не могут, возникают переходные процессы. Такими элементами являются конденсатор с емкостью C и индуктивная катушка с индуктивностью L, обладающие инерционностью. Отсюда следуют два закона коммутации.

Первый закон. Ток в ветви с индуктивной катушкой изменяться скачком не может.

Второй закон. Напряжение на конденсаторе измениться скачком не может.

2.5.4. Переходный процесс в *RC*-цепи

В соответствии со вторым законом коммутации при установке ключа K в положение I (рис. 2.15, *а*)

напряжение u_C на конденсаторе будет постепенно повышаться до тех пор, пока не достигнет величины E (рис. 2.15, *б*). Конденсатор заряжается от источника через резистор R. В этом случае изменение напряжения определяется выражением $u_C = E\,(1 - \mathbf{e}^{-t/\tau})$, где $\tau = RC$ — постоянная времени; t — текущее время. Чем больше постоянная времени, тем дольше протекает переходный процесс. Считается, что он практически заканчивается за время $t = 3\,\tau$.

При переводе ключа K в положение II конденсатор C начинает разряжаться через резистор R в данном случае с той же постоянной времени $\tau = RC$. Напряжение на нем стремится к нулю (см. рис. 2.15, *б*), изменяясь по закону $u_C = E\mathbf{e}^{-t/\tau}$.

Переходные процессы в цепи с конденсатором называются *релаксационными*. Они широко используются в специальных генераторах для получения пилообразного или треугольного напряжения, например в целях создания развертки в электронно-лучевых осциллографах.

2.5.5. Переходный процесс в *RL*-цепи

В соответствии с первым законом коммутации при установке ключа K в положение I (рис. 2.16, *а*)

ток в ЭЦ повышается постепенно, стремясь к установившемуся значению $I_к = E/R_к$ (рис. 2.16, *б*). Скорость изменения тока определяется постоянной времени $\tau = L_к/R_к$. Чем меньше ак-

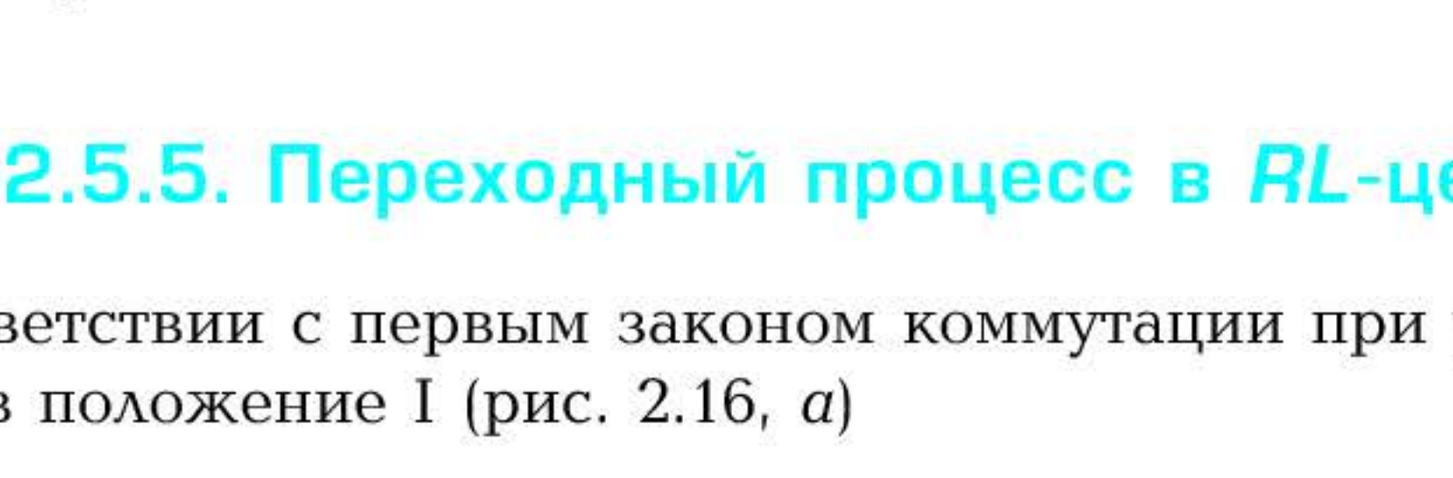
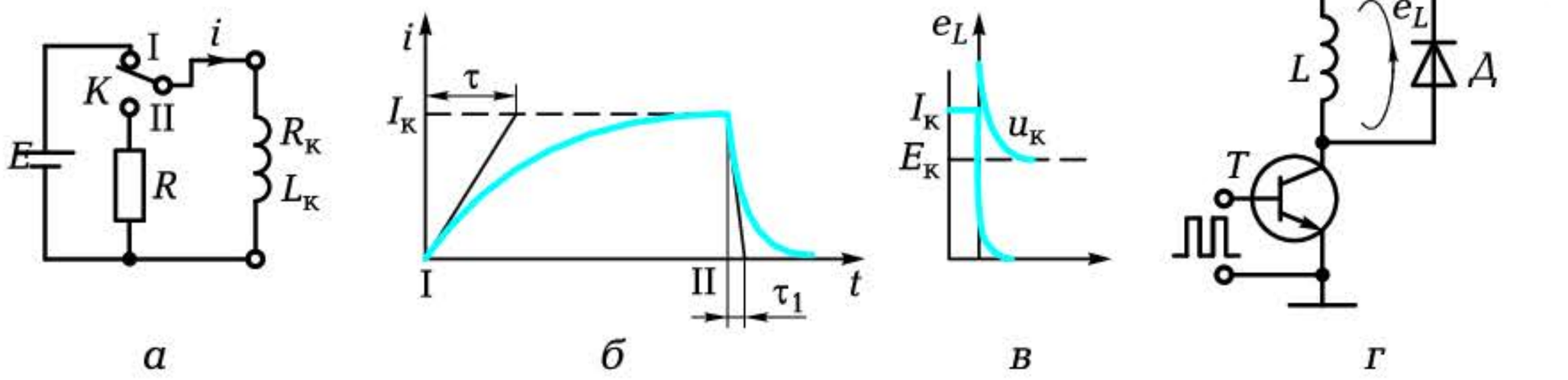


Рис. 2.15. Переходный процесс в ЭЦ с конденсатором:
а — схема испытаний; *б* — временна́я диаграмма



а *б* *в* *г*

Рис. 2.16. Переходный процесс в ЭЦ с индуктивной катушкой: *а* — схема испытаний; *б* — временна́я диаграмма; *в* — ЭДС самоиндукции при закрытии транзистора; *г* — схема защиты транзистора от ЭДС самоиндукции

тивное сопротивление $R_к$ катушки, обладающей индуктивностью $L_к$, тем дольше протекает переходный процесс.

При переводе ключа *K* в положение II индуктивная катушка начинает разряжаться в цепи с общим активным сопротивлением $(R + R_к)$ с постоянной времени $\tau_1 = L_к/(R + R_к)$. Ток в индуктивной катушке стремится к нулю (рис. 2.16, *б*), изменяясь по закону $i_L = I_к e^{-t/\tau 1}$. Поскольку постоянная времени $\tau_1 < \tau$, то скорость изменения тока $\Delta I/\Delta t$ возрастает и увеличивается ЭДС самоиндукции $e_L = -L(\Delta I/\Delta t)$ на выводах катушки. При простом размыкании ключа *K* постоянная времени стремится к нулю, а скорость изменения тока и ЭДС самоиндукции стремятся к бесконечности.

При работе электромагнитных устройств (например, реле) в комплексе с полупроводниковыми приборами (например, транзистором) такой режим работы может привести к выходу из строя полупроводникового прибора, поскольку напряжение на коллекторе $u_к = E_к + e_L$ может достигать значительной величины (рис. 2.16, *в*). Для исключения этого параллельно обмотке реле устанавливается диод *Д* (рис. 2.16, *г*), обеспечивающий разряд индуктивной катушки при закрытии транзистора *T* через сопротивление обмотки катушки и снижение ЭДС самоиндукции практически до нуля.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что является причиной появления несинусоидальных токов?
2. Какие две теоремы положены в основу расчета цепей при несинусоидальных токах?
3. Какие элементы являются причиной появления переходных процессов в электрических цепях?

4. Назовите два закона коммутации.
5. Охарактеризуйте переходный процесс в *RC*-цепи.
6. Охарактеризуйте переходный процесс в *RL*-цепи.
7. Запишите выражения для постоянной времени в *RC*- и *RL*-цепях.

Глава 3

ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

3.1. ПОЛУЧЕНИЕ ТРЕХФАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ. СПОСОБЫ СОЕДИНЕНИЯ ФАЗ ИСТОЧНИКА

3.1.1. Основные понятия о трехфазных электрических цепях

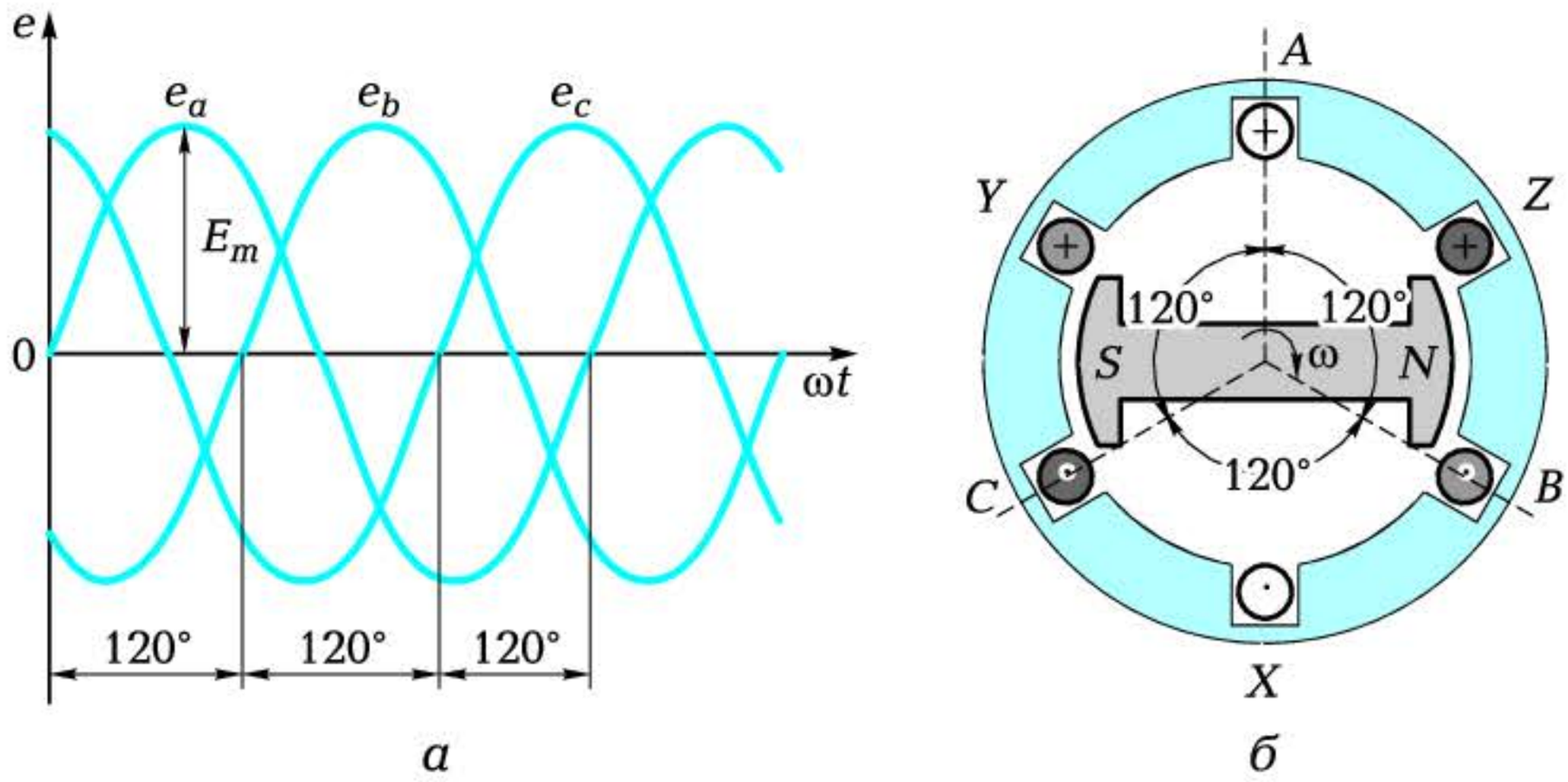
Наряду с однофазными цепями переменного синусоидального тока большое распространение в современной электроэнергетике получили трехфазные цепи благодаря следующим преимуществам:

- 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°.

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).

Для получения однофазного синусоидального напряжения использовалось вращение рамки в магнитном поле. Если вращать постоянный магнит с угловой скоростью ω, а вокруг него распо-



а *б*

Рис. 3.1. Временна́я диаграмма трехфазной системы ЭДС (*а*) и конструктивная схема генератора (*б*)

ложить обмотку, то в ней также в соответствии с законом электромагнитной индукции наведется синусоидальная ЭДС. Если три обмотки расположить под углом 120° друг относительно друга, то в них индуцируются ЭДС, сдвинутые на угол 120° (рис. 3.1, *а*). Поместив обмотки в пазы 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, включается по схеме *звезда*. При этом концы фаз X, Y, Z соединяются вместе, образуя нейтральную точку N, а начала фаз A, B, C подключаются к проводам, идущим к нагрузке (рис. 3.2).

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.

В том случае, если ЭДС каждой фазы равны и сдвинуты друг относительно друга на угол 120°, система называется *симметричной*.

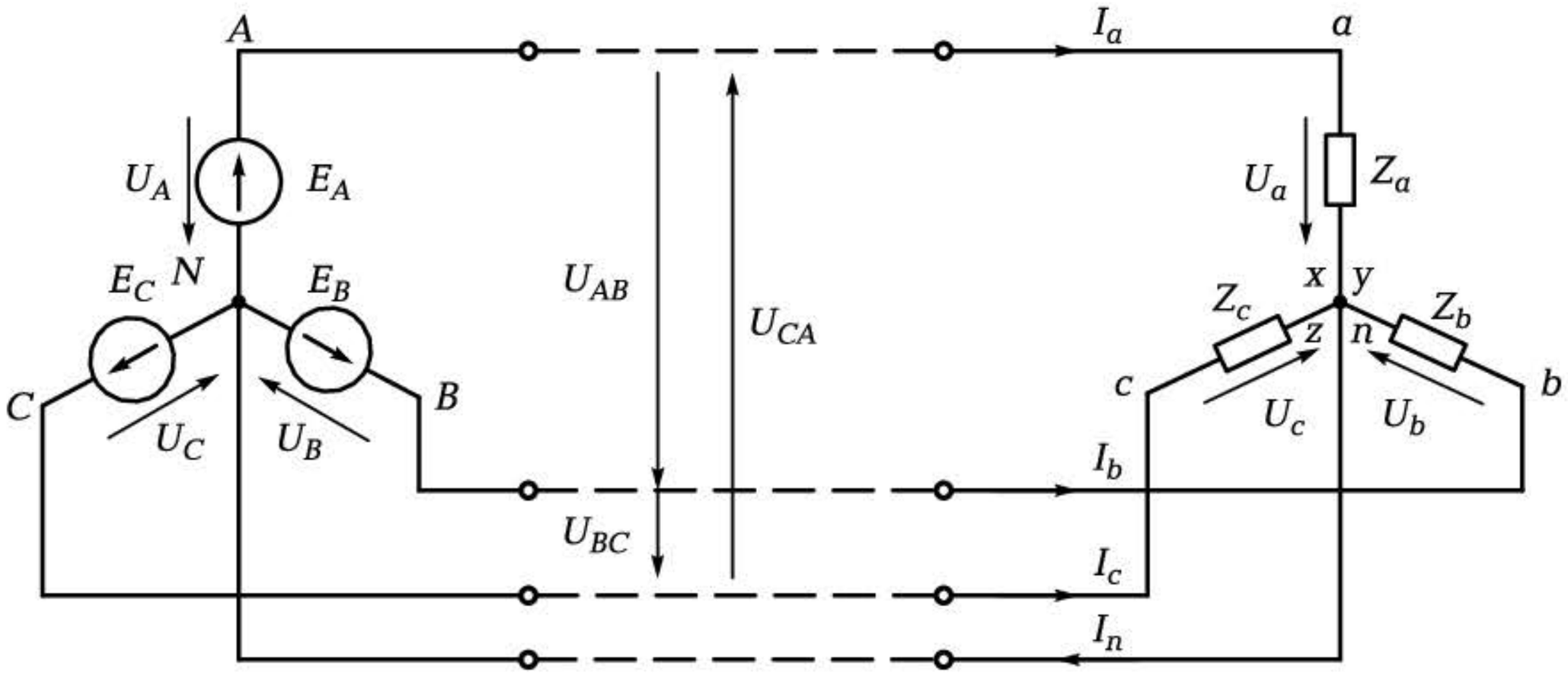


Рис. 3.2. Схема соединения звездой трехфазных источника и приемника

Приняв начальную фазу ψ фазы *A* равной нулю (см. рис. 3.1, *а*), можно выразить мгновенные значения ЭДС в фазах:

$$e_A = E_m \sin \omega t;$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120°);$$

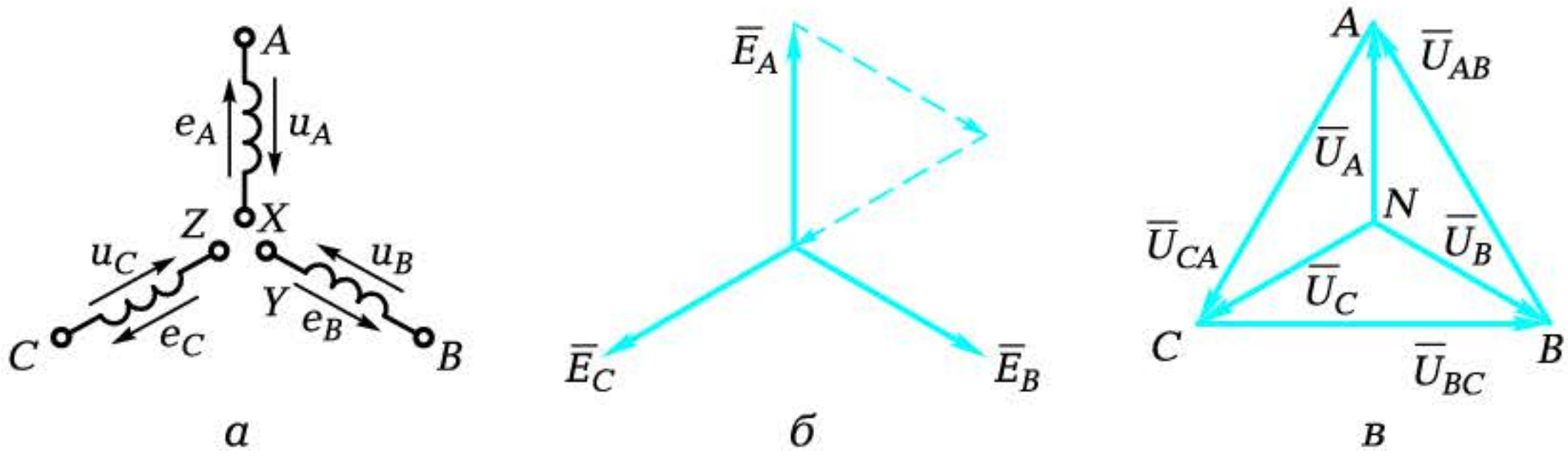
$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240°).$$

Направление ЭДС в фазах принимается от конца к началу (от *X* к *A*), а напряжения — от начала к концу (рис. 3.3, *а*).

Векторная диаграмма трехфазной системы ЭДС имеет вид, приведенный на рис. 3.3, *б*.

Из нее следует, что для симметричной трехфазной системы геометрическая сумма векторов ЭДС всех фаз равна нулю:

$$\overline{E}_A + \overline{E}_B + \overline{E}_C = 0.$$



а *б* *в*

Рис. 3.3. Три фазы генератора (а); векторная диаграмма ЭДС (б); векторная диаграмма фазных и линейных напряжений (в)

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;
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, приведенной на рис. 3.2, в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать:

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A - \bar{U}_B;$$
$$\bar{U}_{BC} = \bar{U}_B - \bar{U}_C;$$
$$\bar{U}_{CA} = \bar{U}_C - \bar{U}_A.$$

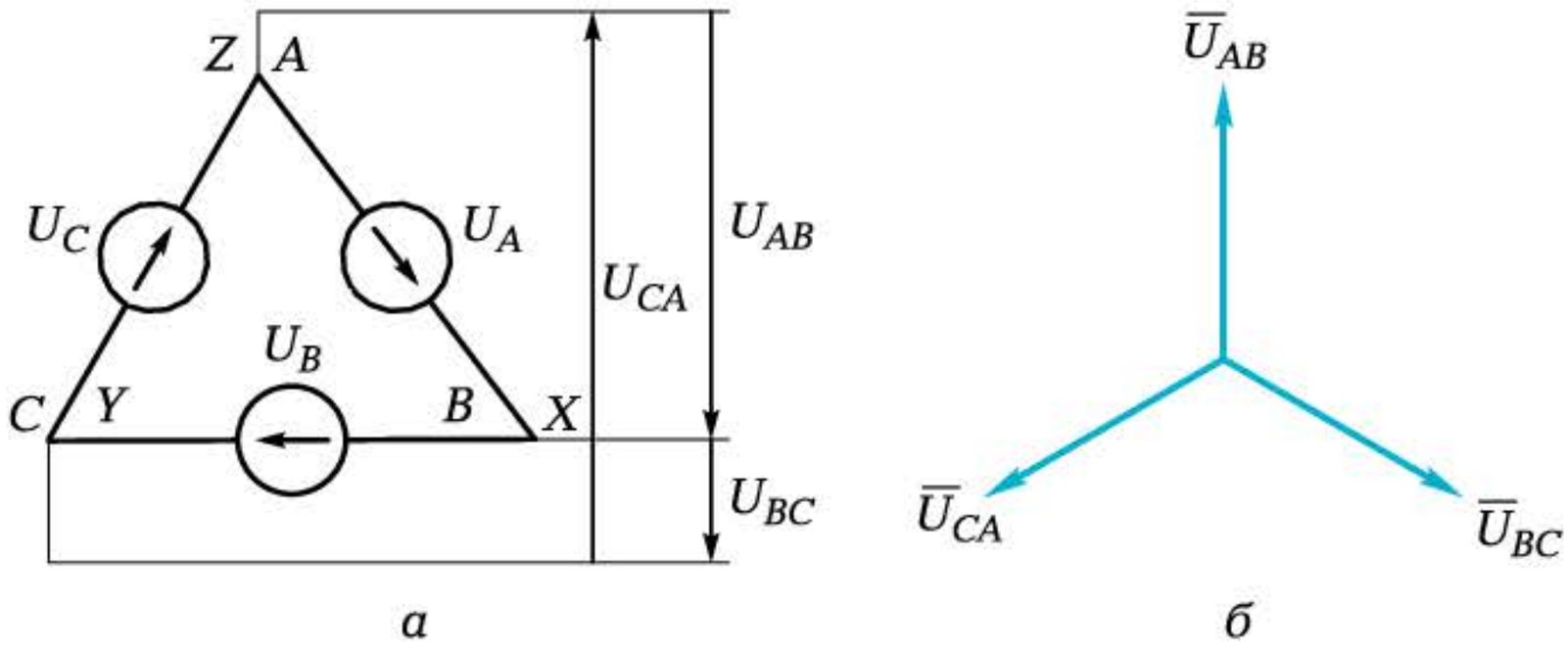
Трехфазный источник всегда представляет собой симметричную систему независимо от величины и характера нагрузки, так как внутреннее сопротивление его ничтожно мало. Векторная диаграмма напряжений источника представлена на рис. 3.3, *в*. Из диаграммы следует, что линейные и фазные напряжения связаны зависимостью

$$U_л = \sqrt{3}\, U_ф.$$

Государственным стандартом предусмотрены номинальные значения линейных $U_л$ (660, 380, 220 В) и фазных $U_ф$ (380, 220, 127 В) напряжений, связанных отношением $\sqrt{3}$: 660/380 = 380/220 = $= 220/127 = \sqrt{3}$.

При соединении фаз генератора *треугольником* начало одной фазы подключается 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 в любой момент времени равна нулю. В схеме тре-



а *б*

Рис. 3.4. Соединения фаз источника треугольником:
а — схема; *б* — векторная диаграмма

угольник векторы фазных и линейных напряжений совпадают (рис. 3.4, *б*): $U_A = U_{AB}$; $U_B = U_{BC}$; $U_C = U_{CA}$.

Последовательность в обозначении фаз A, B, C не случайна, так как она определяет последовательность изменений фазных ЭДС, а значит, как мы это увидим дальше, и направление вращения трехфазных двигателей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что собой представляет трехфазная электрическая цепь?
2. Как могут быть соединены отдельные фазы источника в трехфазных цепях?
3. Какие токи (напряжения) называются линейными и фазными?
4. Запишите выражения для мгновенных значений фазных ЭДС трехфазной системы.
5. Запишите соотношения между линейными и фазными напряжениями для схем соединения звезда и треугольник.

3.2. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ НАГРУЗКИ

3.2.1. Виды нагрузок

В трехфазных цепях нагрузка может быть:

симметричной, когда равны полные сопротивления в фазах ($Z_a = Z_b = Z_c$) и одинаков их характер ($\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$). Примером могут служить трехфазные асинхронные или синхронные двигате-

ли, обмотки статора которых имеют одинаковые значения как активных, так и индуктивных сопротивлений;

равномерной, когда равны полные сопротивления в фазах ($Z_a = Z_b = Z_c$), но различен их характер ($\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$), например, когда в одной фазе включена активная нагрузка, в другой — индуктивная, в третьей — емкостная, равные друг другу по модулю;

однородной, когда одинаков характер нагрузки в фазах ($\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$), но различны полные сопротивления ($Z_a \neq Z_b \neq Z_c$). Примером такой нагрузки может служить осветительная сеть промышленных и бытовых зданий, когда во всех фазах включены осветительные лампы, но число их различно.

Два последних вида нагрузки объединяются под общим названием *несимметричная* нагрузка.

3.2.2. Симметричная нагрузка, включенная треугольником

При соединении приемников треугольником в случае пренебрежимо малого сопротивления проводов напряжения приемника становятся равными напряжениям источника и образуют симметричную систему напряжений. При этом фазные напряжения равны линейным, а в ЭЦ текут два рода токов: фазные $I_ф$ (I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}) и линейные $I_л$ (I_a, I_b, I_c) (рис. 3.5, *а*).

Соотношение между $I_ф$ и $I_л$ найдем с помощью векторной диаграммы (рис. 3.5, *б*), записав в соответствии с первым законом Кирхгофа для ЭЦ (см. рис. 3.5, *а*)

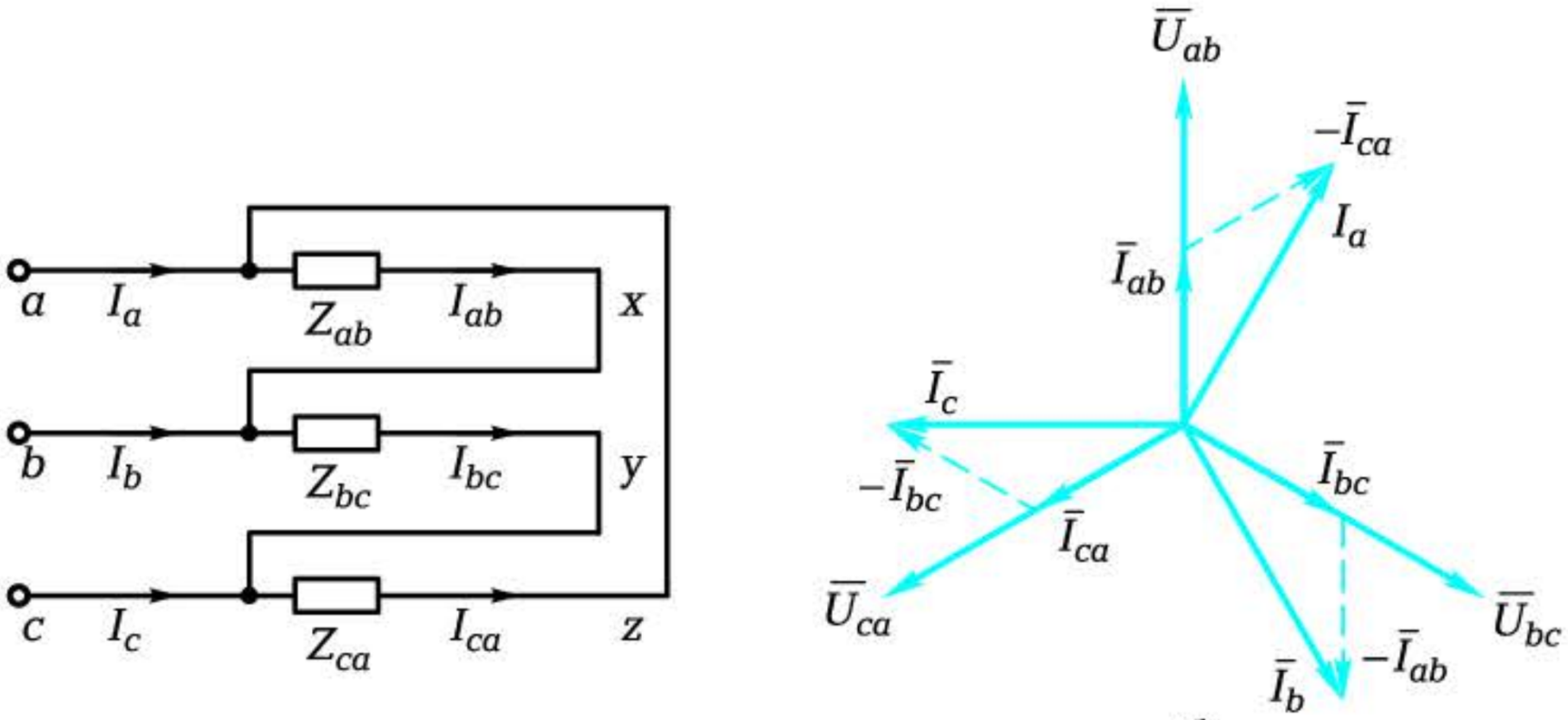
$$\begin{aligned} \overline{I}_a &= \overline{I}_{ab} - \overline{I}_{ca}; \\ \overline{I}_b &= \overline{I}_{bc} - \overline{I}_{ab}; \\ \overline{I}_c &= \overline{I}_{ca} - \overline{I}_{bc}. \end{aligned}$$

На основе диаграммы может быть сделан вывод, что векторы фазных токов сдвинуты друг относительно друга на 120°. Векторы линейных токов также равны по величине, сдвинуты между собой на угол 120°, а относительно векторов фазных токов на угол 30°.

Линейные и фазные токи связаны соотношением

$$I_л = \sqrt{3}\, I_ф.$$

Для известных $U_ф$ и $I_ф$ могут быть определены активная, реактивная и полная мощности, потребляемые каждой фазой:



а *б*

Рис. 3.5. Соединение фаз нагрузки треугольником:
а — схема ЭЦ; *б* — векторная диаграмма

$$P_{\text{ф}} = U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \cos \varphi_{\text{ф}};\ Q_{\text{ф}} = U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \sin \varphi_{\text{ф}};\ S_{\text{ф}} = U_{\text{ф}} I_{\text{ф}}.$$

Мощности, потребляемые трехфазной нагрузкой:

$$P_{\text{ЭЦ}} = 3\, P_{\text{ф}};\ Q_{\text{ЭЦ}} = 3\, Q_{\text{ф}};\ S_{\text{ЭЦ}} = 3\, S_{\text{ф}}.$$

Для линейных напряжений и токов

$$P_{\text{ЭЦ}} = \sqrt{3}\, U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi_{\text{ф}};\ Q_{\text{ЭЦ}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi_{\text{ф}};\ S_{\text{ЭЦ}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} I_{\text{л}};$$

3.2.3. Несимметричная нагрузка, включенная треугольником

Если сопротивления фаз не равны между собой, то нагрузка считается несимметричной. Возникает она в том случае, когда в цепь включены различные однофазные приемники.

При этом фазные токи, фазные мощности, углы сдвига фаз в общем случае различны.

Величины фазных токов, линейных токов и мощностей при известных значениях фазных или линейных напряжений и фазных сопротивлений могут быть определены с помощью векторной диаграммы.

Векторная диаграмма строится в такой последовательности.

1. Строится звезда фазных напряжений в масштабе m_U (В/мм).
2. Определяются углы сдвига фаз между фазными напряжениями и токами: $\cos \varphi_{\text{ф}} = R_{\text{ф}} / Z_{\text{ф}}$ ($\cos \varphi_{ab} = R_{ab} / Z_{ab}$ и т. д.).
3. Определяются действующие значения фазных токов: $I_{\text{ф}} = U_{\text{ф}} / Z_{\text{ф}}$.

4. Под соответствующими углами φ_{ab}, φ_{bc}, φ_{ca} к фазным напряжениям U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} строятся в масштабе m_I (А/мм) векторы фазных токов I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}.

5. Соединением концов векторов фазных токов определяются действующие значения линейных токов I_a, $I_в$, I_c.

6. Определяются 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.

3.2.4. Симметричная нагрузка, включенная звездой

При соединении фаз приемника звездой для четырехпроводной трехфазной системы с нейтральным проводом (рис. 3.6, *а*)

$$U_ф = U_л / \sqrt{3} \text{ и } I_ф = I_л.$$

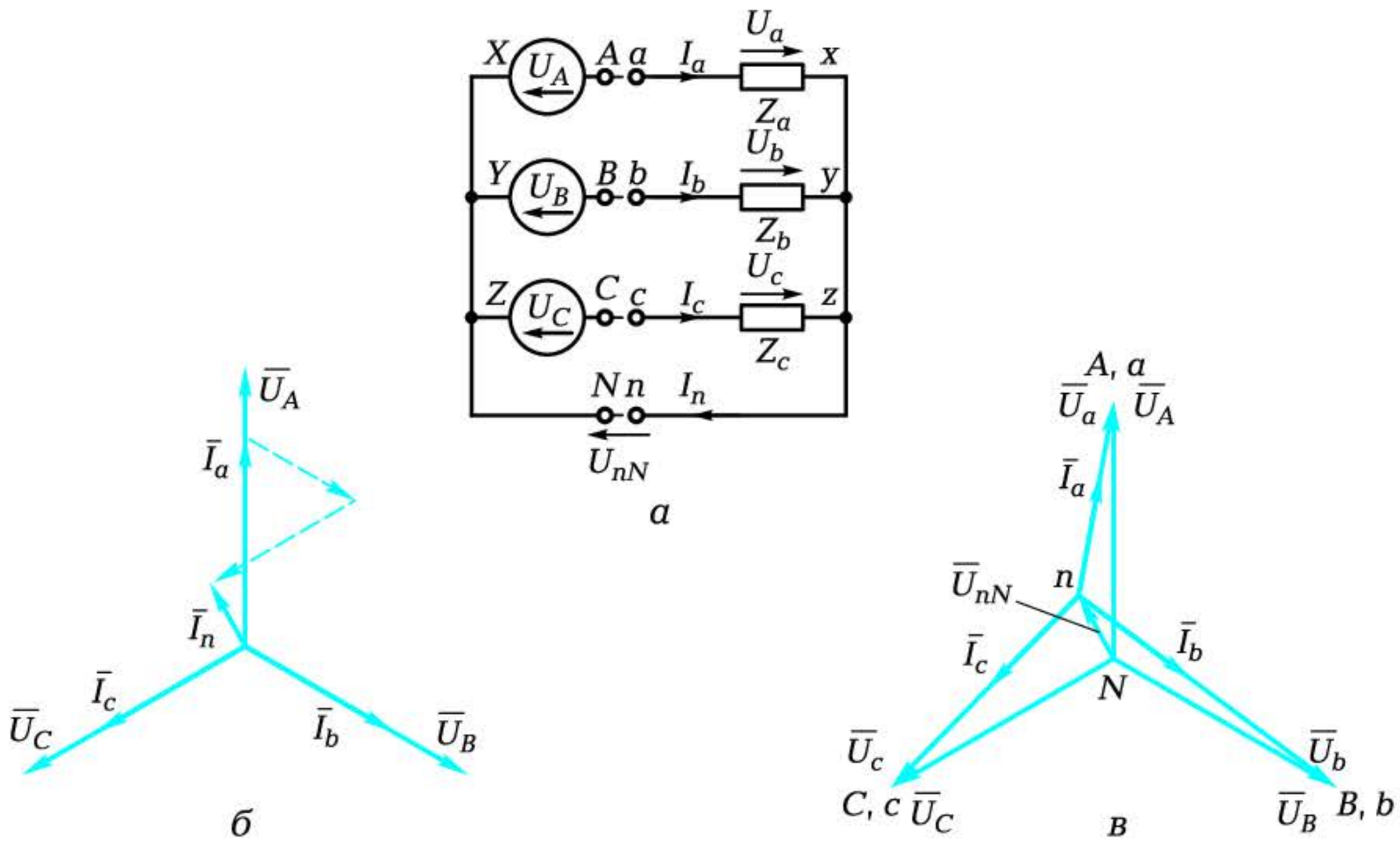


Рис. 3.6. Соединение фаз нагрузки звездой:

а — схема ЭЦ; *б* — векторная диаграмма напряжений и токов для четырехпроводной ЭЦ; *в* — векторная диаграмма напряжений и токов для трехпроводной ЭЦ

Ток в нейтральном проводе в соответствии с первым законом Кирхгофа определяется как геометрическая сумма векторов:

$$\overline{I}_n = \overline{I}_a + \overline{I}_b + \overline{I}_c.$$

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. Фазные токи сдвинуты относительно фазных напряжений на одинаковые углы $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$, определяемые выражением $\cos\varphi_ф = R_ф / Z_ф$.

Мощности цепи:

$$P_{ЭЦ} = 3U_ф I_ф \cos\varphi_ф = \sqrt{3}\, U_л I_л \cos\varphi_ф;$$

$$Q_{ЭЦ} = 3\, U_ф I_ф \sin\varphi_ф = \sqrt{3}\, U_л I_л \sin\varphi_ф;$$

$$S_{ЭЦ} = 3U_ф I_ф = \sqrt{3}\, U_л I_л.$$

3.2.5. Несимметричная нагрузка, включенная звездой

При наличии нейтрального провода фазные напряжения приемника остаются равными фазным напряжениям источника, т. е.

$$U_a = U_A;\ U_b = U_B;\ U_c = U_C,$$

равны между собой и не зависят от величины нагрузки в фазах. При этом остается справедливым соотношение $U_ф = U_л / \sqrt{3}$.

Фазные токи определяются величиной нагрузки в фазах и равны

$$I_a = U_a / Z_a;\ I_b = U_b / Z_b;\ I_c = U_c / Z_c.$$

Векторы токов строятся в масштабе m_I под соответствующими углами φ_a, φ_b, φ_c относительно векторов фазных напряжений. В нейтральном проводе появляется ток I_n, который может быть определен с помощью векторной диаграммы, показанной на рис. 3.6, *б* (для активной нагрузки $\varphi_ф = 0$).

Обрыв нейтрального провода приводит к появлению напряжения смещения нейтрали U_{nN}, что в свою очередь ведет к нарушению равенства фазных напряжений — «перекосу» фаз (рис. 3.6, *в*).

Действительно, в соответствии со вторым законом Кирхгофа

для контура *AXNnxa* (см. рис. 3.6, *а*) $\bar{U}_a = \bar{U}_A - \bar{U}_{nN}$;

для контура *BYNnyb* $\bar{U}_b = \bar{U}_B - \bar{U}_{nN}$;

для контура *CZNnzc* $\bar{U}_c = \bar{U}_C - \bar{U}_{nN}$.

Мощность цепи при несимметричной нагрузке определяется как сумма мощностей каждой фазы:

$$P_{\text{ЭЦ}} = P_a + P_b + P_c;$$

$$Q_{\text{ЭЦ}} = Q_a + Q_b + Q_c;$$

$$S_{\text{ЭЦ}} = S_a + S_b + S_c.$$

Таким образом, при соединении приемников звездой использование нейтрального провода позволяет отсимметрировать фазные напряжения и не допускать их изменения при изменении однофазных нагрузок.

Включение предохранителей в цепь нейтрального провода недопустимо.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая нагрузка называется симметричной, равномерной, однородной?
2. В каких случаях возникает напряжение смещения нейтрали?
3. Чему равен ток в нейтральном проводе при симметричной и несимметричной нагрузке?
4. Приведите примеры симметричной и несимметричной нагрузок.
5. Каково назначение нейтрального провода?
6. Запишите соотношения между линейными и фазными напряжениями (токами) для схем соединения звездой и треугольником.
7. Нужен ли нейтральный провод в осветительной сети?

3.3. РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ. МОЩНОСТЬ ЦЕПИ И МЕТОДЫ ЕЕ ИЗМЕРЕНИЯ

3.3.1. Методы расчета трехфазных электрических цепей

В большинстве случаев трехфазная нагрузка *симметрична* и расчет системы выполняют для одной фазы. При этом принима-

ют, что заданы линейное напряжение $U_л$ и нагрузка в фазах $Z_ф = \sqrt{R_ф^2 + (X_{Lф} - X_{Cф})^2}$.

Если приемники с нагрузкой $Z_ф$ соединены *звездой* и включены на линейное напряжение $U_л$, то

$$U_ф = U_л/\sqrt{3};\ I_л = I_ф;\ I_ф = U_ф/Z_ф = U_л/(\sqrt{3}\,Z_ф);\ \cos\varphi_ф = R_ф/Z_ф.$$

Полная мощность, потребляемая ЭЦ,

$$S^{\curlywedge}_{ЭЦ} = 3S_ф = 3U_ф^2/Z_ф = U_л^2/Z_ф.$$

Если нагрузка соединена *треугольником* и включена на то же линейное напряжение $U_л$, то

$$U_л = U_ф;\ I_л = \sqrt{3}\,I_ф;\ I_ф = U_ф/Z_ф = U_л/Z_ф;\ \cos\varphi_ф = R_ф/Z_ф.$$

Полная мощность в этом случае

$$S^{\Delta}_{ЭЦ} = 3S_ф = 3U_ф^2/Z_ф = 3U_л^2/Z_ф.$$

Активная и реактивная мощности соответственно равны:

$$P_{ЭЦ} = S_{ЭЦ}\cos\varphi_ф,$$

$$Q_{ЭЦ} = S_{ЭЦ}\sin\varphi_ф.$$

При одном и том же линейном напряжении потребляемая нагрузкой (например, электродвигателем) мощность при соединении треугольником в 3 раза больше, чем при соединении звездой.

Соответственно в 3 раза больше и развиваемая мощность.

Если нагрузка *несимметрична* и приемники соединены *звездой с нейтральным проводом*, расчет системы 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 вычисляют ток в нейтральном проводе I_n;
- вычисляют потребляемую ЭЦ мощность как сумму фазных мощностей.

Расчет *несимметричного треугольника* выполняют аналогично для каждой фазы. Линейные токи определяют графически по векторной диаграмме.

Применение *трехпроводной ЭЦ с несимметричной нагрузкой* (обрыв нейтрального провода), включенной звездой, недопустимо. Причина — «перекос» фаз в нагрузке, что ведет к изменению режимов работы оборудования вплоть до выхода его из строя.

При этом фазные напряжения в фазах с меньшим сопротивлением нагрузки (десятирожковая люстра) оказываются меньше номинальных, а в фазах с бóльшим сопротивлением (настольная лампа) — больше номинального.

Расчет цепи *без нейтрального провода и с несимметричной нагрузкой* достаточно сложен (см. приложение 5).

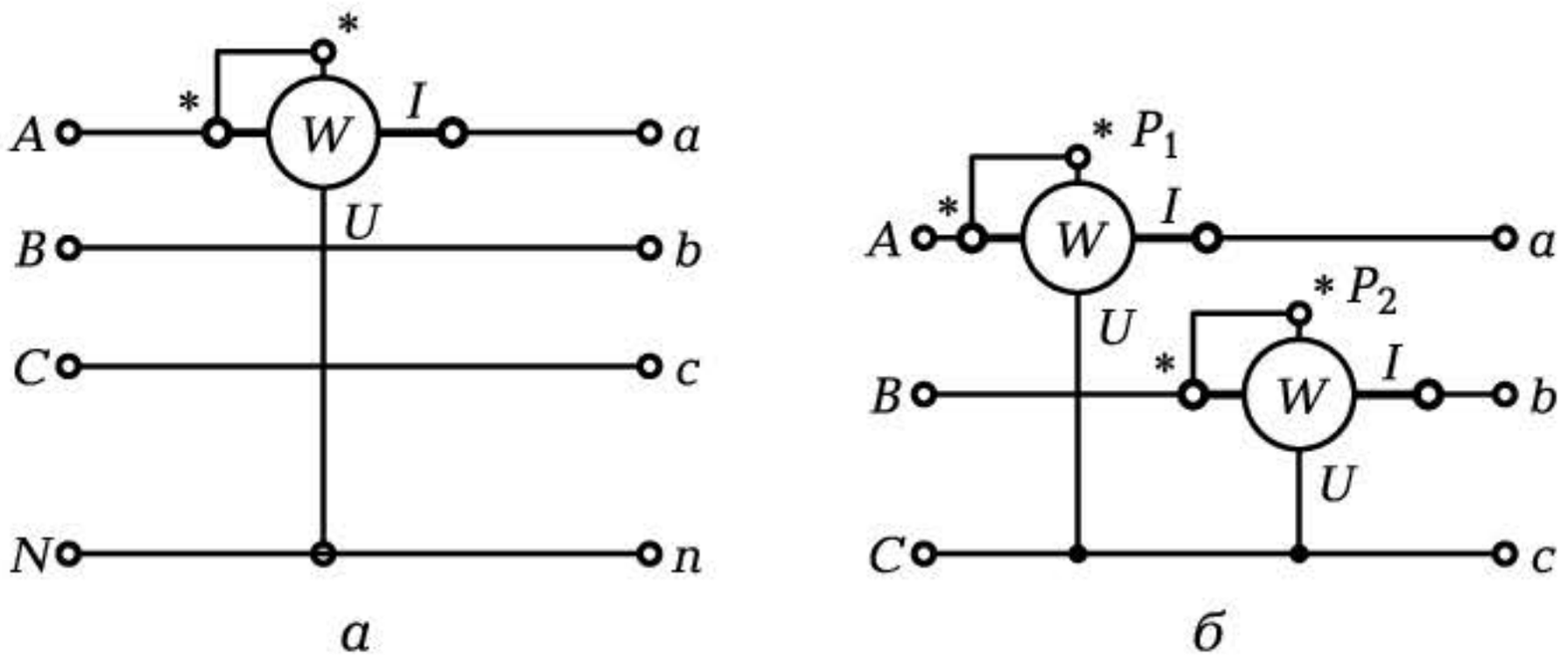
3.3.2. Мощность трехфазной электрической цепи и методы ее измерения

Для симметричной четырехпроводной системы мощность, потребляемая трехфазным приемником, равна утроенной мощности, потребляемой каждой фазой. Таким образом, для измерения мощности достаточно определить мощность одной фазы (рис. 3.7, *а*), а затем показания ваттметра умножить на три. Измерение мощности ведется с помощью ваттметра, вращающий момент подвижной части которого $M_{вр} = kUI\cos\varphi$ пропорционален активной мощности системы. Ваттметр включают таким образом, чтобы по его токовой катушке протекал фазный ток, а катушку напряжения подключают параллельно фазной нагрузке. При этом зажимы прибора, обозначенные знаком *, должны быть соединены вместе.

Для несимметричной четырехпроводной системы измерение мощности проводится с помощью трех ваттметров, включаемых в каждую фазу. Полная активная мощность, потребляемая ЭЦ в этом случае, равна сумме показаний всех ваттметров.

Для несимметричной трехпроводной системы измерение мощности выполняется в большинстве случаев по способу двух ваттметров (рис. 3.7, *б*).

Так как мгновенная мощность системы $p = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c$, а сумма токов $i_a + i_b + i_c = 0$, то, записав $i_c = -(i_a + i_b)$, получаем $p = u_a i_a + u_b i_b - u_c(i_a + i_b) = (u_a - u_c) i_a + (u_b - u_c) i_b = u_{ac} i_a + u_{bc} i_b = p_1 + p_2$.



а *б*

Рис. 3.7. Измерение мощности в трехфазной ЭЦ:
а — четырехпроводной; *б* — трехпроводной

Таким образом, 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 $P_{ЭЦ} = P_1 + P_2$.

Промышленность выпускает трехфазные ваттметры, предназначенные для измерения мощности в трех- или четырехпроводной системе (по способу двух или трех ваттметров).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем особенности расчета трехфазных ЭЦ с симметричной и несимметричной нагрузками в фазах?
2. Покажите, что при соединении нагрузки треугольником мощность в 3 раза больше, чем при соединении нагрузки звездой при одном и том же линейном напряжении.
3. Как измерить мощность в трехфазной ЭЦ с симметричной и несимметричной нагрузками?

Глава 4

МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

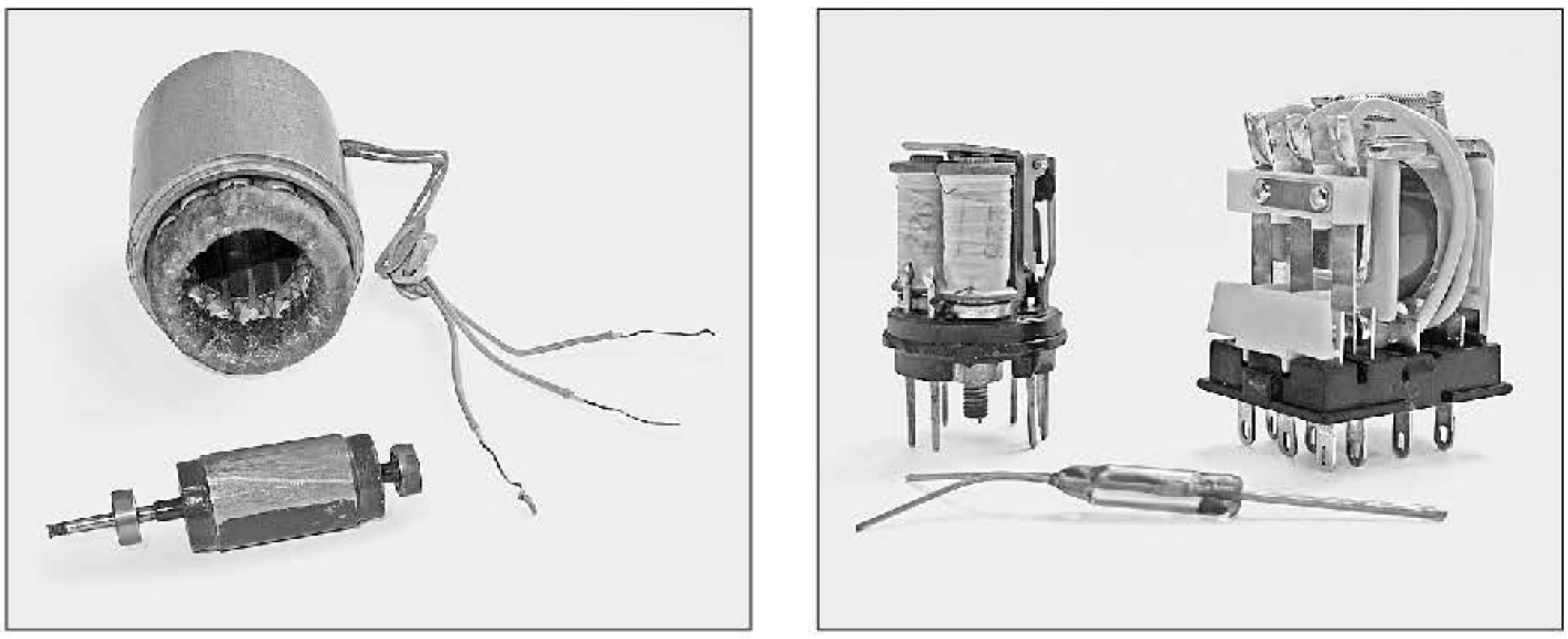
4.1. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

4.1.1. Индукционное и силовое действия магнитного поля

В основу работы большинства электромеханических преобразователей — электрических двигателей (рис. 4,1, *а*), генераторов, датчиков, трансформаторов, электромагнитов, реле (рис. 4.1, *б*), электромеханических измерительных приборов и др. — положено индукционное и силовое действия магнитного поля.

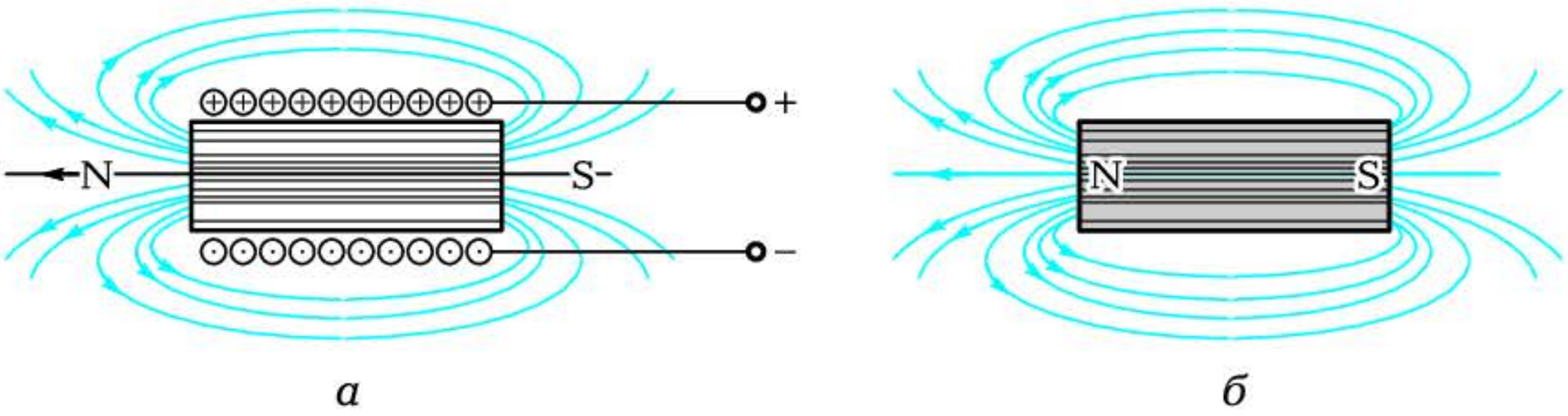
Индукционное действие основано на том, что в проводнике, движущемся в магнитном поле, индуктируется ЭДС.

На этом принципе построены электрические генераторы, датчики, трансформаторы и др.



а *б*

Рис. 4.1. Электродвигатель (*а*) и электромагнитное реле (*б*)



а *б*

Рис. 4.2. Источники магнитного поля:
а — электромагнит; *б* — постоянный магнит

Силовое действие основано на том, что на проводники с током и детали из ферромагнитного материала, помещенные в магнитное поле, действуют электромагнитные силы.

На этом принципе построены электродвигатели, электромагниты, реле и измерительные приборы.

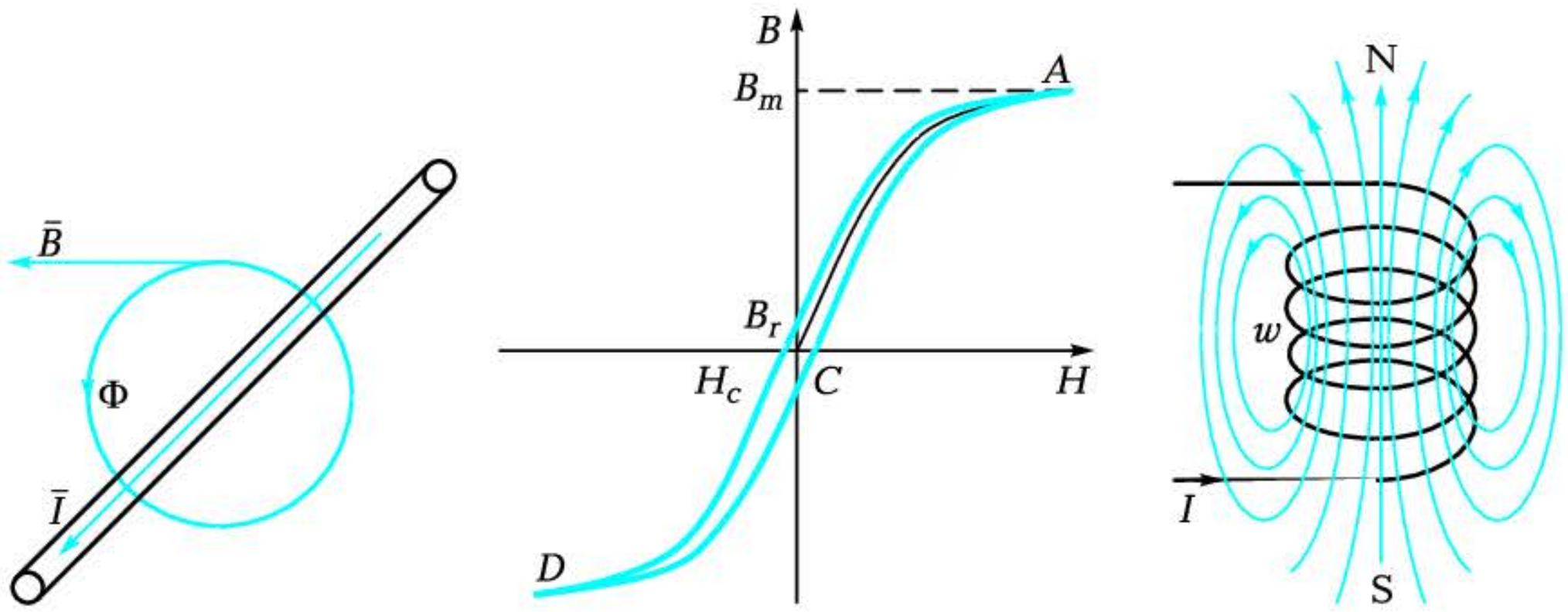
Все эти приборы и устройства могут работать как на постоянном, так и на переменном токе. Соответственно следует различать магнитные цепи постоянного и переменного токов. Рассмотрим вначале магнитные цепи постоянного тока, в которых постоянное магнитное поле создается за счет постоянного тока, протекающего по обмотке, расположенной на каркасе (рис. 4.2, *а*), либо за счет постоянных магнитов N—S (рис. 4.2, *б*).

Под магнитной цепью (МЦ) будем понимать совокупность тел и сред, представляющих собой путь, по которому замыкается магнитный поток.

Для получения требуемой ЭДС или электромагнитной силы необходимо создание магнитного поля с определенными характеристиками.

4.1.2. Основные параметры магнитного поля

При протекании тока I по проводнику вокруг проводника образуются замкнутые магнитные линии, характеризуемые по интенсивности и направлению *вектором магнитной индукции* B, касательным к магнитным силовым линиям (рис. 4.3, *а*). Магнитная индукция B измеряется в теслах (Тл) и зависит не только от тока I, но и от среды, в которой создается магнитное поле.



а *б* *в*

Рис. 4.3. Направление вектора магнитной индукции (*а*), петля гистерезиса (*б*), схема, поясняющая суть потокосцепления (*в*)

При этом 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; μ — относительная магнитная проницаемость среды.

В зависимости от величины μ различают две большие группы материалов:

- ферромагнетики — $\mu >> 1$ (Fe, Co, Ni и их сплавы);
- немагнитные материалы — $\mu \approx 1$ (Cu, Ag, Al, дерево, воздух и т. д.).

Отношение магнитной индукции B к магнитной проницаемости μ определяет одну из важнейших характеристик магнитного поля — его *напряженность* $H = B/\mu_a$ (А/м).

Если для немагнитных материалов $\mu \approx 1$ остается величиной постоянной, то для ферромагнетиков μ — величина переменная и зависимость $B(H)$ — не только нелинейна, но и неоднозначна, т. е. зависит от направления протекающего тока, а следовательно, от напряженности H (рис. 4.3, *б*). Это связано с особой структурой ферромагнитных материалов.

4.1.3. Физика ферромагнитных материалов

Любой ферромагнетик можно представить в виде отдельных микроскопических областей — *доменов*, обладающих собствен-

ным магнитным моментом N_0—S_0. В отсутствие внешнего магнитного поля в целом материал не имеет магнитного момента, поскольку все домены расположены хаотично (рис. 4.4, *а*). Магнитная индукция равна нулю.

При внесении ферромагнетика в магнитное поле N—S домены поворачиваются в направлении поля. Чем сильнее поле, тем больше угол поворота и значение индукции B. В конце концов домены ориентируются вдоль поля и дальнейшее увеличение H не ведет к увеличению индукции (рис. 4.4, *б*). Ферромагнетик насыщается ($B = B_m$). При уменьшении напряженности внешнего поля домены стремятся вернуться в исходное состояние, однако даже при $H = 0$ индукция не равна нулю (B_r) и материал обладает остаточной намагниченностью.

Чтобы снять намагниченность ($B = 0$), необходимо приложить внешнее поле обратного направления. Полученная при этом напряженность поля называется *коэрцитивной силой* H_c.

Поток вектора магнитной индукции Φ (*магнитный поток*) — одна из важнейших характеристик магнитного поля. Она представляет собой произведение магнитной индукции B на пронизываемую им площадь S:

$$\Phi = BS.$$

Единица измерения магнитного потока Φ — вебер (Вб).

Из последнего выражения следует, что магнитную индукцию B можно определить как плотность магнитного потока Φ, т. е. число магнитных силовых линий, проходящих через поперечное сечение площадью S.

При протекании тока I по катушке с числом витков w количество магнитных силовых линий, а следовательно, и индукция B увеличиваются в w раз. Соответственно в w раз увеличивается и

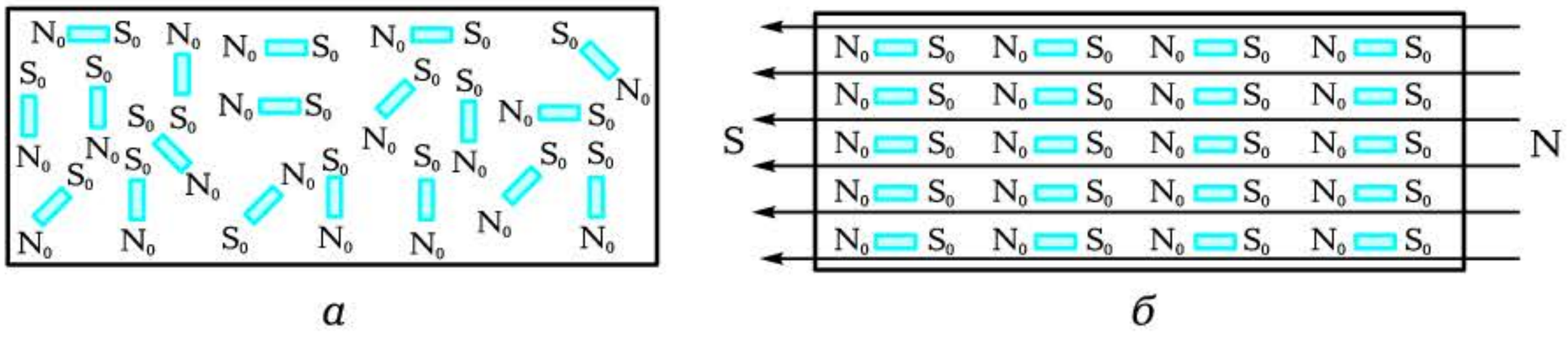


Рис. 4.4. Структура ферромагнетика:

а — при отсутствии магнитного поля; *б* — при внесении в магнитное поле

магнитный поток Φ (см. рис. 4.3, *в*). Полный магнитный поток, или *потокосцепление*

$$\Psi = w\Phi.$$

Магнитодвижущая сила (МДС) $F_м$, или *намагничивающая сила* (н.с) — это произведение силы тока I на число витков w:

$$F_м = Iw.$$

Магнитодвижущая сила измеряется в амперах (А).

4.1.4. Закон полного тока

Для расчета магнитных цепей необходимо установить связь напряженности магнитного поля H с намагничивающим током I. Связь эта определяется *законом полного тока*. Если напряженность магнитного поля, создаваемого катушкой с током I и числом витков w, для участков магнитной цепи l_1, l_2, l_3 равна соответственно H_1, H_2, H_3, то закон полного тока принимает вид

$$Iw = H_1l_1 + H_2l_2 + H_3l_3, \text{ или } \sum Iw = \sum Hl.$$

В общем случае закон полного тока можно сформулировать так: в замкнутом контуре магнитной цепи алгебраическая сумма намагничивающих сил равна сумме падений магнитных напряжений.

На рис. 4.9, *а* приведена магнитная цепь электрического двигателя постоянного тока. На полюсах статора располагаются катушки с числом витков w. При протекании по ним тока I создается намагничивающая сила Iw, которая создает магнитный поток Φ. Рабочий магнитный поток $\Phi_р$ стремится замкнуться по пути наименьшего сопротивления: *статор* (*3*), *полюс* (*1*), *полюсный наконечник* (*2*), *воздушный зазор* (*5*), *ротор* (*4*), *второй воздушный зазор* (*5*), *полюсный наконечник* (*2*) *и полюс* (*1*).

В отличие от ЭЦ, где ток существует только в проводниках, в МЦ магнитный поток может замыкаться по воздуху через рабочий воздушный зазор $\delta_р$.

Так как отношение магнитной проницаемости железа к магнитной проницаемости воздуха сравнительно невелико, магнитная цепь способствует появлению также потоков рассеяния (утечек) $\Phi_{\sigma 1}$, $\Phi_{\sigma 2}$ (см. рис. 4.9, *а*). Действительно, если $\rho_{воздух}/\rho_{Cu} = 10^{20}$, то $\mu_{Fe}/\mu_{воздух} = 10^5$, т. е. сопротивление воздуха электрическому току в 10^{15} больше сопротивления воздуха магнитному потоку.

Потоки рассеяния снижают магнитный поток в рабочем зазоре и в конечном счете приводят к уменьшению КПД устройства, поскольку в механическую энергию превращается энергия, запасенная только в рабочем воздушном зазоре.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие принципы положены в основу работы электромагнитных устройств?
2. Что называется магнитной цепью?
3. Перечислите основные параметры магнитного поля.
4. Расскажите о свойствах и структуре ферромагнетиков.
5. Сформулируйте закон полного тока.
6. Может ли магнитный поток замыкаться по воздуху?

4.2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА. АНАЛОГИЯ МАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

4.2.1. Электромагниты

Электромагниты — это электромеханические устройства, преобразующие электрическую энергию в линейное или угловое перемещение.

Эти устройства используются для включения и отключения коммутационных устройств (реле, контакторы, пускатели), для открытия и закрытия клапанов, заслонок, вентилей и т. д. Они применяются в распределительных устройствах пневмо- и гидроприводов для управления потоком газа или жидкости, в электромагнитных муфтах, в устройствах защиты (тепловое или токовое реле, автоматические предохранители). На рис. 4.5 приведены основные схемы электромагнитов, используемых для управления распределительными устройствами пневмо- и гидроприводов, а на рис. 4.6 — внешний вид электромагнитов.

При подаче тока в катушку *1* создается электромагнитная сила, под действием которой якорь *3* поворачивается (рис. 4.5, *а*, *в*) или перемещается (рис. 4.5, *б*, *г*) в направлении сердечника *2*. При этом преодолевается сила противодействующей пружины *4*. При снятии тока якорь возвращается в исходное состояние под дей-

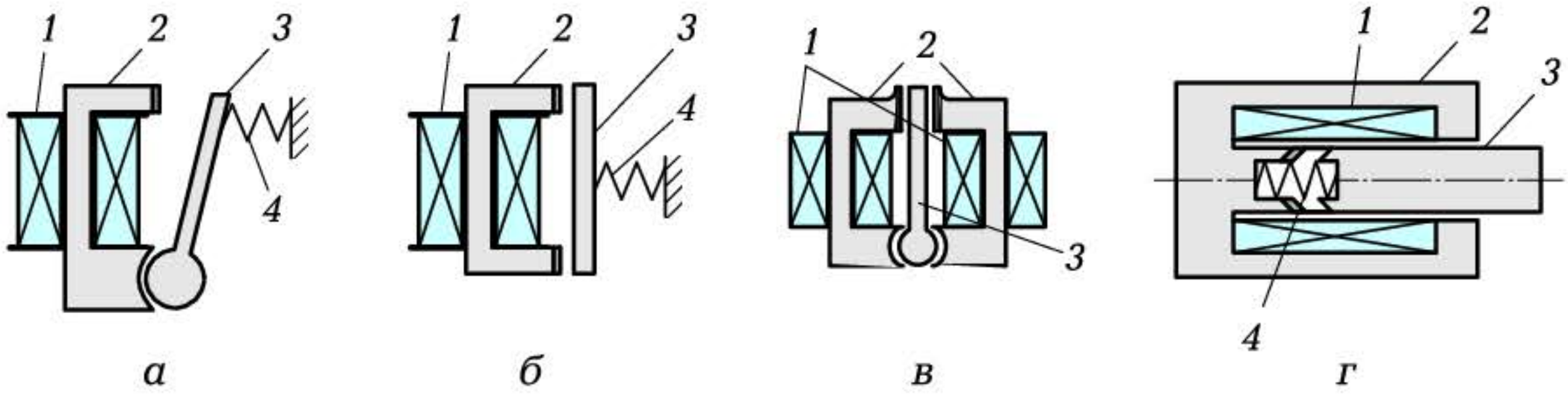


Рис. 4.5. Схемы электромагнитов:
а — поворотная; *б* — с линейным перемещением; *в* — дифференциальная; *г* — соленоидная; *1* — катушка; *2* — сердечник; *3* — якорь; *4* — пружина

ствием пружины. На рис. 4.5, *в* изображена дифференциальная схема поворотного электромагнита, обеспечивающая поворот якоря по часовой стрелке или против нее при подаче тока соответственно в правую или левую катушку. На рис. 4.5, *г* изображена схема соленоидного электромагнита с конической формой воздушного зазора.

Удерживающие электромагниты используются для закрепления деталей на станках (например, шлифовальных), в подъемных механизмах (для погрузки стальной стружки или металлолома), для закрытия дверей (в составе домофонов).

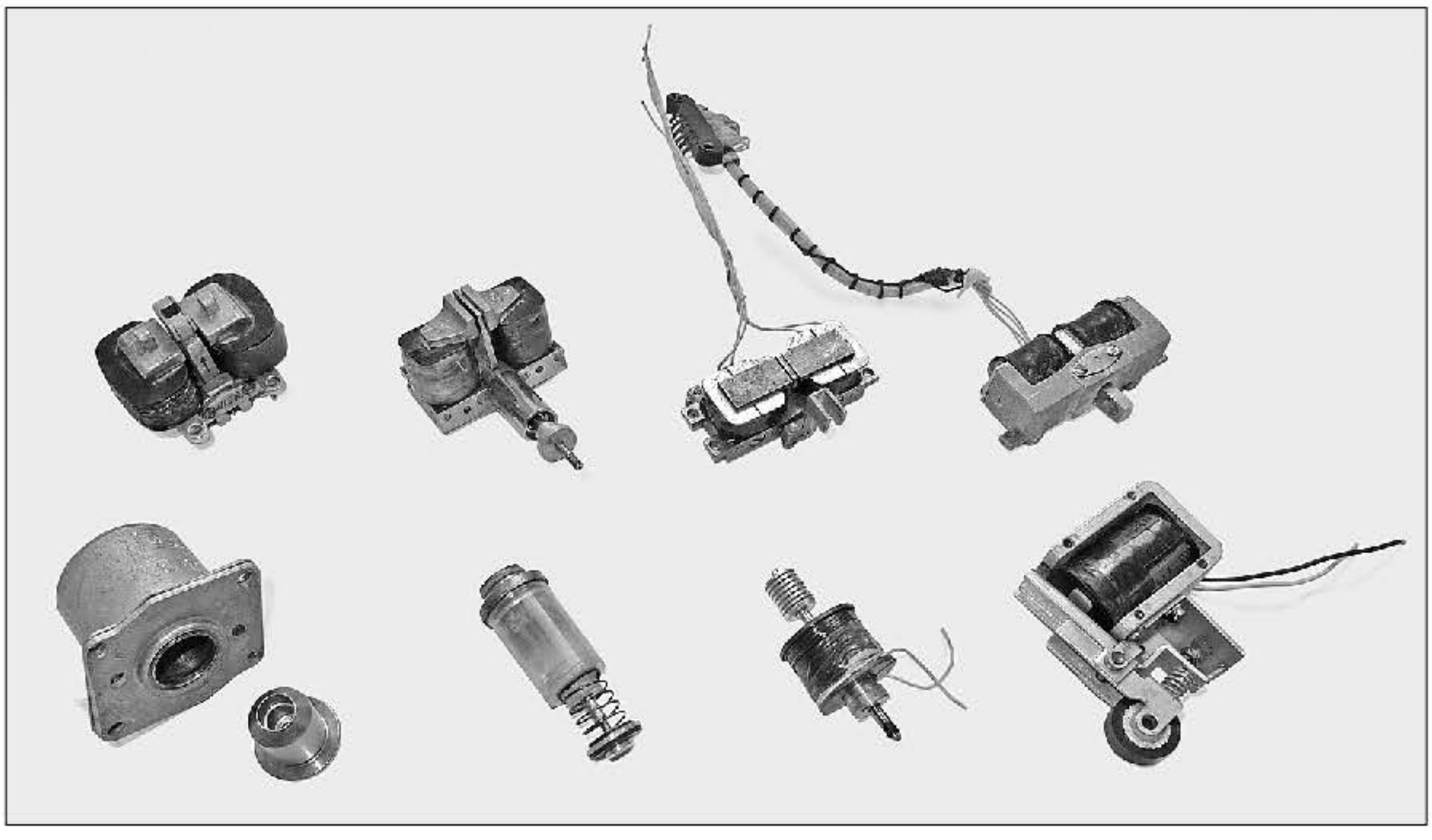


Рис. 4.6. Внешний вид электромагнитов

4.2.2. Электромагнитное реле

Основное назначение электромагнитных реле — перемещение контактных пружин и замыкание контактов при протекании тока по обмотке.

Незначительная мощность, подаваемая в обмотку реле, способна управлять значительной мощностью на нагрузке. Конструктивные исполнения реле чрезвычайно разнообразны. Они могут быть постоянного и 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 — якоре — располагаются контакты, которые могут замыкаться или размыкаться с контактами, располагаемыми на неподвижной части — сердечнике. На рис. 4.7 приведен внешний вид некоторых схем реле.

4.2.3. Электрические машины

Под электрическими машинами понимают электромагнитные устройства вращательного типа, преобразующие механическую энергию в электрическую (генераторы) и электрическую энергию в механическую (двигатели).

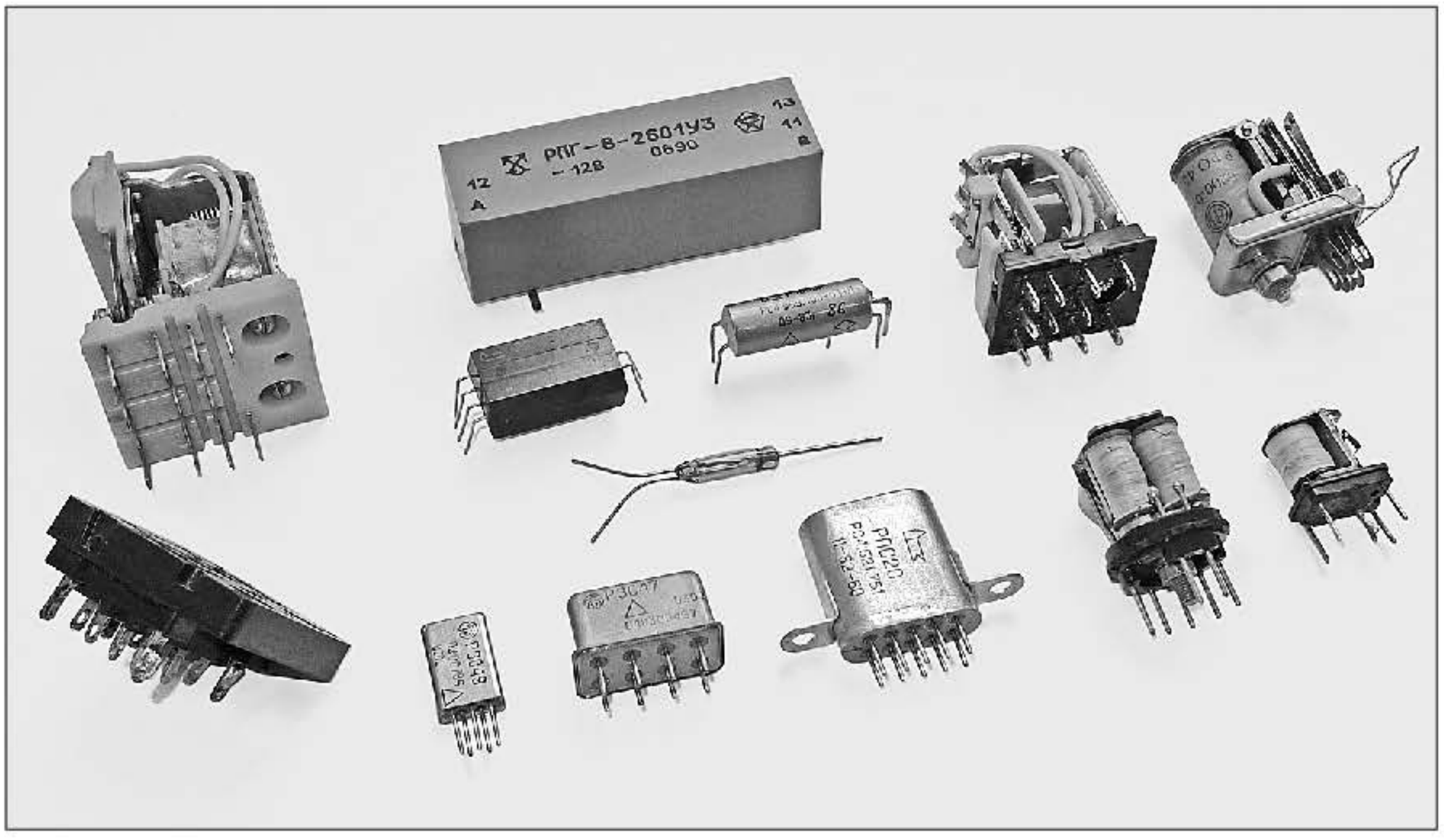


Рис. 4.7. Внешний вид электромагнитных реле



Рис. 4.8. Внешний вид электродвигателей

Генераторы — это основной вид источников электрической энергии, которой сегодня в России производится около 900 млрд кВт·ч в год.

Электродвигатели — это основной вид механической энергии, приводящей в действие станки, транспортные средства, подъемные механизмы, бытовую технику и т.д.

Электрические машины могут работать на постоянном и переменном токах. Исторически первыми появились машины постоянного тока. В 1830-х гг. русский ученый Б.С.Якоби построил действующий электродвигатель, основные элементы которого сохранились до настоящего времени. Он стал основным приводным двигателем транспортных устройств, требующих плавного регулирования частоты вращения в широком диапазоне. А в конце XIX в. М.О.Доливо-Добровольский предложил конструкцию трехфазного асинхронного электродвигателя переменного тока с короткозамкнутым ротором, ставшего основным приводным двигателем металлорежущих станков и подъемных механизмов. Построенный по аналогичной схеме однофазный двигатель стал основным электродвигателем в устройствах бытовой техники.

Схемы и конструкции электрических машин могут быть самыми различными. Но все они имеют две основные части: для электродвигателя это неподвижный статор, служащий для создания

магнитного поля, и вращающийся ротор, передающий вращающий момент нагрузке.

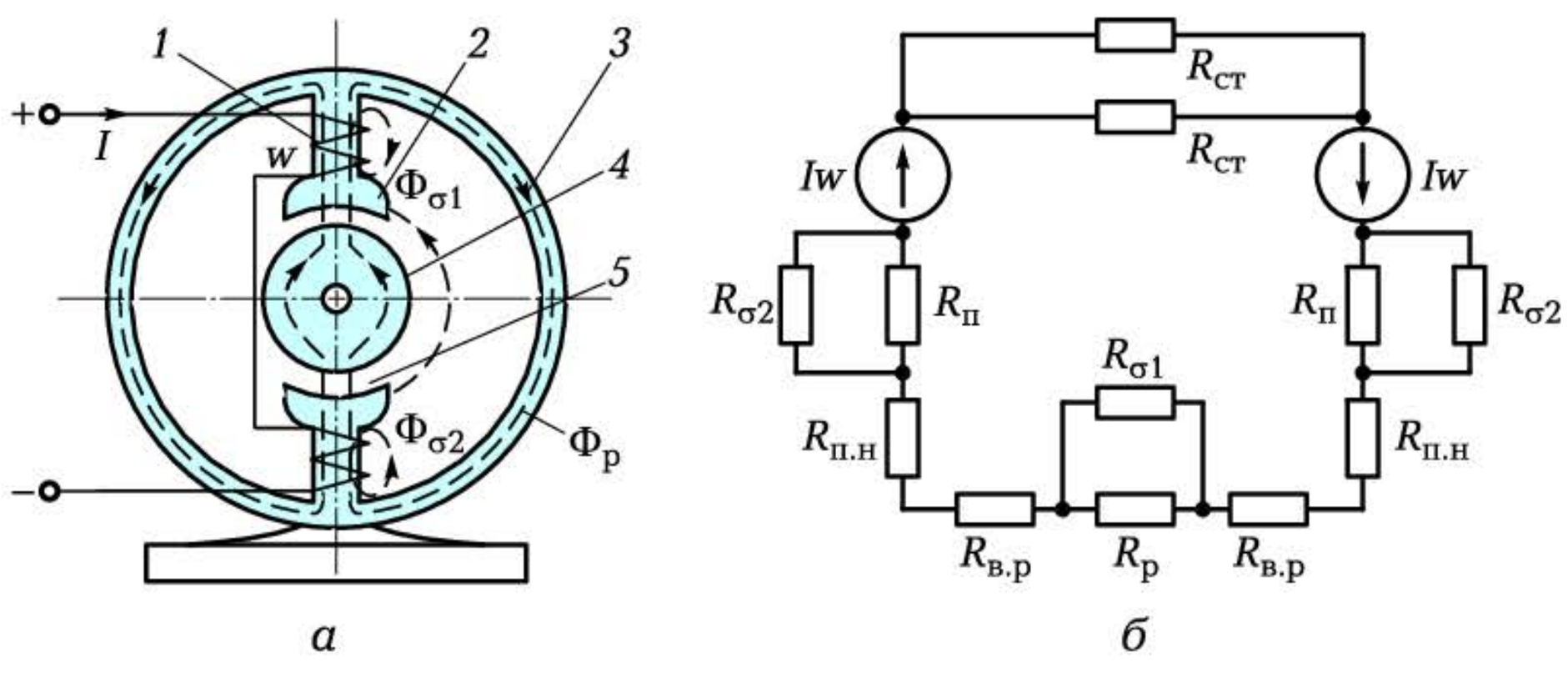
На рис. 4.8 приведен внешний вид некоторых типов электрических машин.

4.2.4. Аналогия магнитных и электрических цепей

Закон полного тока для магнитных цепей аналогичен второму закону Кирхгофа для ЭЦ. Можно провести и другую аналогию между ЭЦ и МЦ (табл. 4.1), что позволит изображать магнитные цепи в виде эквивалентных схем замещения и упростить порядок их расчета.

На основе приведенной аналогии при расчете магнитных цепей часто пользуются эквивалентными схемами замещения. Так, магнитная цепь, приведенная на рис. 4.9, *а*, может быть представлена в виде эквивалентной схемы рис. 4.9, *б*, где *Iw* — намагничивающая сила катушек статора; $R_{ст}$, $R_р$, $R_п$, $R_{п.н}$ — нелинейные магнитные сопротивления стальных участков магнитопровода: статора, ротора, полюса, полюсного наконечника; $R_{в.р}$, $R_{σ1}$, $R_{σ2}$ — линейные магнитные сопротивления воздушных участков магнитопровода: рабочего зазора, сопротивлений рассеяния.

Катушки, располагаемые на полюсах *1*, создают намагничивающую силу *Iw*, которая в свою очередь создает магнитные потоки. Рабочий поток $Φ_р$ замыкается по статору *3* с магнитным со-



а *б*

Рис. 4.9. Конструктивная схема электродвигателя (*а*) и эквивалентная схема замещения (*б*):

1 — полюс; *2* — полюсный наконечник; *3* — статор; *4* — ротор; *5* — воздушный зазор; $Φ_р$ — магнитный рабочий поток, $Φ_{σ1}$ и $Φ_{σ2}$ — магнитные потоки рассеяния

Таблица 4.1

Электрическая цепь			Магнитная цепь		
Наименование	Обозначение	Единица измерения	Наименование	Обозначение	Единица измерения
ЭДС	E	В	МДС	$F_м = Iw$	А
Падение напряжения	U	В	Падение магнитного напряжения	$U_м = Hl$	А
Второй закон Кирхгофа	$\sum E = \sum U = \sum RI$		Закон полного тока	$\sum Iw = \sum Hl = \sum R_м\Phi$	
Ток	I	А	Магнитный поток	Ф	Вб
Первый закон Кирхгофа	$\sum I = 0$		Первый закон Кирхгофа	$\sum\Phi = 0$	
Электрическое сопротивление	$R = \rho l/S$	Ом	Магнитное сопротивление	$R_м = l/\mu S$	1/Гн
Закон Ома	$I = U/R$		Закон Ома	$\Phi = Iw/R_м$	
Плотность тока	$j = I/S$	$А/м^2$	Плотность магнитного потока (индукция)	$B = \Phi/S$	$Тл = Вб/м^2$

противлением $R_{ст}$, полюсы *1* с сопротивлением $R_{п}$, полюсные наконечники *2* с сопротивлением $R_{п.н}$, воздушные рабочие зазоры *5* с сопротивлением $R_{в.р}$ и ротор *4* с сопротивлением $R_{р}$. Помимо рабочего потока $\Phi_{р}$ возникают потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$, замыкающиеся через магнитные сопротивления $R_{\sigma 1}$, $R_{\sigma 2}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные виды электромагнитных устройств.
2. Чем электромагнитное реле отличается от электромагнита?
3. Проведите аналогию между электрическими и магнитными величинами.
4. Запишите выражение для магнитного сопротивления и закон Ома для магнитной цепи.

4.3. РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

4.3.1. Задачи расчета

Расчет магнитных цепей сводится:

- к определению *намагничивающей силы* (н.с.), необходимой для создания заданной величины магнитного потока Φ — *прямая задача*;
- определению потоков Φ на отдельных участках цепи при заданном значении *намагничивающей силы — обратная задача*.

При этом известны геометрические размеры всех участков магнитопровода (площадь сечения S и длина l) и марки материалов, т. е. их кривые намагничивания.

4.3.2. Алгоритм расчета

Прямая задача при решении не вызывает особых трудностей и сводится к обычным аналитическим методам с применением кривых намагничивания. Алгоритм расчета при этом следующий.

1. Весь магнитопровод разбивается на ряд однородных участков с одинаковыми площадями сечения S_i, определяются длины этих участков l_i.

2. Для заданного Φ_0 определяется индукция B_i на каждом участке:

$$B_i = \Phi_0 / S_i.$$

3. В соответствии с кривой намагничивания $B(H)$, заданной графически или в виде таблиц в справочниках, для ферромагнитных участков с найденными значениями B_i определяется напряженность H_i на каждом участке. Для воздушных участков напряженность $H_в$ определяется по формуле

$$H_в = B_в / \mu_0 = 8 \cdot 10^5 B_в.$$

4. Для полученных напряженностей магнитного поля H_i участков известных длин l_i по закону полного тока определяется н.с. катушки

$$I w = \sum H_i l_i.$$

Обратная задача — определение потока Φ по намагничивающей силе Iw — решается методом последовательного приближения (итерации). Суть заключается в том, что задаются некоторым значением потока Φ_1 и решают прямую задачу. Если вычисленное значение Iw_1 больше заданного значения Iw, то Φ_1 уменьшают и вновь решают прямую задачу. И так до тех пор, пока вычисленное значение н.с. не станет равно заданному.

4.3.3. Особенности расчета

Следует отметить, что точность расчета электромагнитных устройств в пределах 10...20 % считается вполне удовлетворительной. Это вызвано в первую очередь тем, что в отличие от электрического тока магнитный поток имеет возможность распространяться и через воздушные промежутки, образуя потоки рассеивания (10...15 % основного потока). Кроме того, зависимость $B(H)$ неоднозначна, а в справочнике приводится основная кривая намагничивания. Все это снижает точность расчета магнитных цепей, так как требует принятия 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 запасенной магнитной энергией в воздушном зазоре.

Конструктивные схемы электромагнита могут быть самыми разнообразными, но основных элементов три: сердечник, катушка и якорь (подвижный элемент).

Сила, с которой сердечник притягивает якорь под действием энергии электромагнитного поля, называется электромагнитной силой $F_{эм}$. Эта сила измеряется в ньютонах (Н).

Она может быть определена через индукцию в воздушном рабочем зазоре $B_{в.р}$ или магнитный поток Ф, или намагничивающую силу в воздушном рабочем зазоре $Iw_{в.р}$ и конструктивные размеры магнитопровода $S_{в.р}$ и $\delta_{в.р}$:

$$F_{эм} = B^2_{в.р} S_{в.р} / (2\mu_0) = \Phi^2 / (2\mu_0 S_{в.р}) = 0{,}5\ (Iw_{в.р}/\delta_{в.р})^2 \mu_0 S_{в.р}.$$

В приложении 12 приведен пример расчета магнитной цепи электромагнита поворотного типа.

4.3.4. Магнитные цепи на переменном токе. Магнитные потери

Магнитные цепи, в которых магнитное поле возбуждается катушками, питаемыми *переменным* током, — трансформатор, асинхронный двигатель, магнитный пускатель — называются магнитными цепями переменного тока.

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 носит название *магнитный гистерезис*, а петля гистерезиса соответствует одному циклу перемагничивания (за один период гармонического сигнала рабочая точка перемещается от точки A через B_r и H_c к точке D и через точку C снова к точке A (см. рис. 4.3, *б*)).

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 (сталь электротехническая, железо, сплав железа с никелем или кобальтом) и обусловливает небольшие потери на гистерезис. Значи-

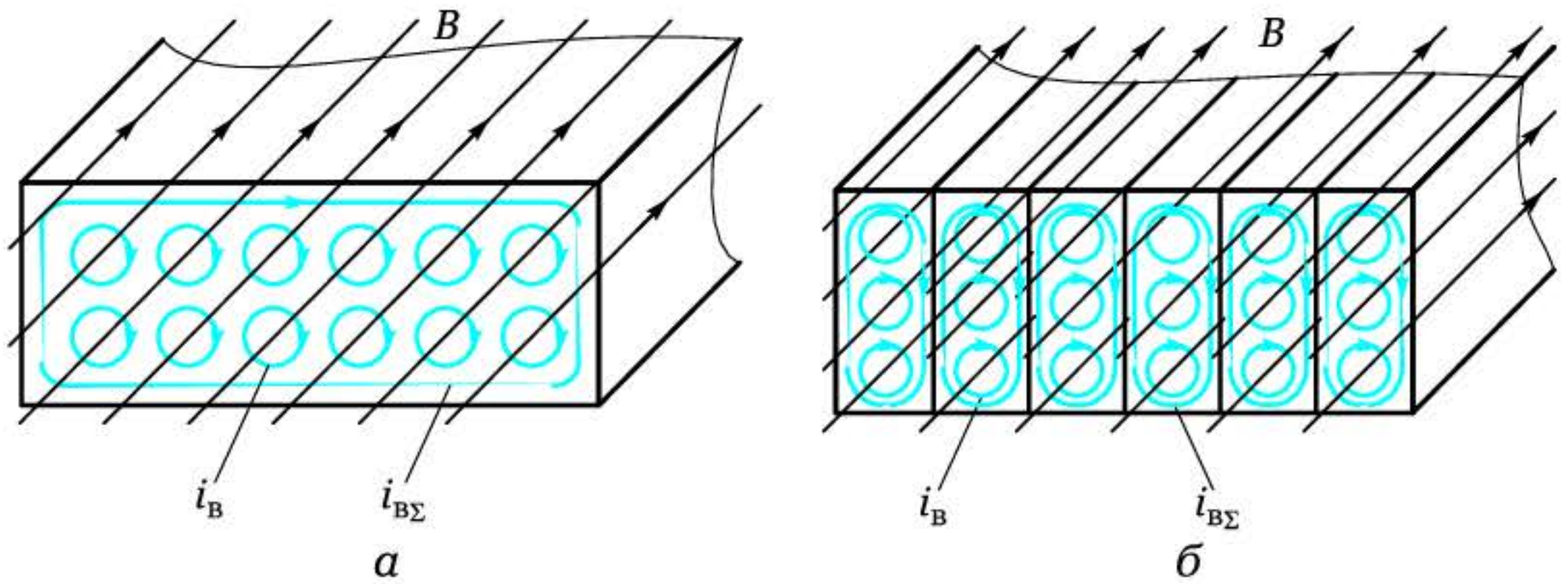


Рис. 4.10. Вихревые токи в магнитопроводе:
а — сплошном; *б* — наборном

тельно труднее перемагнитить магнитотвердые материалы, ширина петли которых во много раз (до 1 000) превышает ширину петли электротехнической стали. Для них потери на гистерезис значительны.

При работе на переменном токе электромагнитные устройства характеризуются также потерями на вихревые токи.

На рис. 4.10, *а* показано сечение магнитопровода, выполненного из сплошного куска железа. Переменное магнитное поле с индукцией B пронизывает магнитопровод и вокруг каждой силовой линии магнитного поля в соответствии с законом электромагнитной индукции наводится ЭДС, вызывающая ток $i_в$. Этот ток получил название вихревой ток. Поскольку все вихревые токи имеют одно направление (правило буравчика), суммарный ток $i_{вΣ}$ будет замыкаться по всему магнитопроводу. При этом электрическое сопротивление магнитопровода $R = \rho l/S$ сравнительно мало, поскольку площадь сечения S велика.

Следовательно, вихревые токи значительны. Протекая по магнитопроводу, они ведут к его существенному нагреву.

Если же магнитопровод выполнить из тонких отдельных пластин железа, изолированных электрически друг от друга (рис. 4.10, *б*), то электрическое сопротивление вихревым токам можно существенно повысить, значительно уменьшив площадь сечения S. Одновременно уменьшается и величина наведенной ЭДС. Вихревые токи будут значительно меньше. Соответственно меньше будет и нагрев магнитопровода, т. е. потери на вихревые токи.

Аналогично можно проанализировать влияние вихревых токов в работающей электрической машине. Если медную рамку расположить на ферромагнитном цилиндре (роторе электричес-

кой машины) и, поместив в магнитное поле, заставить вращаться, то в рамке в соответствии с законом электромагнитной индукции наведется ЭДС и потечет ток (генератор). Значительная ЭДС наведется и в материале ротора, и по нему также потекут токи — вихревые. Поскольку сечение ротора велико и электрическое сопротивление его мало, то токи могут достигать значительной величины, приводя к существенному нагреву материала ротора.

Для уменьшения вихревых токов ротор выполняют из набора пластин листового железа толщиной 0,35 или 0,5 мм, изолированных электрически друг от друга лаком. Это позволяет значительно уменьшить и вихревую ЭДС, и сечение ферромагнитного материала, тем самым повысив его сопротивление. Кроме того, в железо вводят 2...4 % кремния, что повышает удельное электрическое сопротивление материала в 6 — 10 раз.

Аналогично из отдельных пластин трансформаторного железа выполняется магнитопровод трансформатора, в котором вихревые токи наводятся переменным магнитным потоком. Это позволяет снизить потери на вихревые токи и поднять КПД трансформатора.

Таким образом, вихревые токи не только бесполезны в большинстве электромагнитных устройств, но и вредны, так как снижают их КПД.

В то же время свойство вихревых токов нагревать металл — *индукционный нагрев* — широко используется в промышленности для плавки металла и закалки деталей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Приведите алгоритм расчета магнитных цепей.
2. Назовите причины низкой точности расчета электромагнитных устройств.
3. Перечислите виды магнитных потерь при работе электромагнитных устройств на переменном токе.
4. Назовите основные способы снижения магнитных потерь.

Глава 5

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

5.1. КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

5.1.1. Основные понятия и определения

Электрические величины — напряжение, ток, сопротивление, мощность — не воспринимаются непосредственно органами чувств человека. Как же судить о работе той или иной электротехнической установки, как предвидеть поведение той или иной системы и определить выход параметров за допустимые границы? Для этого необходимо использовать специальные измерительные средства — электроизмерительные приборы (ЭИП). Практически любая физическая величина (перемещение, скорость, давление, температура и др.) сравнительно просто с помощью соответствующих преобразователей может быть преобразована в электрическую, а значит, ЭИП способны отображать поведение самой физической величины.

В подразд. 1.4 приведены методы измерения напряжения, тока, мощности и сопротивления, основные показатели электроизмерительных приборов, определены понятия их систем. В данной главе рассмотрим конструктивные схемы и принцип действия ЭИП различных систем, познакомимся со структурными схемами основных электронных приборов, методами измерения неэлектрических величин.

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 величины заданного размера (эталонные сопротивление, емкость, индуктивность).

Измерительный прибор — это средство измерения, которое предназначено для выработки информации в форме, допустимой для непосредственного восприятия. Это может быть отклонение стрелки, положение луча осциллографа или же сигнал на соответствующее регулирующее устройство.

Приборы, используемые для измерения электрических величин (тока, напряжения, мощности, энергии, сопротивления), называются *электроизмерительными приборами*.

Измерительные приборы (ИП) подразделяются на аналоговые и цифровые.

Аналоговые ИП — это приборы, в которых показания являются непрерывной функцией измеряемой величины (стрелочные, ламповые вольтметры, электронно-лучевые и электромеханические осциллографы).

Цифровые ИП — это приборы, вырабатывающие дискретные сигналы измерительной информации, показания которых представлены в цифровой форме.

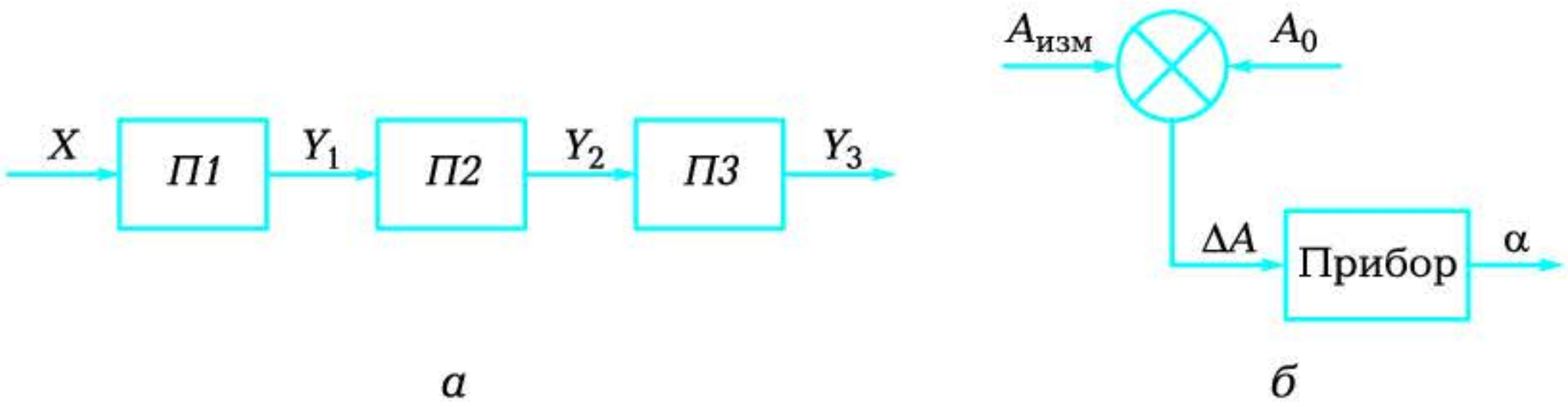
По *виду получаемой измерительной информации* приборы подразделяются на следующие:

- показывающие (допускается только отсчет показаний);
- регистрирующие (имеет место регистрация показаний);
- самопишущие (запись на диаграммах);
- печатающие (запись с помощью печатания);
- интегрирующие (счетчики энергии).

По *способу сравнения с мерой* измерительные приборы подразделяются на приборы прямого действия и приборы сравнения.

В *приборе прямого действия* (рис. 5.1, *а*) имеет место преобразование измеряемой величины в одном направлении, схема преобразования разомкнута. 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) перемещается 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 изменяет-



а *б*

Рис. 5.1. Прибор прямого действия (*а*) и прибор сравнения (*б*); *П1*, *П2*, *П3* — преобразователи

ся до тех пор, пока $\Delta A = A_{изм} - A_0$ и соответственно угол отклонения указателя α не станут равными нулю. В этом случае $A_{изм} = A_0$. По такому принципу работает магазин сопротивлений (рис. 5.2).

Для электромеханических измерительных механизмов всех систем вращающий момент $M_{вр}$ возникает при протекании тока по обмоткам механизма или при включении его под напряжение.

Под действием момента подвижная часть стремится повернуться до упора. Если же за счет, например, пружин, растяжек создать противодействующий момент $M_{пр}$, то подвижная часть остановится, когда $M_{вр} = M_{пр}$. Чем больше измеряемая величина (ток), тем больше вращающий момент $M_{вр}$ и больше угол отклонения α подвижной части. При этом $M_{пр} = k_\alpha \alpha$, где k_α — жесткость пружины.



Рис. 5.2. Магазин сопротивлений Р33

Приборы, в которых момент $M_{пр}$ создается не механической пружиной, а за счет электрического противодействующего момента, называются *логометрами*.

Логометр представляет собой совмещение двух приборов, один из которых создает вращающий момент, а второй — противодействующий. Поэтому в обозначении логометра присутствует изображение двух подвижных элементов (например, х — магнитоэлектрический логометр).

5.1.2. Конструктивные элементы

Все электромеханические приборы несмотря на конструктивные отличия имеют ряд общих узлов и деталей: опоры подвижной части, отсчетные устройства, корректоры, успокоители, балансирующие грузики, корпусы.

Подвижная часть (рамка, магнит или стальной сердечник) может быть установлена на растяжках (рис. 5.3, *а*), подвесе (рис. 5.3, *б*) или кернах (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 и представляет собой винт, выведенный на переднюю панель прибора. Обычно он связан со вторым концом спиральной пружины.

Успокоитель служит для гашения колебаний подвижной части. Он может быть воздушным, жидкостным и магнитоиндукционным. В воздушном успокоителе, как правило, вместе с подвижной

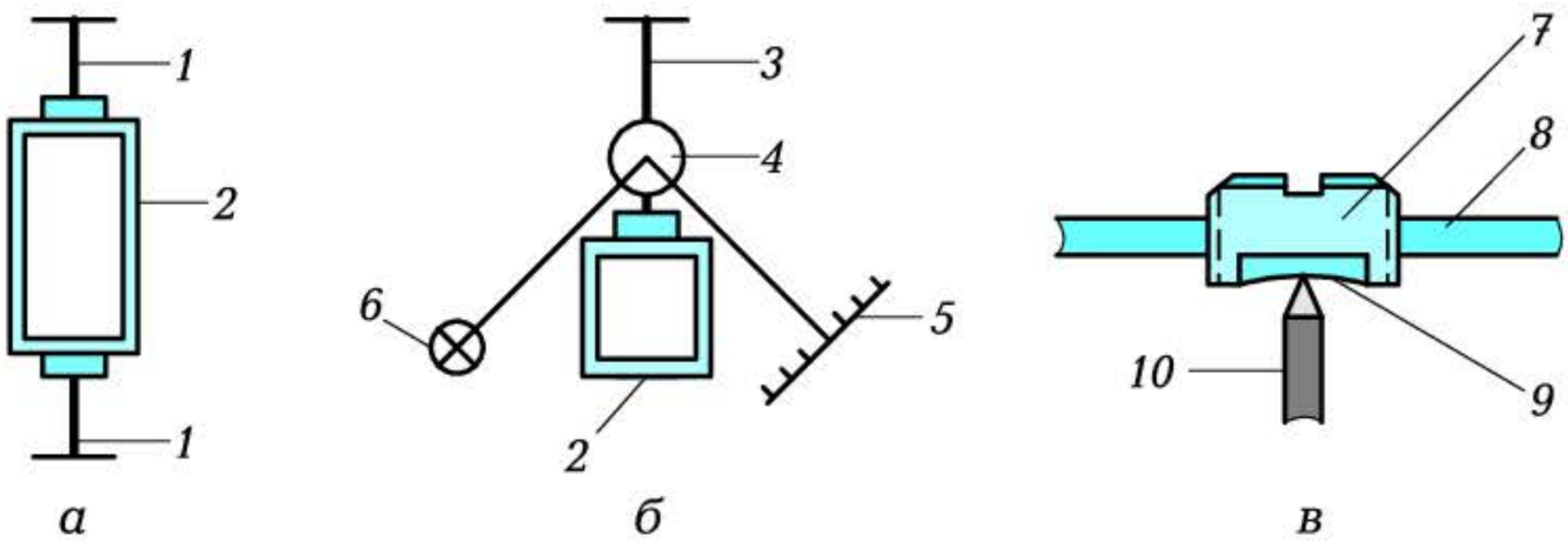


Рис. 5.3. Виды опор подвижной части:

а — растяжка; *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

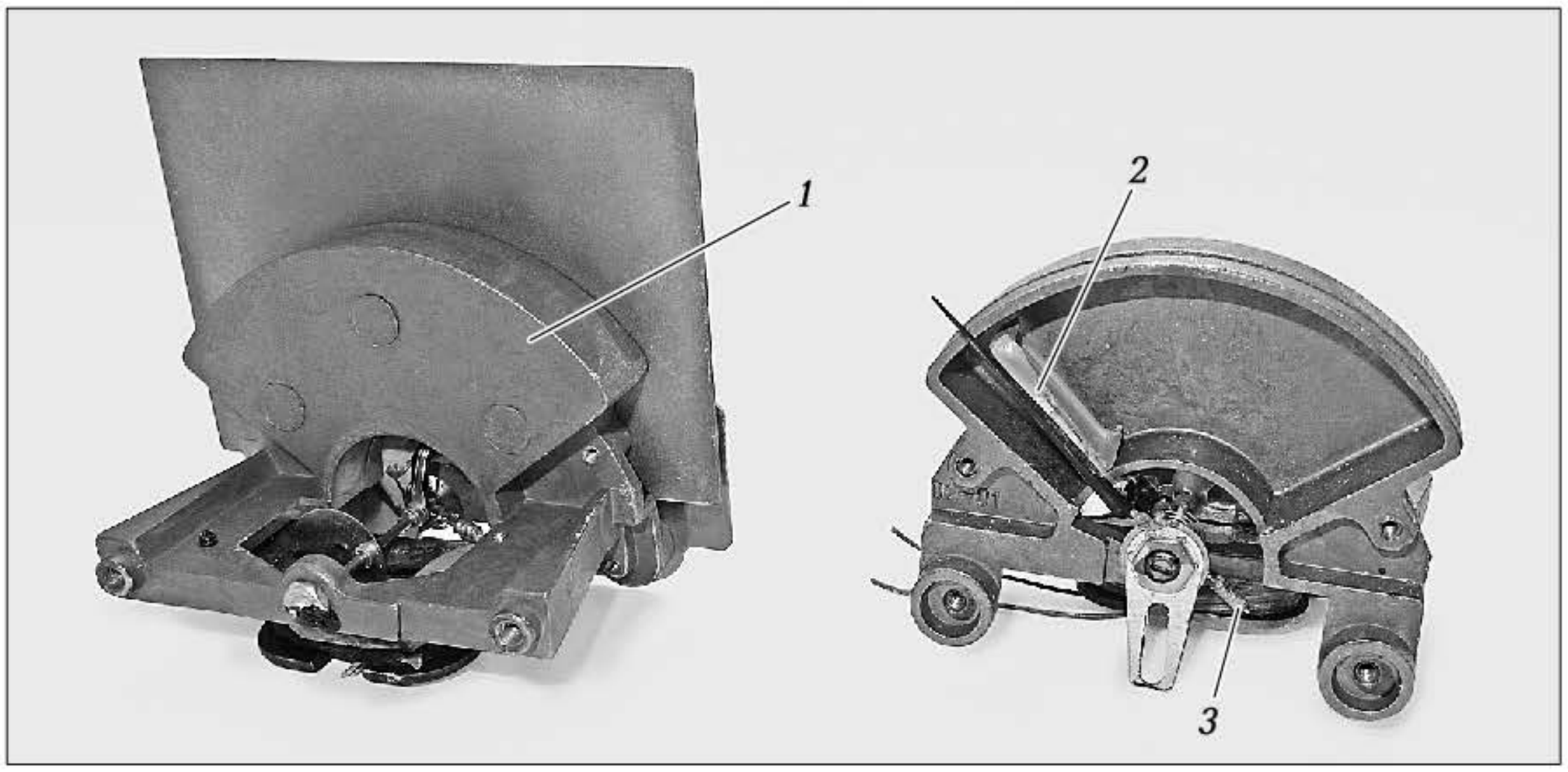


Рис. 5.4. Прибор с воздушным успокоителем:

1 — воздушная камера; *2* — алюминиевое крыло; *3* — балансирующие грузики

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

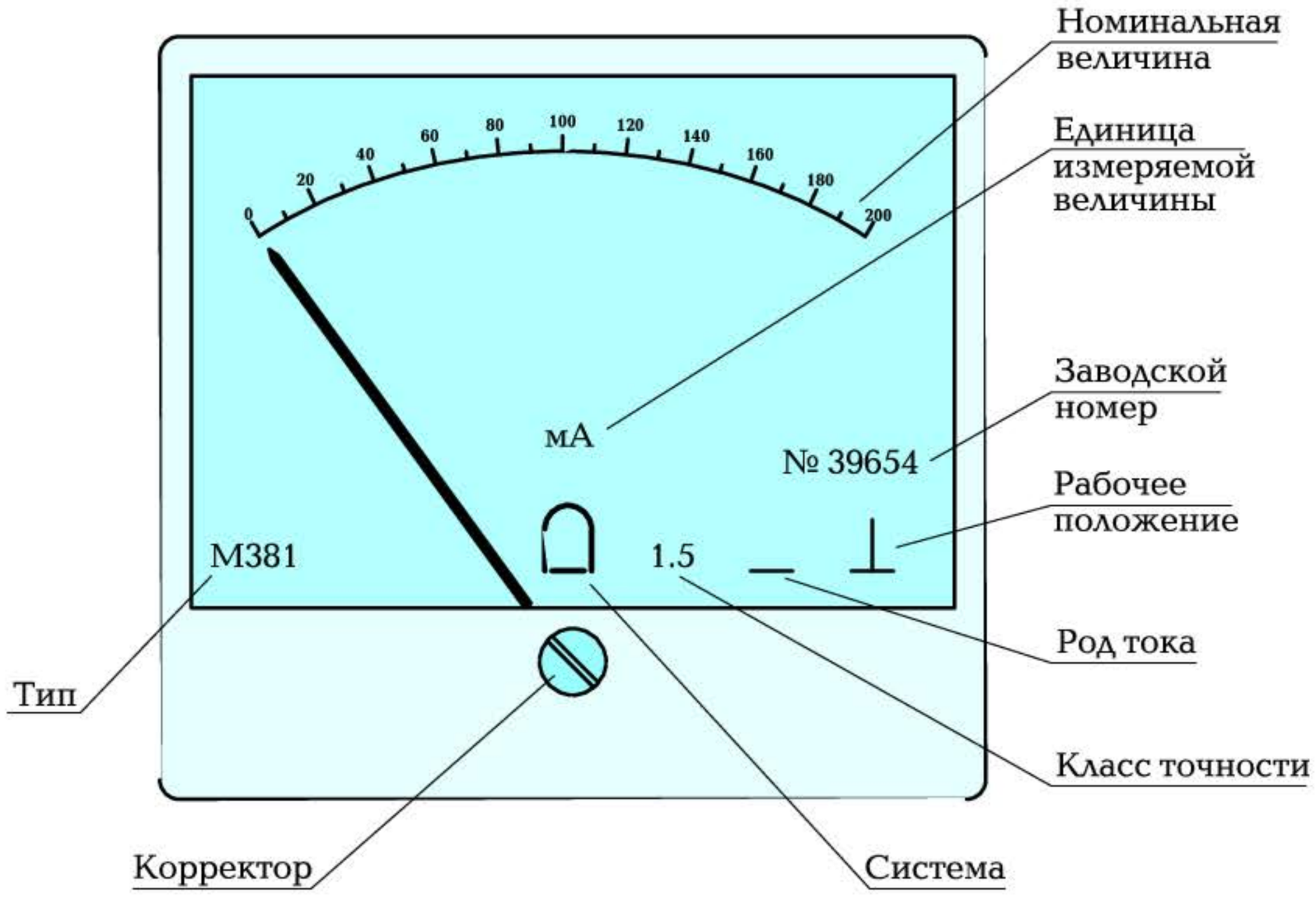


Рис. 5.5. Передняя панель электромеханического прибора

более 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 вращения. Грузики выполняются в виде навинчивающихся цилиндров *3* (см. рис. 5.4).

Корпус прибора служит для защиты измерительного механизма от механических воздействий.

На передней панели прибора наносится ряд обозначений (рис. 5.5).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое измерение?
2. Какие параметры измеряют электроизмерительные приборы?
3. Нарисуйте схему прибора прямого действия и прибора сравнения.
4. Перечислите и охарактеризуйте основные конструктивные элементы электромеханических измерительных приборов.
5. Что указывается на передней панели прибора?

5.2. КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМ

5.2.1. Магнитоэлектрические приборы

В магнитоэлектрических приборах вращающий момент возникает в результате взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и проводника (рамки) с током.

Магнитоэлектрический измерительный механизм с подвижной катушкой (рис. 5.6, *а*) состоит из постоянного магнита *3*, рамки *2*, выполняемой либо на алюминиевом каркасе *1*, либо бескаркасно, выходных зажимов *4*, спиральных пружин *5*, токоведущих шин *6*, корректора *7*, балансирующих грузиков *8*, опор *9*, оси *10*, стрел-

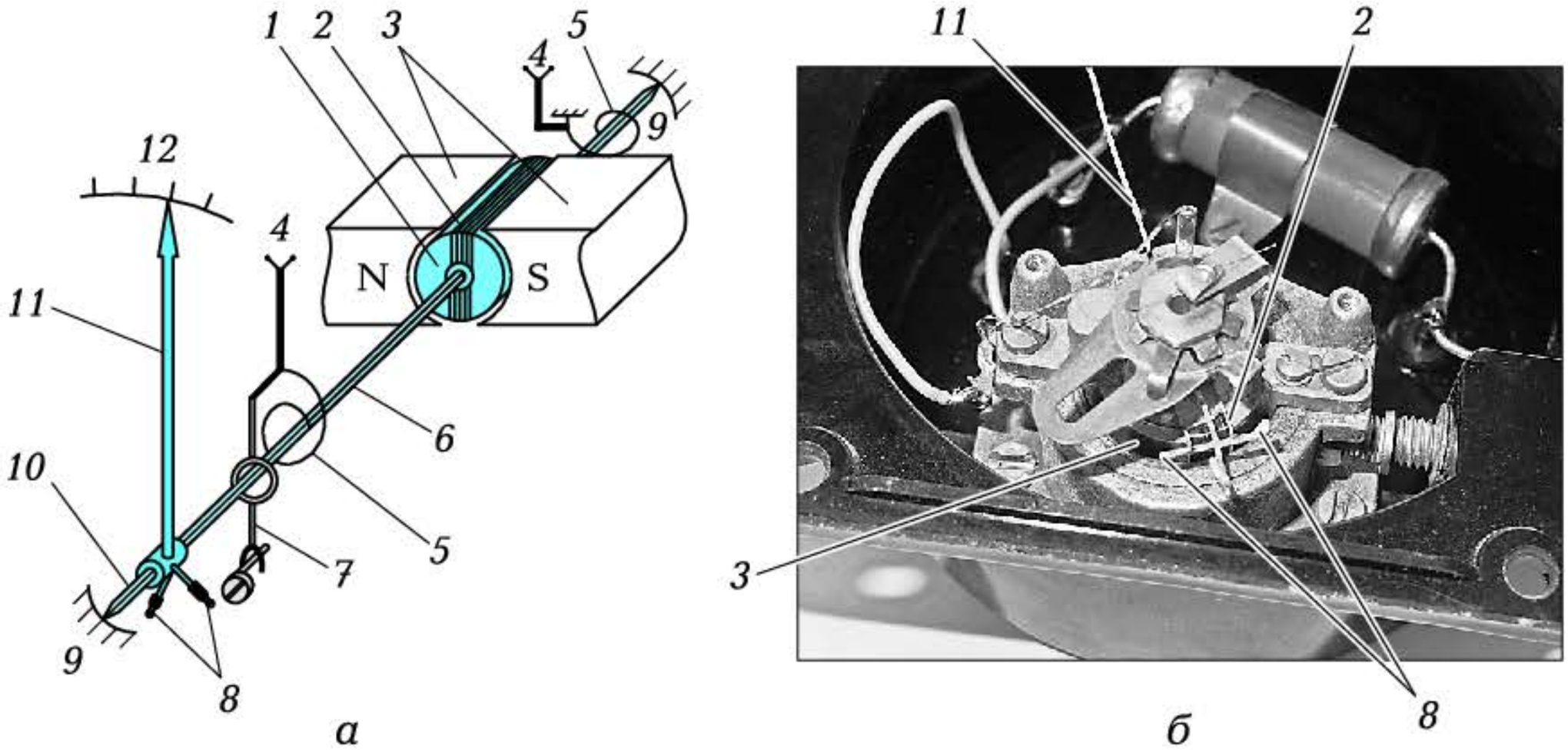


Рис. 5.6. Электроизмерительный прибор магнитоэлектрической системы:

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

ки *11*, шкалы *12*. Измеряемая величина (ток) подводится к зажимам *4* и через спиральные пружины *5*, токоведущие шины *6* на оси *10* подходит к рамке *2*.

На рис. 5.6, *б* приведен фрагмент измерительного механизма магнитоэлектрического вольтметра.

В соответствии с формулой Ампера на рамку с током I, находящуюся в поле постоянного магнита с индукцией B, действует вращающий момент

$$M_{вр} = c_м BI,$$

где $c_м$ — конструктивный коэффициент.

Противодействующий момент $M_{пр}$ создается механической пружиной с коэффициентом жесткости k_α. Уравнение шкалы получаем на основе равенства моментов $M_{вр} = M_{пр}$. В этом случае $c_м BI = k_\alpha \alpha$, откуда $\alpha = (c_м B/k_\alpha)\ I$. Обозначив $k_1 = c_м B/k_\alpha$, получим

$$\alpha = k_1 I.$$

Уравнение шкалы позволяет сделать два вывода.

1. Магнитоэлектрический прибор чувствителен к полярности тока, т. е. при изменении направления тока изменяется направле-

ние отклонения подвижной системы. Следовательно, при подключении прибора к сети переменного тока из-за инерционности подвижной части отсчетное устройство 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 (напряжения) больше номинальных (перегорают токоподводящие пружины и токоведущие шины).

Магнитоэлектрические приборы используются главным образом в цепях постоянного тока в качестве амперметров, вольтметров, омметров.

При сочетании этих приборов с полупроводниковым выпрямителем они могут быть использованы для измерения переменного тока (рис. 5.7, *а*). В этом случае отклонение стрелки 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.

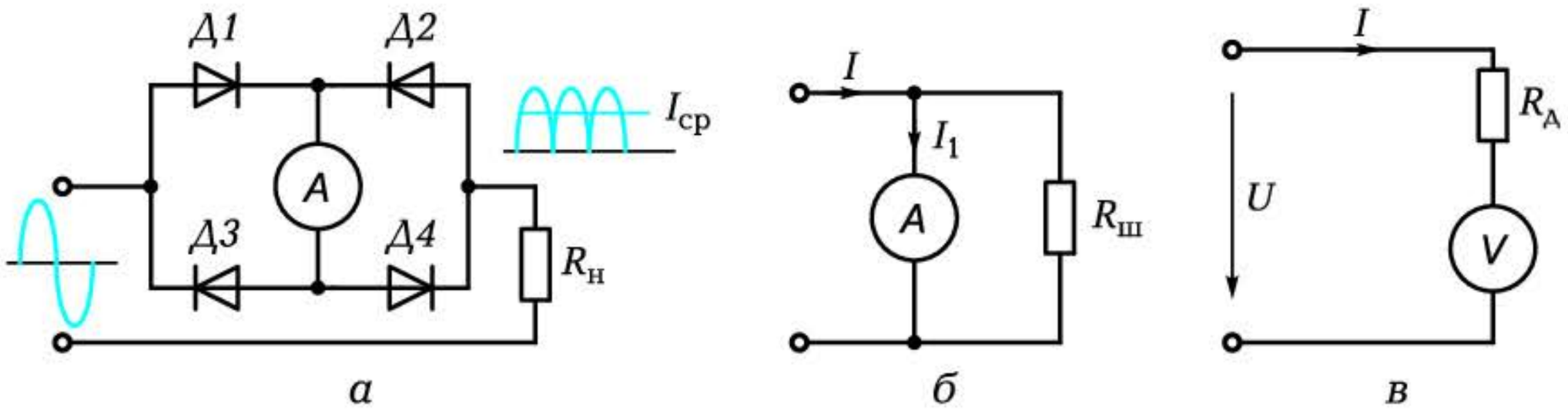


Рис. 5.7. Схемы измерительной цепи ЭИП магнитоэлектрической системы при измерении:

а — переменного тока; *б* — больших токов; *в* — больших напряжений

Для измерения малых токов (20...30 мА) измерительный механизм магнитоэлектрического прибора непосредственно включается в цепь. Если токи больше 30 мА, то применяется измерительная цепь, которая преобразует большой ток I в малый I_1 (рис. 5.7, *б*). Это достигается за счет включения параллельно измерительному прибору специального резистора — шунта. При этом бóльшая часть тока замыкается через шунт, поскольку $R_{ш} << R_{и.м}$.

Таким образом, для расширения пределов измерения амперметра параллельно его измерительному механизму включается резистор с малым сопротивлением — шунт.

В вольтметрах последовательно с измерительным механизмом включается резистор $R_д$ (рис. 5.7, *в*), преобразующий измеряемую величину U в промежуточную I, на которую и реагирует прибор.

Для расширения пределов измерения вольтметра последовательно с его измерительным механизмом включается резистор со значительным сопротивлением.

5.2.2. Электромагнитные приборы

Конструктивная схема измерительного прибора электромагнитной системы приведена на рис. 5.8, *а*. На рис. 5.8, *б* показан фрагмент измерительного механизма электромагнитного вольтметра.

Рис. 5.8. 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

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:

$$M_{эм} = c_м(Iw)^2,$$

где $c_м$ — конструктивный коэффициент.

Электромагнитный момент уравновешивается противодействующей пружиной *6*: $M_{эм} = M_{пр} = k_\alpha\alpha$. Отсюда $c_м(Iw)^2 = k_\alpha\alpha$ и уравнение шкалы принимает вид $\alpha = (c_м w^2/k_\alpha)I^2$. Обозначив $k_2 = c_м w^2/k_\alpha$, получим

$$\alpha = k_2 I^2.$$

Из уравнения шкалы следуют два вывода.

1. Направление отклонения стрелки не зависит от направления тока, так как угол отклонения пропорционален квадрату тока. Поэтому исполнительный механизм пригоден для измерения как постоянного, так и действующего значения переменного тока.

2. Шкала прибора неравномерная. Для повышения равномерности используется специальная форма сердечника (профиль).

Достоинства прибора: простота, высокая перегрузочная способность (отсутствуют токоподводящие пружины).

Недостатки: невысокая точность, значительное собственное потребление энергии (нужно создать достаточное магнитное поле), зависимость от внешних магнитных полей (собственное поле слабое).

В основном приборы электромагнитной системы применяются в цепях переменного тока в качестве амперметров и вольтметров.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что положено в основу работы прибора магнитоэлектрической системы?
2. Что следует из уравнения шкалы прибора магнитоэлектрической системы?
3. Можно ли измерить переменный ток прибором магнитоэлектрической системы?
4. Что положено в основу работы прибора электромагнитной системы?
5. Что следует из уравнения шкалы прибора электромагнитной системы?

5.3. КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ И ИНДУКЦИОННОЙ СИСТЕМ. САМОПИШУЩИЕ И РЕГИСТРИРУЮЩИЕ ПРИБОРЫ

5.3.1. Электродинамические приборы

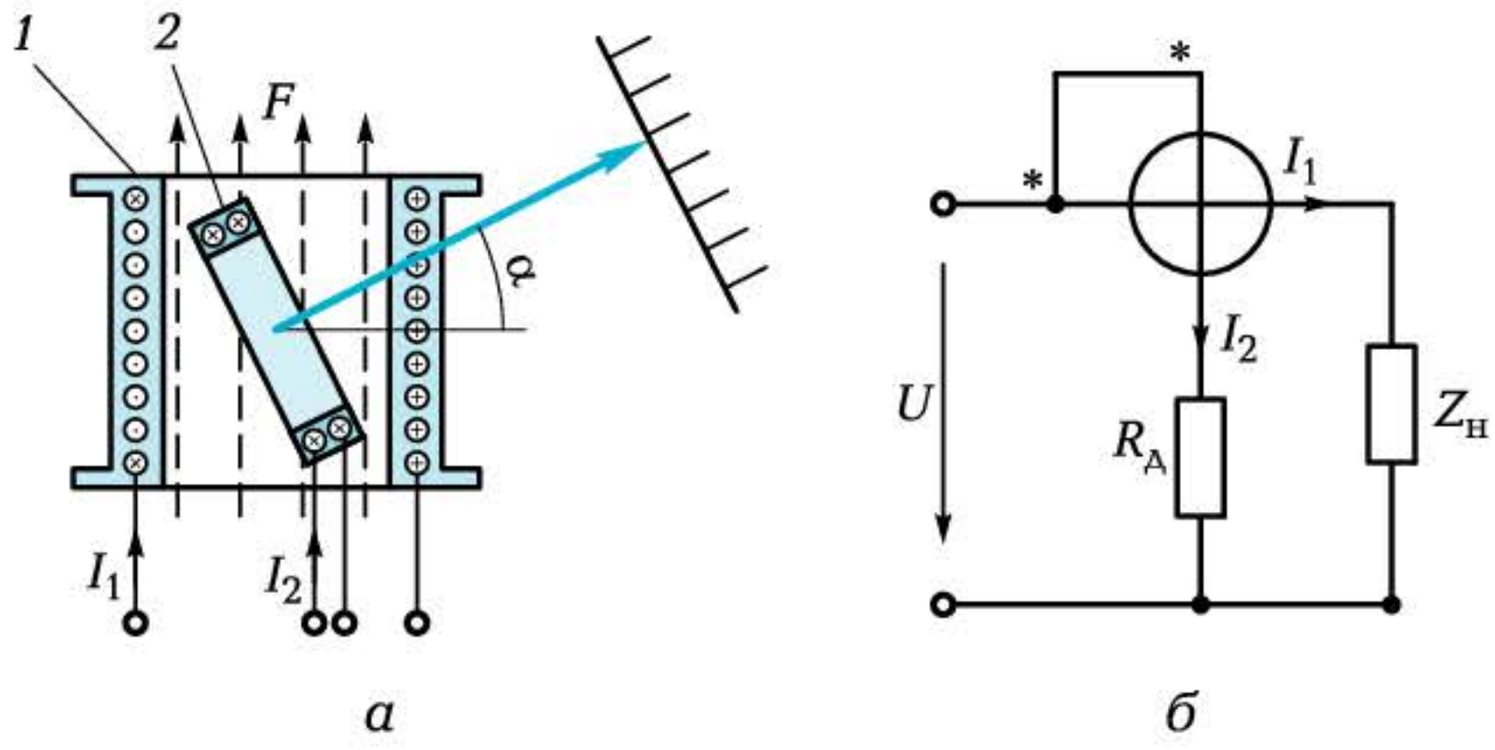
Электродинамический прибор выполняется по схемам, представленным на рис. 5.9. Он имеет неподвижную катушку *1* и подвижную катушку *2*, располагаемую в магнитном поле Ф неподвижной катушки. При протекании тока I_2 по обмотке подвижной катушки она поворачивается внутри неподвижной до тех пор, пока развиваемая сила не будет уравновешена противодействующей силой пружины.

По сути, это прибор магнитоэлектрической системы, в котором постоянный магнит заменен электромагнитом с катушкой *1*.

Поскольку магнитное поле неподвижной катушки создается током I_1, а в обмотке подвижной катушки течет ток I_2, то можно записать

$$M_{эм} = c_м I_1 I_2.$$

Отсюда уравнение шкалы принимает вид $\alpha = (c_м / k_\alpha) I_1 I_2$.



а *б*

Рис. 5.9. Электроизмерительный прибор электродинамической системы:

а — схема, поясняющая принцип действия; *б* — схема включения катушек; *1* — неподвижная катушка; *2* — подвижная катушка

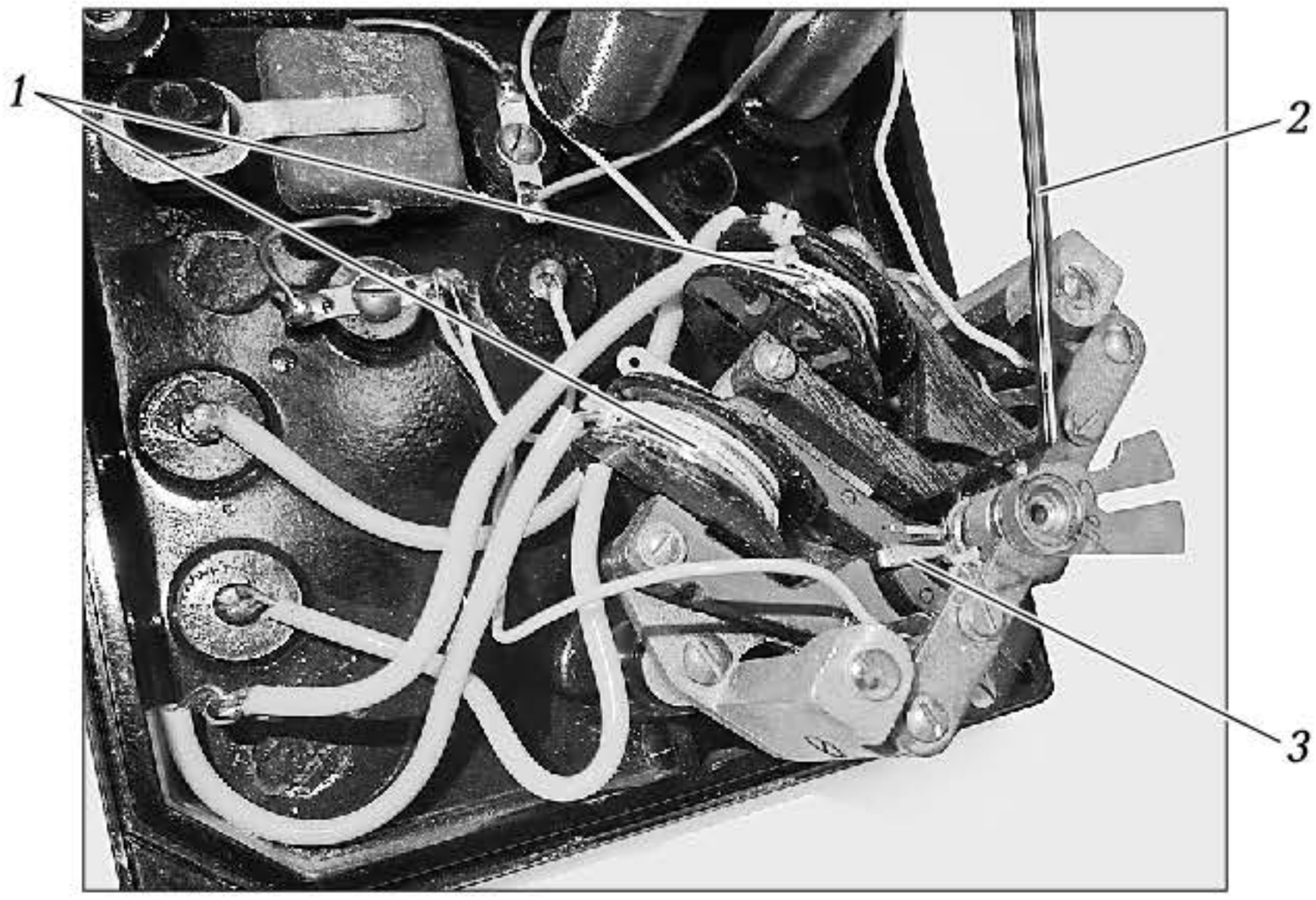


Рис. 5.10. Фрагмент измерительного механизма прибора электродинамической системы:

1 — неподвижные катушки; *2* — стрелка; *3* — подвижная катушка

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, $k_3 = c_м / k_\alpha$.

Таким образом, отклонение стрелки пропорционально мощности, потребляемой нагрузкой.

Из уравнения шкалы следуют два вывода.

1. При одновременном изменении направления токов I_1 и I_2 направление отклонения стрелки не изменится. Прибор пригоден для измерения постоянного и переменного токов.

2. Шкала прибора в общем случае неравномерна, однако при неизменной величине подводимого напряжения может быть линейной.

На рис. 5.10 приведен фрагмент измерительного механизма прибора.

Достоинство прибора — высокая точность (отсутствуют части, содержащие железо).

Недостатки: значительное собственное потребление, большая чувствительность к внешним магнитным полям, высокая стоимость из-за сложности изготовления.

В основном приборы используются на переменном токе для измерения мощности. Однако промышленность выпускает элект-

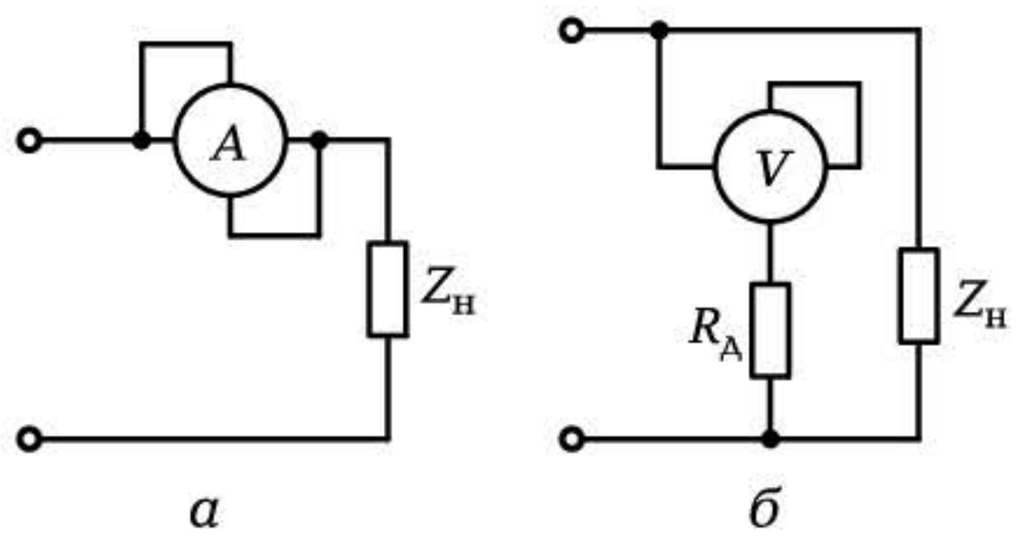


Рис. 5.11. Схемы измерительной цепи ЭИП электродинамической системы при измерении:

а — тока; *б* — напряжения

родинамические амперметры и вольтметры, которые используются при точных измерениях (класс точности до 0,1). Схемы включения прибора в ЭЦ в этом случае приведены на рис. 5.11.

В амперметре обе катушки включаются параллельно друг другу, а затем — последовательно с нагрузкой $Z_н$, а в вольтметре — последовательно друг с другом и добавочным резистором $R_д$, а затем — параллельно нагрузке $Z_н$.

Амперметр и вольтметр имеют на корпусе лишь два зажима, поскольку соединения катушек между собой выполнены внутри прибора.

5.3.2. Индукционные приборы

Принцип работы индукционного прибора (рис. 5.12) основан на взаимодействии переменных магнитных полей Φ_1 и Φ_2 с вихревыми токами *3*, индуктируемыми этими полями в подвижном алюминиевом диске *2*. Следовательно, индукционные приборы применяются только на переменном токе и в основном используются в электрических счетчиках.

Один из электромагнитов *1* подключается к сети параллельно, а второй — последовательно с нагрузкой, т. е. $\Phi_1 = k_1 U$, а $\Phi_2 = k_2 I_н$. В этом случае вращающий момент $M_{вр} = kUI_н \cos\varphi = kP$, т. е. пропорционален активной мощности P, потребляемой нагрузкой.

Противодействующий момент $M_{пр}$ создается постоянным магнитом *4* и пропорционален частоте вращения диска n: $M_{пр} = k_\alpha n$.

При установившейся частоте вращения подвижного диска $M_{вр} = M_{пр}$, и следовательно, потребляемая мощность пропорциональна частоте вращения диска.

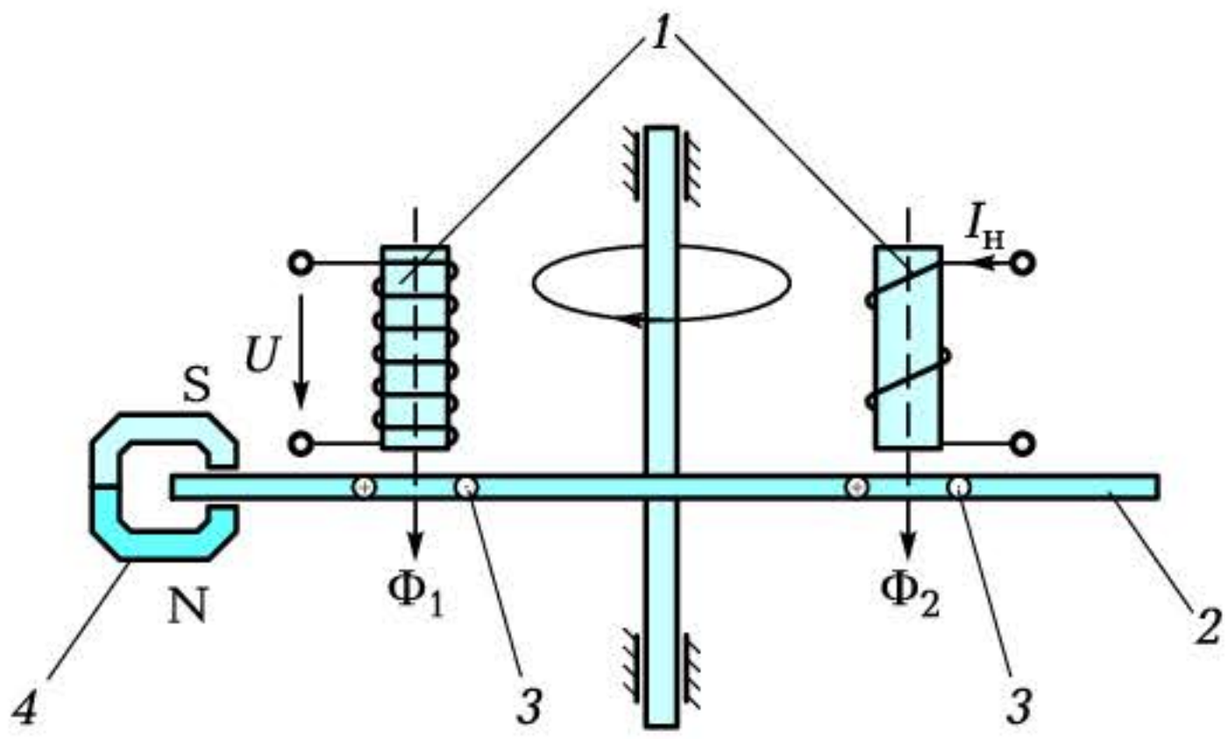


Рис. 5.12. Условная конструктивная схема прибора индукционной системы:

1 — электромагниты; *2* — алюминиевый диск; *3* — вихревые токи; *4* — постоянный магнит

5.3.3. Самопишущие и регистрирующие приборы

Все рассмотренные ранее приборы относились к показывающим. На практике находят применение также приборы самопишущие для записи показаний в течение длительного промежутка времени и регистрирующие, предназначенные для фотографирования быстропротекающих процессов.

Самопишущие приборы строятся на основе рассмотренных ранее систем с той лишь разницей, что указатель прибора (ось стрелки *1* — рис. 5.13) связан с пером *2*, которое с помощью чернил осуществляет запись показаний на движущейся с постоянной скоростью диаграмме *3*.

В качестве *регистрирующих* приборов (рис. 5.14) используются электромеханические осциллографы (светолучевые). Основным элементом осциллографа является гальванометр — миниатюрный зеркальный прибор магнитоэлектрической системы.

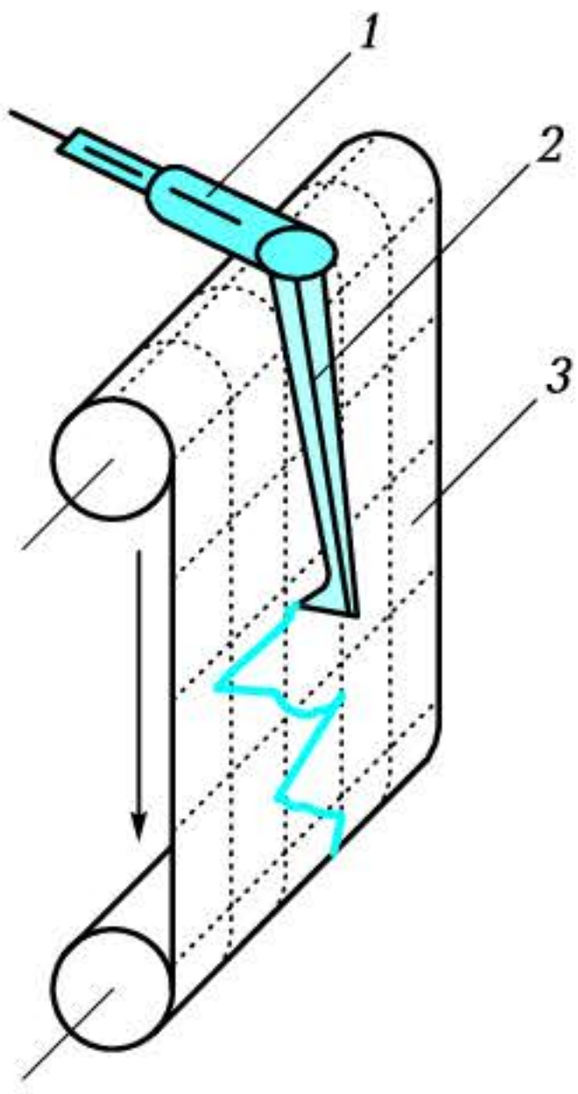


Рис. 5.13. Самопишущий прибор:

1 — ось стрелки; *2* — перо с чернилами; *3* — бумажная диаграмма

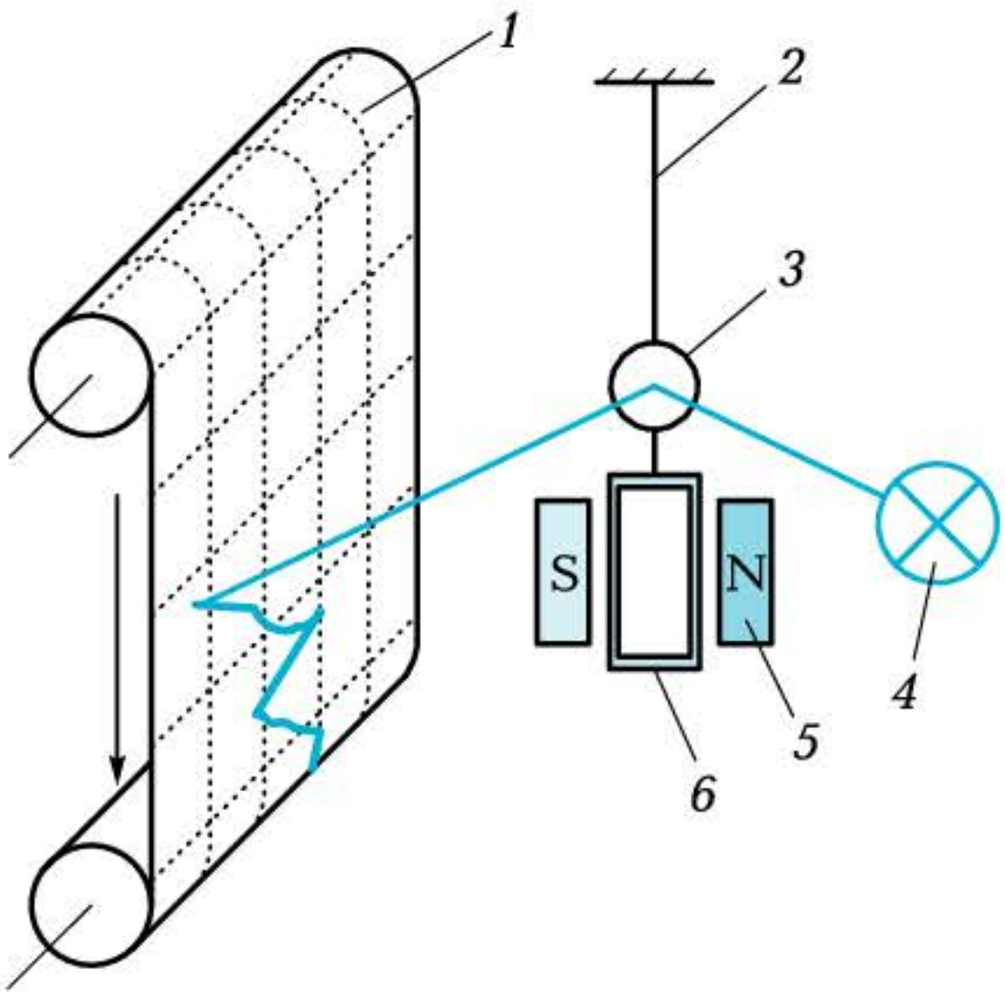


Рис. 5.14. Регистрирующий прибор:

1 — фотобумага; *2* — подвес; *3* — зеркальце; *4* — лампочка; *5* — постоянный магнит; *6* — рамка с током

Обычно светолучевой осциллограф имеет несколько гальванометров, что позволяет одновременно регистрировать несколько контролируемых параметров.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните принцип действия прибора электродинамической системы, укажите его достоинства и недостатки, области применения.
2. Поясните принцип действия прибора индукционной системы, укажите его достоинства и недостатки, области применения.
3. Поясните принцип работы и отличия самопишущих и регистрирующих приборов.

5.4. ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

5.4.1. Особенности электронных измерительных приборов

Помимо электромеханических ИП 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. отсутствие влияния прибора на режимы работы цепи;
- широкий диапазон измеряемых частот исследуемого сигнала.

Все эти достоинства стали возможными благодаря введению в состав прибора ряда электронных устройств: усилителей, генераторов, импульсных устройств, выпрямителей, стабилизаторов и т. д. Применение этих устройств, в том числе усилителей с высоким коэффициентом усиления и большим входным сопротивлением, позволяет значительно повысить чувствительность и снизить потребление 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 вместо 45...1 500 Гц для электромеханических приборов.

Использование электронных устройств усложнило схему прибора, увеличило его габаритные размеры и вес, снизило надежность. Однако электронные приборы позволяют решать задачи, которые не могут решить другие приборы.

Широкое применение в технике нашли электронные приборы общего назначения: электронные осциллографы, электронные вольтметры, измерительные генераторы.

5.4.2. Электронно-лучевой осциллограф

Электронно-лучевой осциллограф предназначен для визуальных наблюдений и записи изменяющихся во времени электрических величин: напряжения, частоты, тока, фазы.

Основной частью прибора является электронно-лучевая трубка с электрическим отклонением луча (рис. 5.15, *а*). Она состоит из катода *К*, управляющего яркостью электрода *УЭ*, группы анодов *А*, 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 вертикаль-

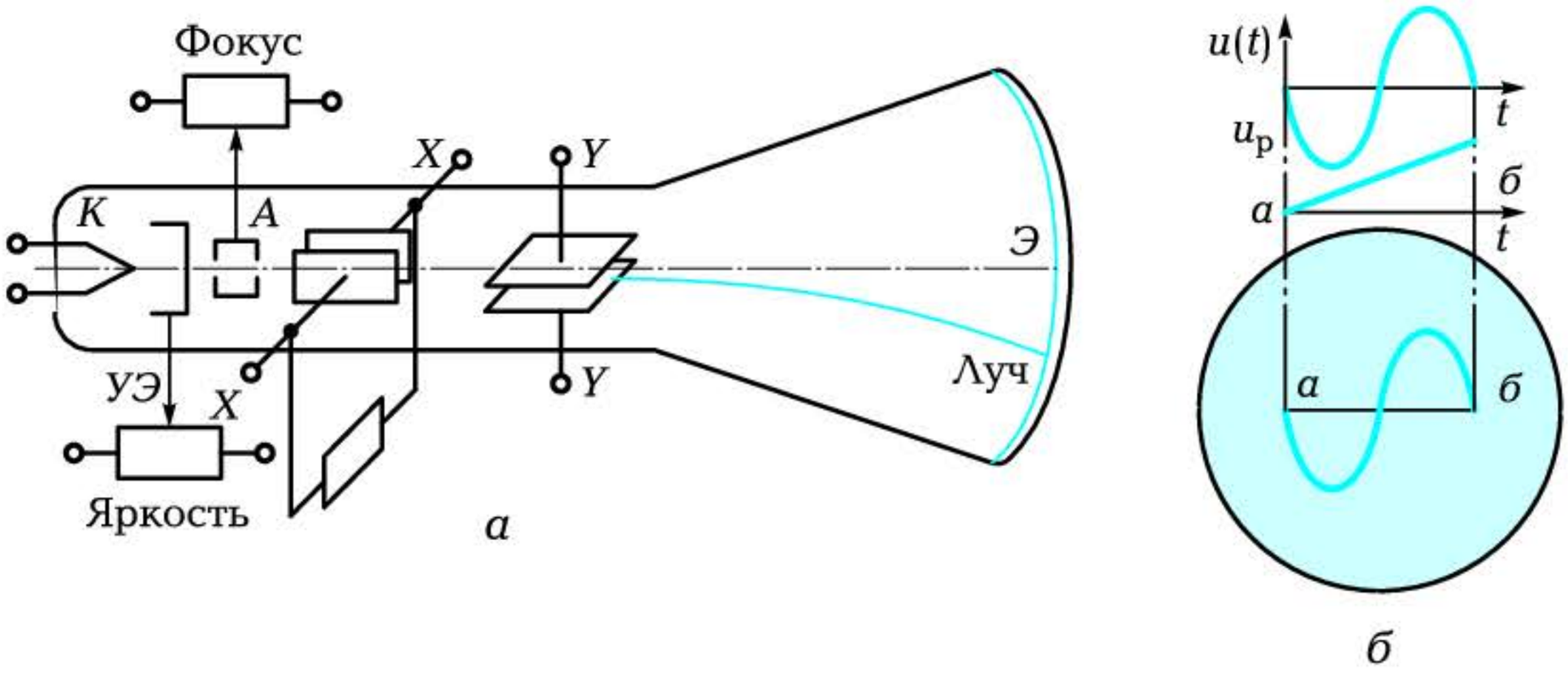


Рис. 5.15. Электронно-лучевая трубка осциллографа:

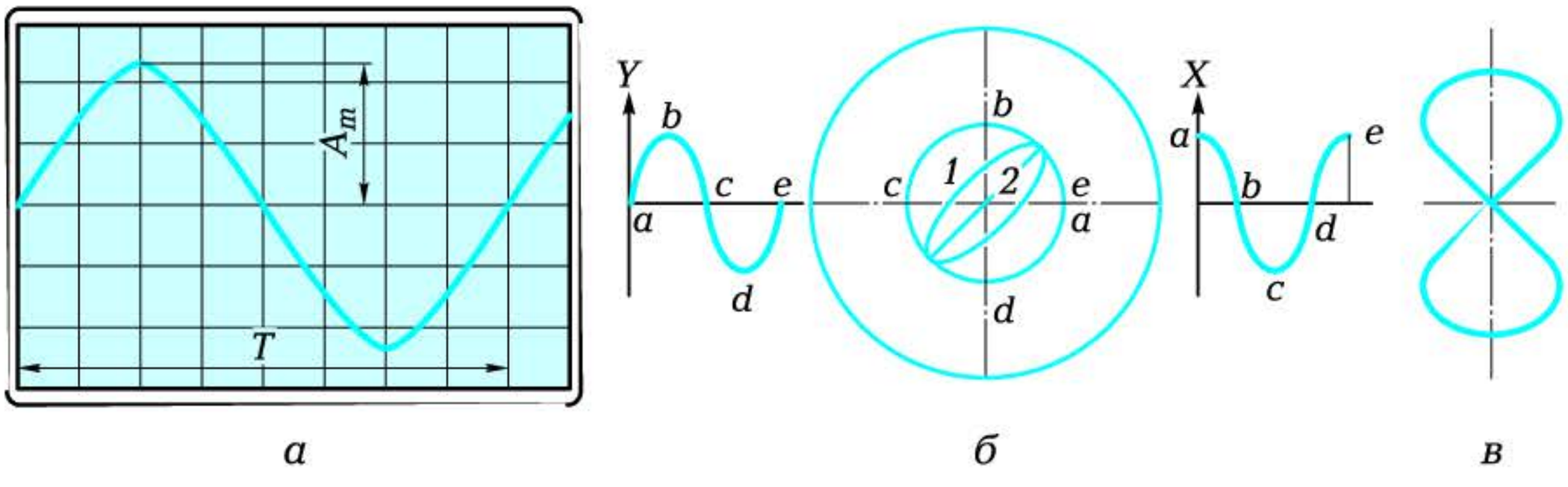
а — конструктивная схема; *б* — схема формирования изображения на экране осциллографа

ном или горизонтальном направлении на переднюю панель прибора выведены соответствующие ручки (↕ ↔).

Для наблюдения за периодическим процессом исследуемый сигнал $u(t)$ подводится к вертикальным пластинам $Y — Y$. К горизонтальным пластинам $X — X$ подводится пилообразное напряжение $u_р$, период которого равен периоду исследуемого напряжения или в целое число раз больше него.

Если $u(t) = 0$, то на экране горизонтальная линия. При $u(t) \neq 0$ на экране появляется вертикальный сигнал, который изменяется, пока существует напряжение развертки $u_р$ (от *а* до *б*) (рис. 5.15, *б*). В точке *б* $u_р$ мгновенно падает до нуля, луч мгновенно перемещается из точки *б* в точку *а* и процесс повторяется вновь. В результате на экране осциллографа появляется изображение исследуемого сигнала. Экран обладает световой инерцией, что позволяет видеть процессы непрерывными. Горизонтальная развертка формируется за счет генератора пилообразных напряжений с широким диапазоном частот, что дает возможность исследовать сигналы в диапазоне от десятков герц до десятков мегагерц.

Кроме наблюдения за периодическим процессом электронный осциллограф служит для измерений различных параметров исследуемого сигнала: его амплитуды, частоты, фазы. Это осуществляется за счет использования дополнительных устройств: источника калиброванного напряжения, стабильных генераторов меток, проградуированных в единицах времени и т. д. При неподвижном изображении синусоидального сигнала (рис. 5.16, *а*) с по-



а *б* *в*

Рис. 5.16. Измерение амплитуды и частоты сигнала с помощью калиброванных меток (*а*) и частоты с помощью фигур Лиссажу (*б*, *в*)

мощью сетки на экране осциллографа можно измерить амплитуду исследуемого сигнала A_m (2,2 деления) и период T (8 делений). Пусть переключатель «Усиление» стоит в положении 10 мВ в делении, а «Длительность развертки» — 2 мс в делении. Следовательно, 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. 5.16, *б*). Если на вертикальные и горизонтальные входы осциллографа подать синусоидальные сигналы одной частоты, но сдвинутые по фазе на 90°, то на экране будем иметь окружность.

Если угол сдвига фаз отличается от 90°, то окружность трансформируется в эллипс (*1*), а если угол сдвига фаз равен нулю — в прямую линию (*2*).

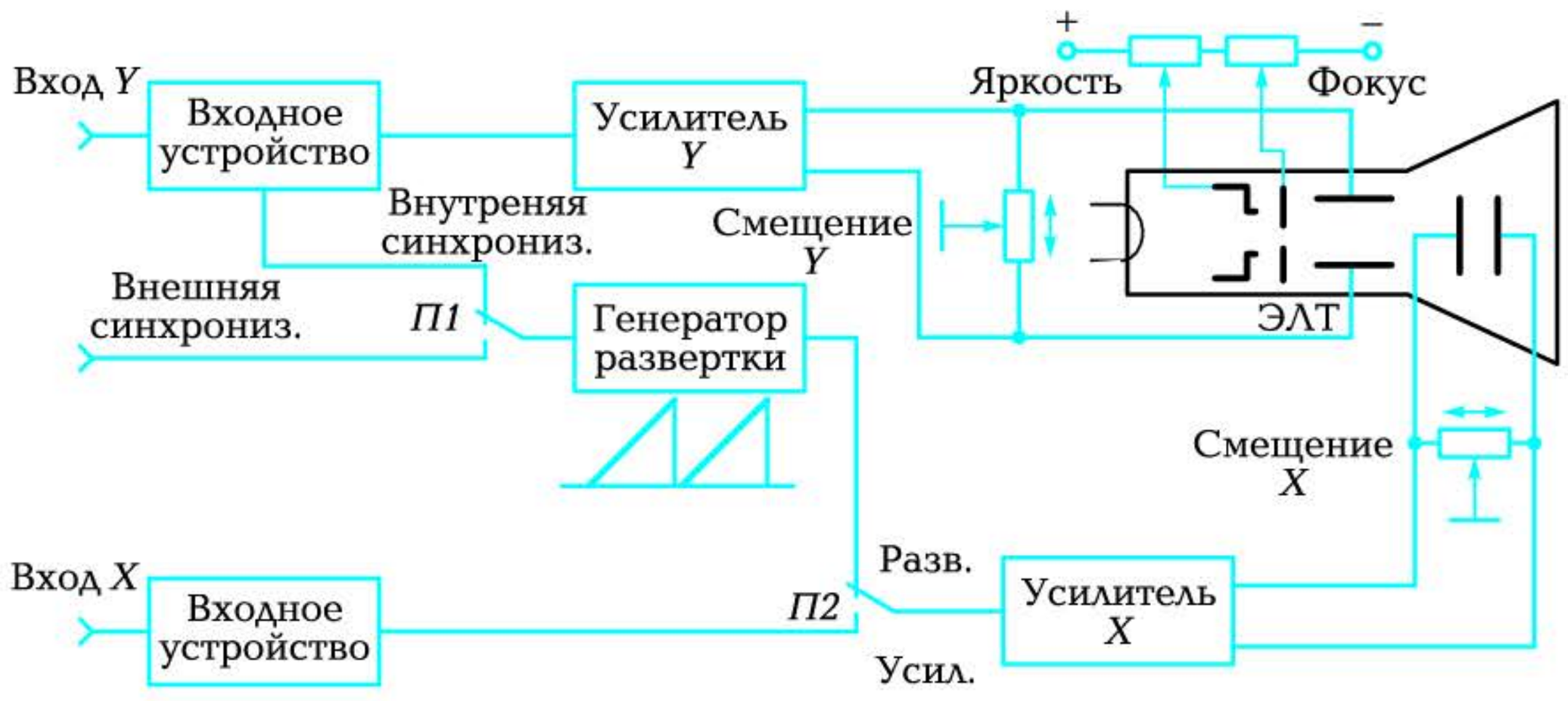


Рис. 5.17. Структурная схема осциллографа



Рис. 5.18. Внешний вид осциллографа ОСУ-10А

Если на один из входов подать сигнал двойной частоты, то фигура будет иметь вид, показанный на рис. 5.16, *в* ($f_{иссл} = f/2$).

На рис. 5.17 приведена структурная схема осциллографа, а на рис. 5.18 — его внешний вид. Исследуемый сигнал подается на вход *Y* (см. рис. 5.17) и через входное устройство и усилитель *Y* поступает на вертикально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки. На горизонтально отклоняющие пластины поступает сигнал с генератора развертки через переключатель *П2* и усилитель *X*. На экране электронно-лучевой трубки отображается временна́я 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* в положении «Усиление» и усилитель *X* на горизонтально отклоняющие пластины.

5.4.3. 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 подразде-

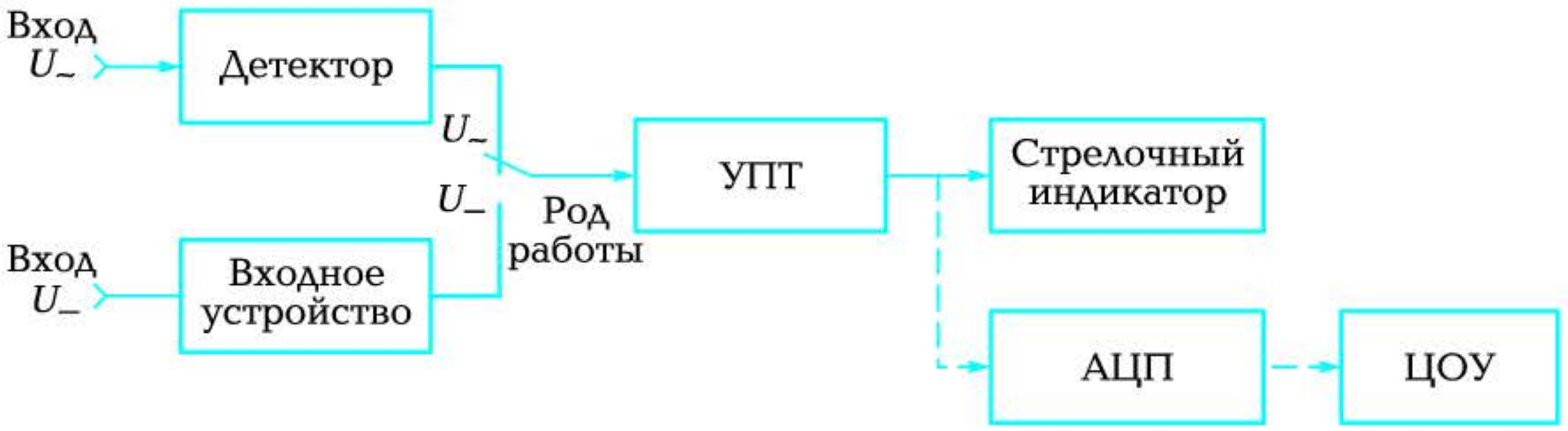


Рис. 5.19. Структурная схема универсального вольтметра

ляют на стрелочные, в которых отсчет ведется по стрелочному прибору, и цифровые, в которых отсчет ведется на цифровом табло.

По роду тока электронные вольтметры подразделяются на приборы постоянного тока, переменного тока и комбинированные, предназначенные для измерения как постоянного, так и переменного тока, а также сопротивления.

Основными узлами вольтметра являются (рис. 5.19) *входное устройство* (делитель напряжения), *усилитель* (постоянного тока — УПТ или широкополосный), *детектор* (выпрямитель с фильтром),



Рис. 5.20. Внешний вид вольтметра В7-26

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 напряжений.

Внешний вид универсального вольтметра приведен на рис. 5.20.

5.4.4. Электронный генератор

Для исследования ряда электронных устройств (например, усилителей) широко используются *измерительные генераторы*. На рис. 5.21 приведена структурная схема генератора синусоидальных колебаний низкой частоты, а на рис. 5.22 — внешний вид прибора.

Задающий генератор представляет собой *RC*-автогенератор с регулируемой частотой (дискретно и плавно). Ручки регулирова-

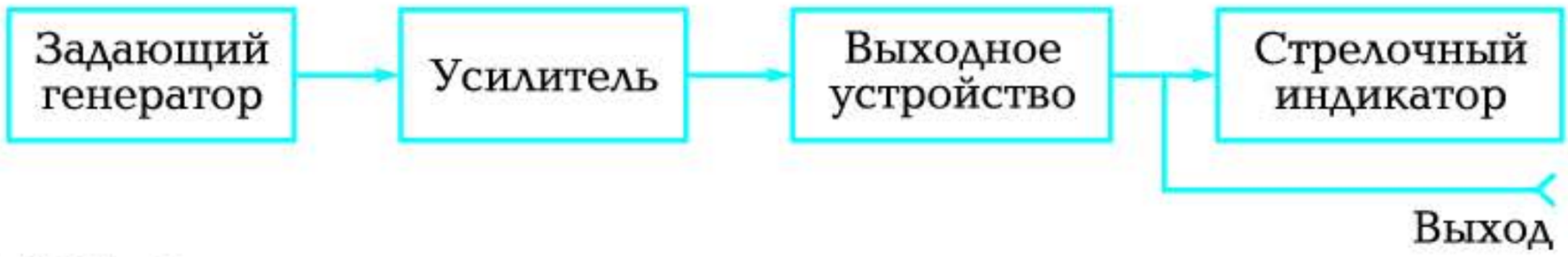


Рис. 5.21. Структурная схема генератора



Рис. 5.22. Внешний вид генератора Г3-131

ния 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 в себя делители напряжения для регулирования уровня выходного сигнала (вынесены на переднюю панель прибора), контролируемого с помощью стрелочного индикатора.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы основные преимущества электронных приборов?
2. Для чего предназначен осциллограф?
3. Поясните принцип формирования на экране осциллографа видеоизображения исследуемого сигнала.
4. Поясните структурную схему осциллографа.
5. Поясните структурную схему электронного вольтметра.
6. Поясните структурную схему генератора.

5.5. ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ. ИЗМЕРЕНИЕ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

5.5.1. Мультиметры

В последнее время все более широкое применение получают многофункциональные приборы — мультиметры (рис. 5.23). Они строятся на базе микропроцессорной техники и имеют цифровой выход на дисплей, а также интерфейс связи с компьютером (порт *RS*-232). Мультиметры снабжены индикатором разряда батареи и перегрузки, автоотключением через 10 мин простоя. Погрешность измерения находится в диапазоне от 0,5 до 3 %. Мультиметры могут выполнять до 18 измерительных функций, в том числе измерение частоты, температуры, параметров диодов и транзисторов, звуковую прозвонку.

Мультиметр позволяет непосредственно измерить емкость конденсатора, причем в достаточно широких пределах (от 1 пФ до



Рис. 5.23. Внешний вид мультиметра *MY*-63

20 мкФ). Измерение бóльших значений емкости требует других приборов или других методов измерения.

В процессе измерений необходимо следить за тем, чтобы переключатель режимов работы был установлен в соответствующее положение, определяемое типом измеряемой величины и диапазоном измерения.

Усредненные технические характеристики профессионального мультиметра (диапазоны измеряемых величин):

Напряжение постоянного тока, В ..... 0,1 ... 1 000
Напряжение переменного тока, В ..... 0,1 ... 750
Ток, А ..... $1 \cdot 10^{-4}$ ... 20
Сопротивление, Ом ..... 0,1 ... $2 \cdot 10^{8}$
Емкость, пФ ..... 1 ... $2 \cdot 10^{7}$
Температура, °С ..... –40 ... 1 200
Входное сопротивление, МОм 10
Коэффициент усиления транзисторов ..... До 1 000

5.5.2. Измерение индуктивности и емкости

Измерение активного сопротивления проще выполнять непосредственно с помощью омметра, хотя можно и косвенным методом с использованием вольтметра и амперметра. Индуктивности и емкости проще измерять косвенным методом.

Индуктивная катушка, выполненная медным или алюминиевым проводом, может быть представлена в виде включенных последовательно резистора и катушки индуктивности (рис. 5.24, *а*).

Активное сопротивление резистора $R_к$ может быть измерено омметром или косвенным методом на постоянном токе ($R_к = U/I$) либо с помощью ваттметра на переменном токе ($R_к = P/I^2$).

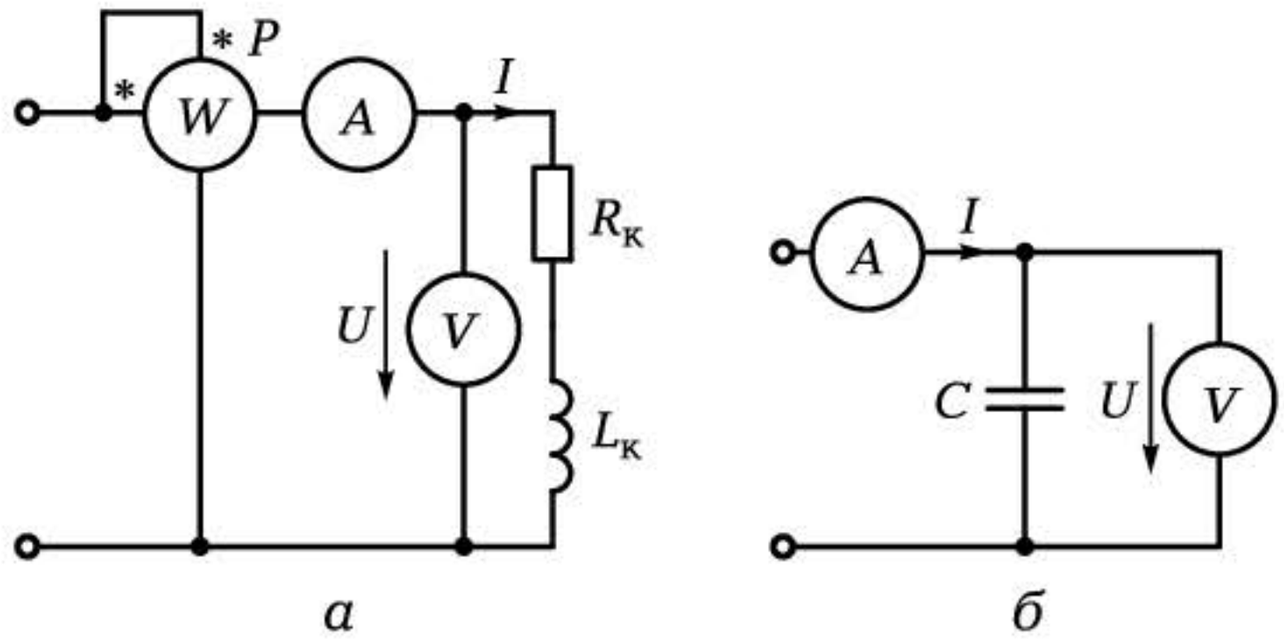


Рис. 5.24. Косвенный метод измерения:

а — индуктивности; *б* — емкости

Индуктивное сопротивление можно вычислить по формуле $X_L = \sqrt{Z_к^2 - R_к^2}$, где $Z_к = U/I$ — полное сопротивление на переменном токе. Поскольку $X_L = \omega L_к$, то индуктивность катушки

$$L_к = X_L/\omega.$$

Для измерения емкости конденсатора может быть использована схема, приведенная на рис. 5.24, *б*. Измерения выполняют на переменном токе. Поскольку $X_C = U/I = 1/(\omega C)$, то

$$C = 1/\omega X_C.$$

5.5.3. Измерение неэлектрических величин

Практически все технологические параметры, описывающие тот или иной технологический процесс и отображающие ту или иную физическую величину, 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 соответствующий электрический параметр: ЭДС, электрический ток, активное сопротивление, индуктивность или емкость.

Устройство, преобразующее любую 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 — в них изменение неэлектрической величины сопровождается изменением одного из 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*, *давление*, действующие на некоторые кристаллы или керамику, в пьезоЭДС;

термоэлектрические — преобразуют температуру в термоЭДС.

Пассивные преобразователи образуют широкую группу и подразделяются по принципу действия:

на *резистивные* — преобразуют *перемещение*, *давление*, *деформацию*, *толщину материала*, *температуру*, *уровень* в изменение *электрического сопротивления*;

индуктивные — преобразуют *перемещение*, *давление*, *силу*, *момент* в изменение *индуктивности*;

емкостные — преобразуют *силу*, *давление*, *перемещение*, *содержание влаги*, *количество вещества* в изменение *емкости*.

Поскольку изменение активного сопротивления, индуктивности и емкости сопровождается изменениями тока в электрической цепи, то для измерения неэлектрических величин могут быть использованы уже рассмотренные нами измерительные приборы. В то же время электрические сигналы с выхода датчика пропорциональны измеряемой неэлектрической величине, поэтому могут быть переданы на расстояние в систему автоматического управления технологическим процессом, где выполняется их обработка с помощью ЭВМ.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте характеристику мультиметра.
2. Как измерить индуктивность катушки и емкость конденсатора косвенным методом?
3. Что необходимо для того, чтобы измерить любую неэлектрическую величину?
4. Назовите основные виды активных преобразователей неэлектрических величин.
5. Перечислите и охарактеризуйте три вида пассивных преобразователей.

Глава 6

ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

6.1. ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

6.1.1. Основные понятия

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 прогрессирующей областью электроники является полупроводниковая техника, успешно конкурирующая с электронными и ионными приборами и вытесняющая их благодаря более высокому КПД, значительно меньшим габаритным размерам, большему сроку службы, меньшей потребляемой мощности. Поэтому будем рассматривать работу основных электронных устройств, построенных на *полупроводниковых* приборах.

6.1.2. Линейные элементы промышленной электроники

Современные устройства помимо активных нелинейных полупроводниковых приборов содержат значительное число пассивных линейных элементов — резисторов, конденсаторов и индуктивных катушек.

Эти элементы предназначены для обеспечения заданных режимов работы электронных устройств и взаимосвязи отдельных узлов.

Резисторы являются необратимыми преобразователями электрической энергии в тепловую. Резисторы подразделяются на постоянные и переменные (рис. 6.1). Для расчета сопротивления любого резистора используется выражение $R = \rho l/S$, где ρ — удельное электрическое сопротивление материала; l — длина проводника; S — площадь сечения проводника.

Единицей 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 изготовляются

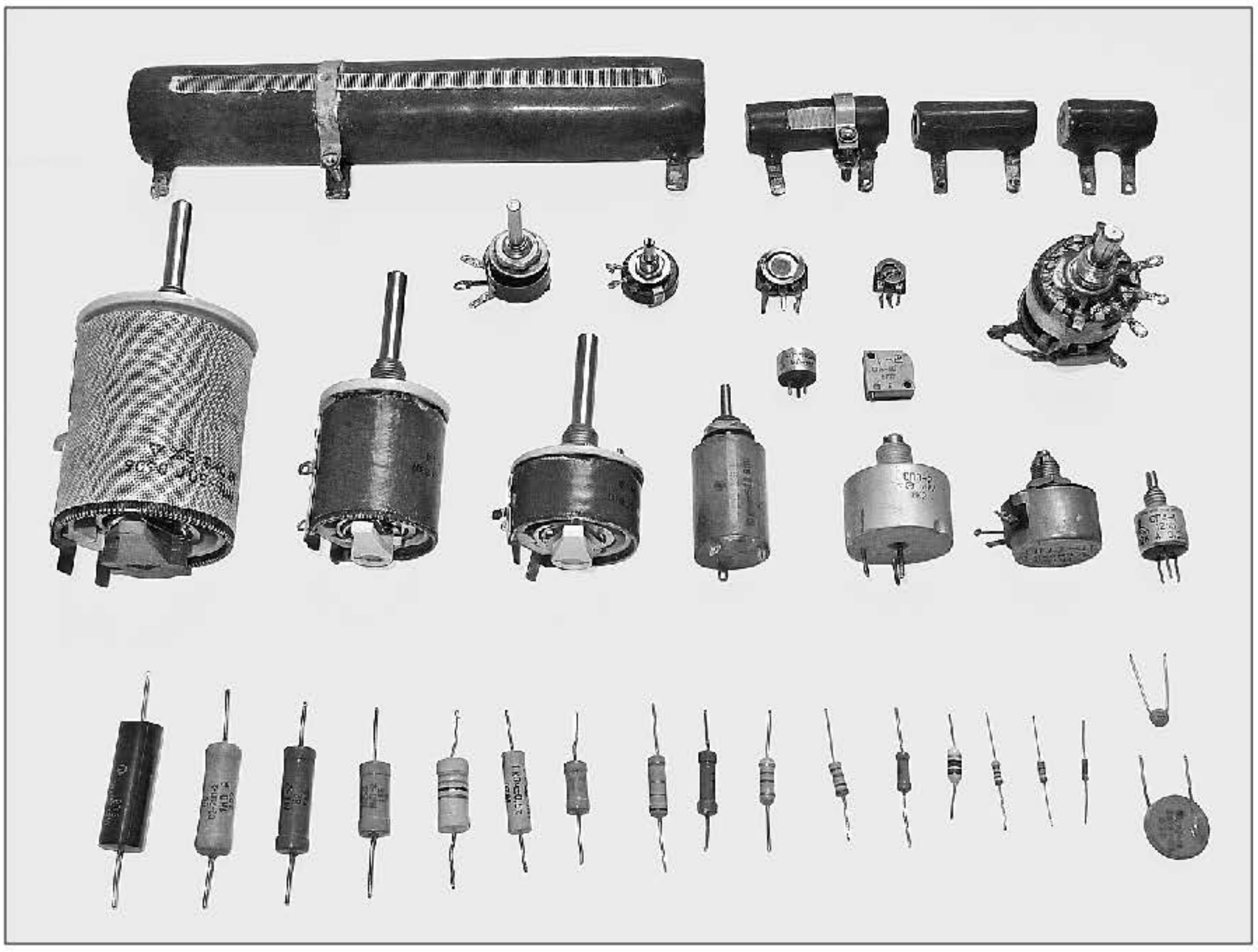


Рис. 6.1. Внешний вид наиболее распространенных типов резисторов



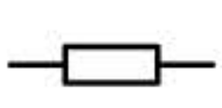
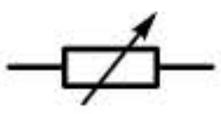
Рис. 6.2. Внешний вид наиболее распространенных типов конденсаторов

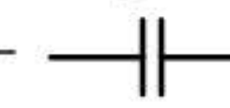
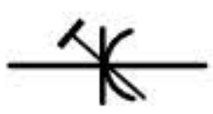
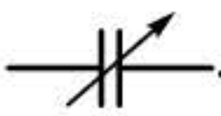
из луженых латунных хомутиков. Поверхность углеродного слоя покрывают различными лаками. Резисторы выпускаются сопротивлением от 1 Ом до 10 МОм и мощностью от 0,05 до 10 Вт.

Переменные пленочные резисторы в основе своей имеют гетинаксовую дужку с нанесенным на нее токопроводящим слоем. Съем сигнала осуществляется посредством латунной пружинной щетки. Угол поворота составляет 250°, сопротивление — до 4,7 МОм, мощность рассеяния — 2 Вт.

На корпусе резистора указываются номинальное сопротивление, мощность и класс точности.

В спецификациях к схемам должны быть указаны: тип резистора, его мощность, номинал сопротивления, класс точности (например, МЛТ-2-11кОм-I).

Условные графические изображения резисторов на схемах:  — постоянный;  — переменный.

Конденсаторы являются накопителями электрической энергии. Их можно подразделить на три группы: постоянные — , подстроечные —  и переменные — . Для расчета емко-

сти используется выражение $C = \varepsilon_0 \varepsilon S/d$, где $\varepsilon_0 = 8{,}86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрическая постоянная; ε — относительная диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика; S — площадь обкладок конденсатора; d — расстояние между обкладками.

Единицей емкости конденсатора является фарад: $1\ \Ф = 1 \cdot 10^6$ мкФ = $= 1 \cdot 10^9$ нФ $= 1 \cdot 10^{12}$ пФ. В промышленной электронике применяются конденсаторы емкостью от 1 пФ до 4 000 мкФ.

Наибольшее применение находят конденсаторы *постоянной емкости* (рис. 6.2). Роль обкладок выполняют ленты из алюминиевой (свинцовой) фольги толщиной 7...8 мкм. В качестве диэлектрика между обкладками используются конденсаторная бумага, слюда, керамика, фторопласт, стирофлекс и т. д. В соответствии с этим конденсаторы подразделяются на бумажные, слюдяные, керамические, электролитические. В электролитических конденсаторах роль диэлектрика выполняет слой оксида алюминия, полученный электролитическим способом. Его толщина — 0,01...1,5 мкм. При малых габаритных размерах емкость таких конденсаторов достигает 4 000 мкФ.

На корпусе конденсатора указывают его тип, номинальную емкость, рабочее напряжение, класс точности.

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: в пределах 0...30 пФ для подстроечных и 0...1 000 пФ для переменных.

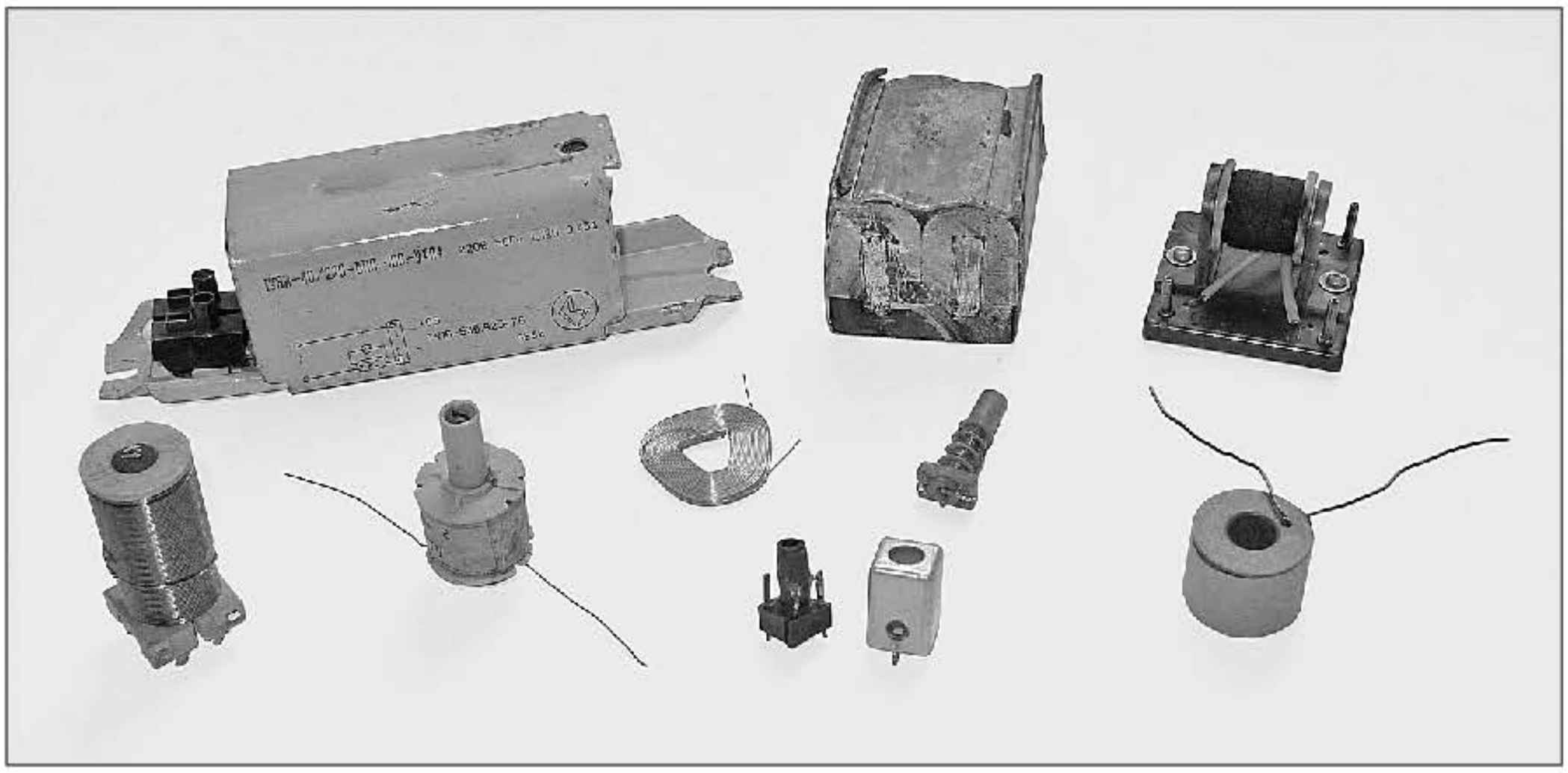


Рис. 6.3. Внешний вид индуктивных катушек

Индуктивные катушки являются накопителями магнитной энергии. Их основной параметр — коэффициент самоиндукции L (индуктивность), представляющий собой коэффициент пропорциональности между потокосцеплением ψ и током i.

Значение индуктивности определяется габаритными размерами, формой катушки, числом витков, материалом сердечника и может лежать в широких пределах. Например, в радиотехнических схемах используются индуктивные катушки индуктивностью в несколько микрогенри, а дроссели газоразрядных ламп имеют индуктивность 1,3 Гн. Условное графическое изображение индуктивной катушки без сердечника — , с ферромагнитным сердечником — .

На рис. 6.3 приведен внешний вид некоторых индуктивных катушек.

6.1.3. Нелинейные элементы промышленной электроники. Физика проводимости полупроводников

К полупроводникам относят твердые вещества, удельное сопротивление которых при комнатной температуре находится между удельным сопротивлением металлов ($1 \cdot 10^{-6} \ldots 1 \cdot 10^{-4}$ Ом$\cdot$см) и удельным сопротивлением диэлектриков (не менее $1 \cdot 10^{18}$ Ом$\cdot$см) и составляет $10^{-3} \ldots 10^{10}$ Ом$\cdot$см.

Наибольшее применение в полупроводниковой технике находят германий (Ge) и кремний (Si). Это четырехвалентные элементы, у которых на внешней оболочке имеется четыре электрона. Связь валентных электронов с ядром непрочная, и электроны под действием внешней энергии (температуры, электрического поля, освещенности) могут покидать свой атом, становясь свободными. Освободившееся место, называемое дыркой, может заполниться электроном с соседнего атома, а образовавшаяся там дырка в свою очередь заполняется соседним электроном и т. д.

Таким образом, полупроводниковые материалы способны к электронной и дырочной проводимостям под действием внешнего поля.

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 и поэтому получил название полупроводник *n*-типа (negative).

Если в кристаллическую решетку чистого германия или кремния ввести примесь трехвалентного индия или вольфрама, то одна ковалентная связь останется свободной и может заполниться электроном с соседнего атома. Дырку, образовавшуюся после ухода электрона, занимает другой электрон и т. д.

В таком полупроводнике имеет место дырочная проводимость, и поэтому он получил название полупроводник *p*-типа (positive).

6.1.4. Приборы на основе полупроводников *n*- и *p*-типов

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.

Различают два вида терморезисторов (рис. 6.4, *а*):

- *термисторы* — резисторы с большим отрицательным температурным коэффициентом;
- *позисторы* — резисторы с большим положительным температурным коэффициентом.

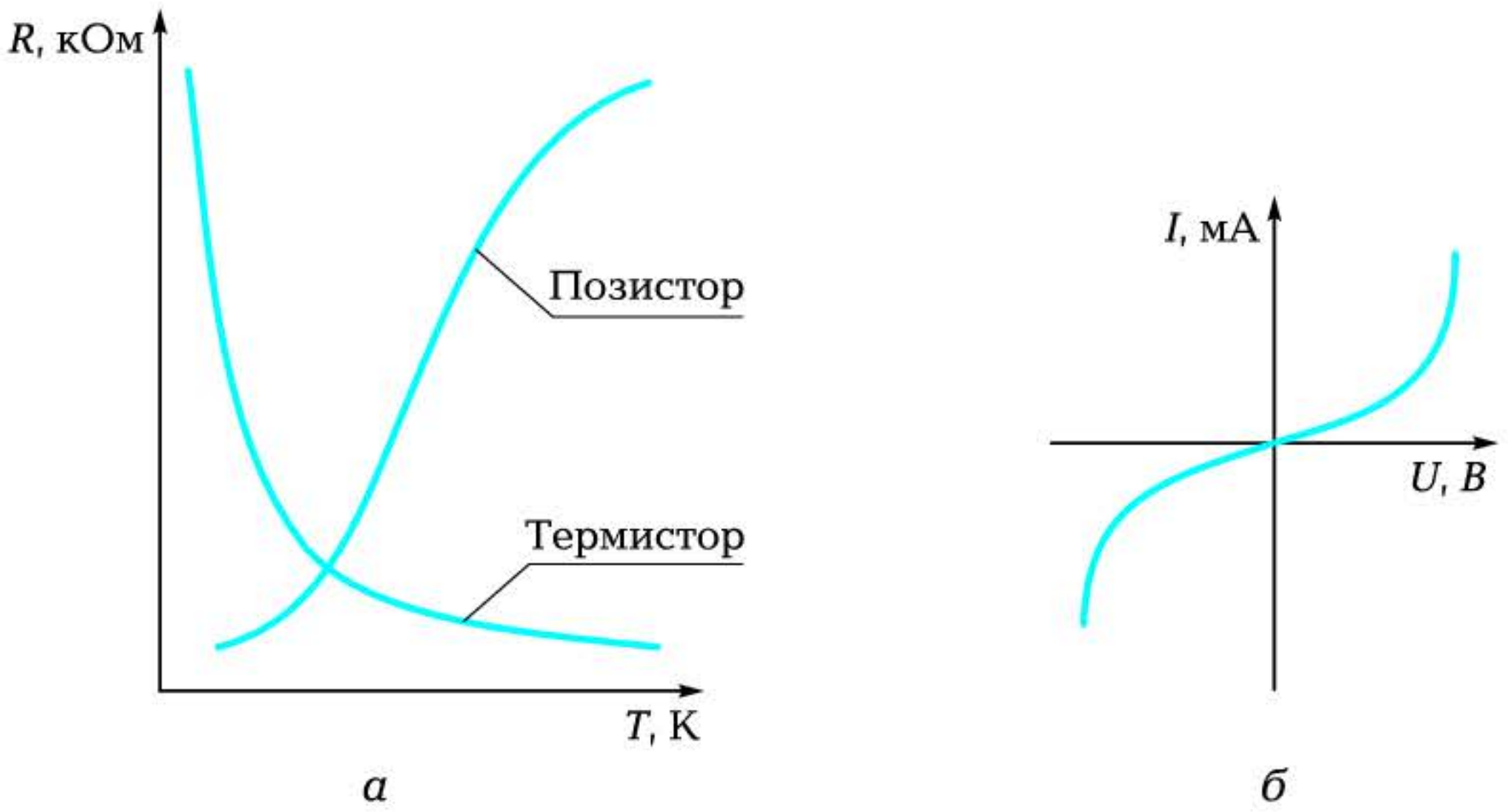
Нагрев терморезисторов может осуществляться током, протекающим по резистору. Терморезисторы применяются для измерения и регулирования температуры, а также для параметрической стабилизации напряжения при изменении температуры.

Варисторы — резисторы, сопротивление которых зависит от напряженности внешнего электрического поля.

Вольт-амперная характеристика варисторов симметрична и имеет участок, где напряжение почти не зависит от тока (рис. 6.4, *б*)

Основное применение варисторов — стабилизация напряжения в схемах автоматического управления и регулирования.

Фоторезисторы — полупроводниковые приборы, сопротивление которых зависит от светового излучения.

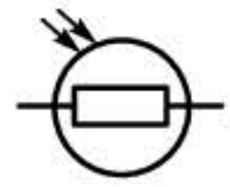


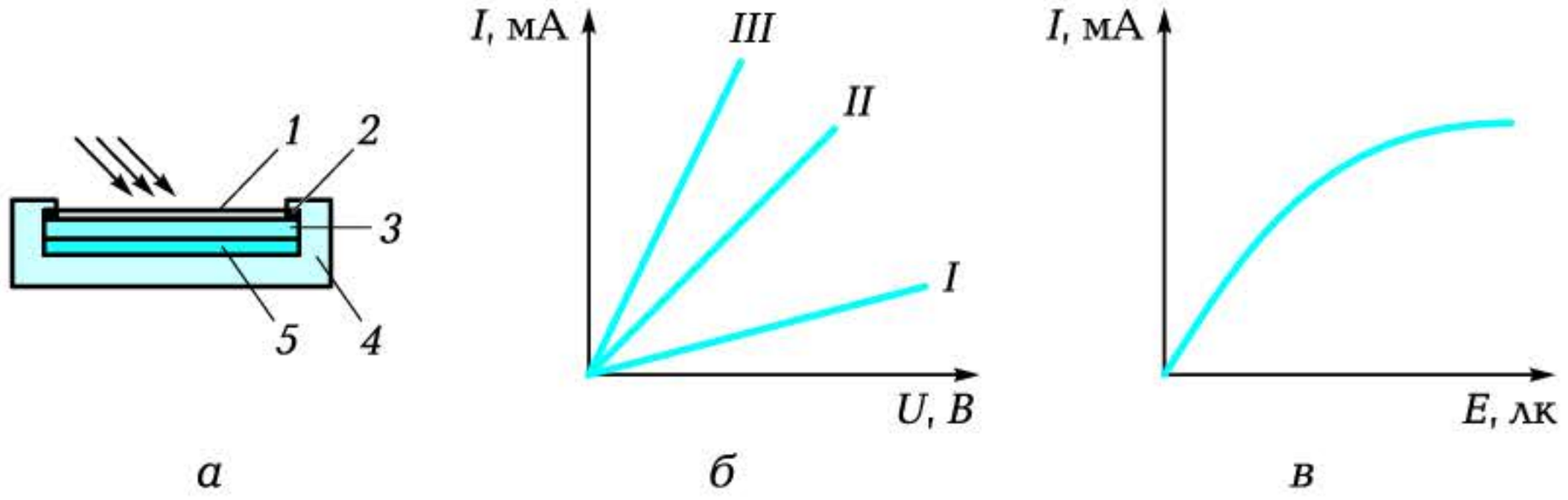
а *б*

Рис. 6.4. Зависимость сопротивления терморезистора от температуры (*а*); ВАХ варистора (*б*)

Конструктивно фоторезисторы (рис. 6.5, *а*) выполняются следующим образом. На диэлектрическую подложку *5* наносится напылением или вжиганием слой полупроводника *3*. Полученный резистор помещается в корпус *4* со стеклянным окном *1*. Электроды *2* выводятся наружу.

ВАХ фоторезистора приведена на рис. 6.5, *б*. При $\Phi = 0$ имеет место характеристика *I*, соответствующая темновому потоку. Характеристики *II* и *III* соответствуют световым потокам $\Phi_1 > 0$ и $\Phi_2 > \Phi_1$.

Зависимость тока фоторезистора от освещенности *E*, измеряемой в люксах (лк), носит нелинейный характер (рис. 6.5, *в*). Условное графическое обозначение фоторезистора — .



а *б* *в*

Рис. 6.5. Фоторезистор:

а — конструкция; *б* — ВАХ; *в* — зависимость тока от освещенности; *1* — стеклянное окно; *2* — электроды; *3* — слой полупроводника; *4* — корпус; *5* — диэлектрическая подложка

6.1.5. Свойство электронно-дырочного перехода

При соединении двух полупроводников n и p между ними образуется n—p-переход, ширина зоны которого зависит от величины и направления внешнего электрического поля.

При отсутствии внешнего поля на границе n—p часть электронов из n перейдет в p, а дырок — из p в n. В этом случае у границы со стороны n полупроводника образуется положительный заряд, а со стороны p — отрицательный (рис. 6.6, *а*).

Положительный заряд n полупроводника препятствует переходу дырок из p в n, а отрицательный заряд p полупроводника препятствует переходу электронов из n в p. На границе перехода образуется внутреннее электрическое поле $E_{вн}$, а сопротивление перехода имеет значительную величину.

Если к n—p-переходу приложить внешнее поле $E_{внеш}$ таким образом, чтобы его направление совпало с направлением внутреннего поля, запорный слой увеличивает свою ширину, растет потенциальный барьер и основные носители (электроны и дырки) не могут пройти через переход. Через него проходят лишь неосновные носители, наличие которых обусловлено присутствием примесей. Они создают незначительный обратный ток $I_{обр}$ (рис. 6.6, *б*).

Если внешнее поле направлено навстречу внутреннему и больше его по величине, ширина n—p-перехода уменьшается и через него идет прямой ток $I_{пр}$ значительной величины (рис. 6.6, *в*).

Вольт-амперная характеристика n—p-перехода приведена на рис. 6.8, *а*. Из нее следует, что

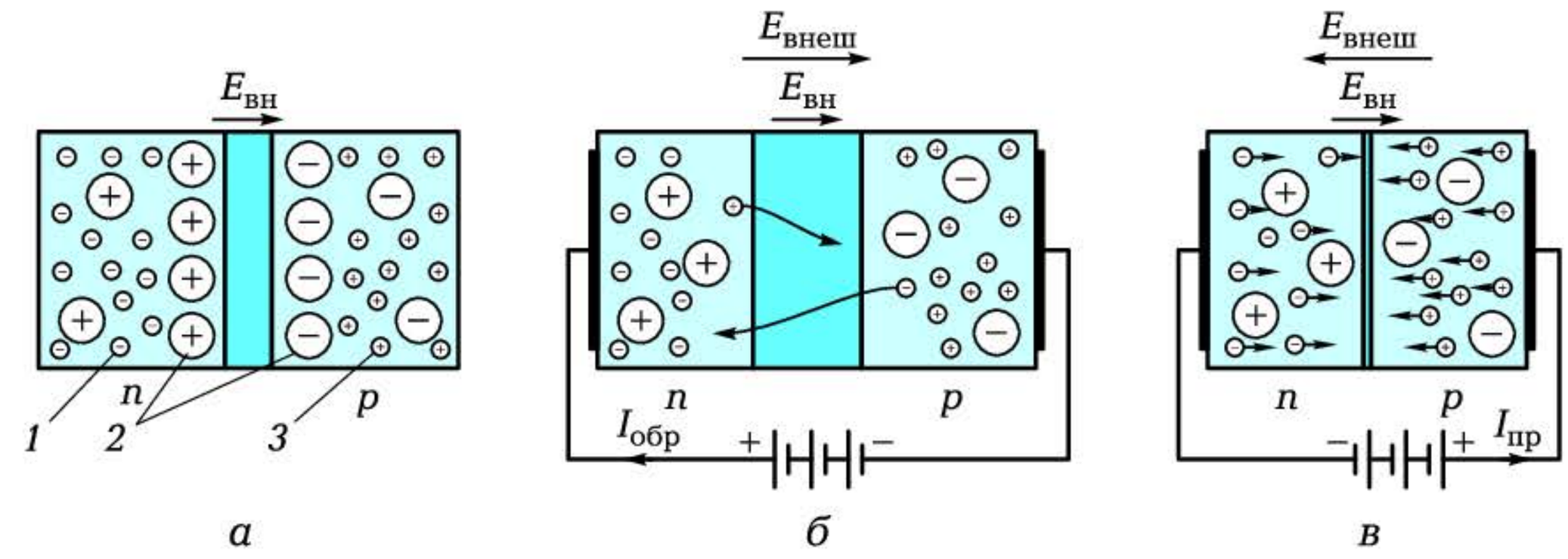


Рис. 6.6. Схема n—p-перехода:

1 — свободные электроны; *2* — положительные и отрицательные ионы; *3* — свободные дырки

n—*p*-переход обладает свойством односторонней проводимости, т. е. хорошо проводит ток в прямом направлении и практически не проводит в обратном.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего предназначены резисторы и конденсаторы?
2. Какие основные параметры резистора указываются в спецификации?
3. Какие основные параметры конденсатора указываются в спецификации?
4. Назовите два основных материала, используемых в полупроводниковой технике и охарактеризуйте их.
5. Какой проводимостью обладают полупроводники?
6. Перечислите основные приборы, построенные на основе полупроводников.
7. Назовите основное свойство *n*—*p*-перехода.

6.2. ОДНОПЕРЕХОДНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

6.2.1. Диоды

На основе одного *n*—*p*-перехода построены различные по технологии изготовления и назначению диоды (высокочастотные, силовые, опорные, фотодиоды, светодиоды — рис. 6.7).

Высокочастотные диоды имеют кристаллодержатель, на котором крепится кристалл германия или кремния. С кристаллом соприкасается вольфрамовая проволока, образующая на границе *n*—*p*-переход (вольфрам трехвалентен).

Это точечные диоды, они обладают незначительной площадью перехода, а значит, и небольшой емкостью, поэтому используются при частотах до 100 МГц. Промышленность выпускает высокочастотные диоды с выпрямленным током от 10 до 100 мА и обратным напряжением (при котором происходит пробой диода) от 10 до 100 В.

Силовые диоды (*выпрямительные*) изготовляются в виде сплавной плоскостной конструкции, имеющей значительную площадь *n*—*p*-перехода.

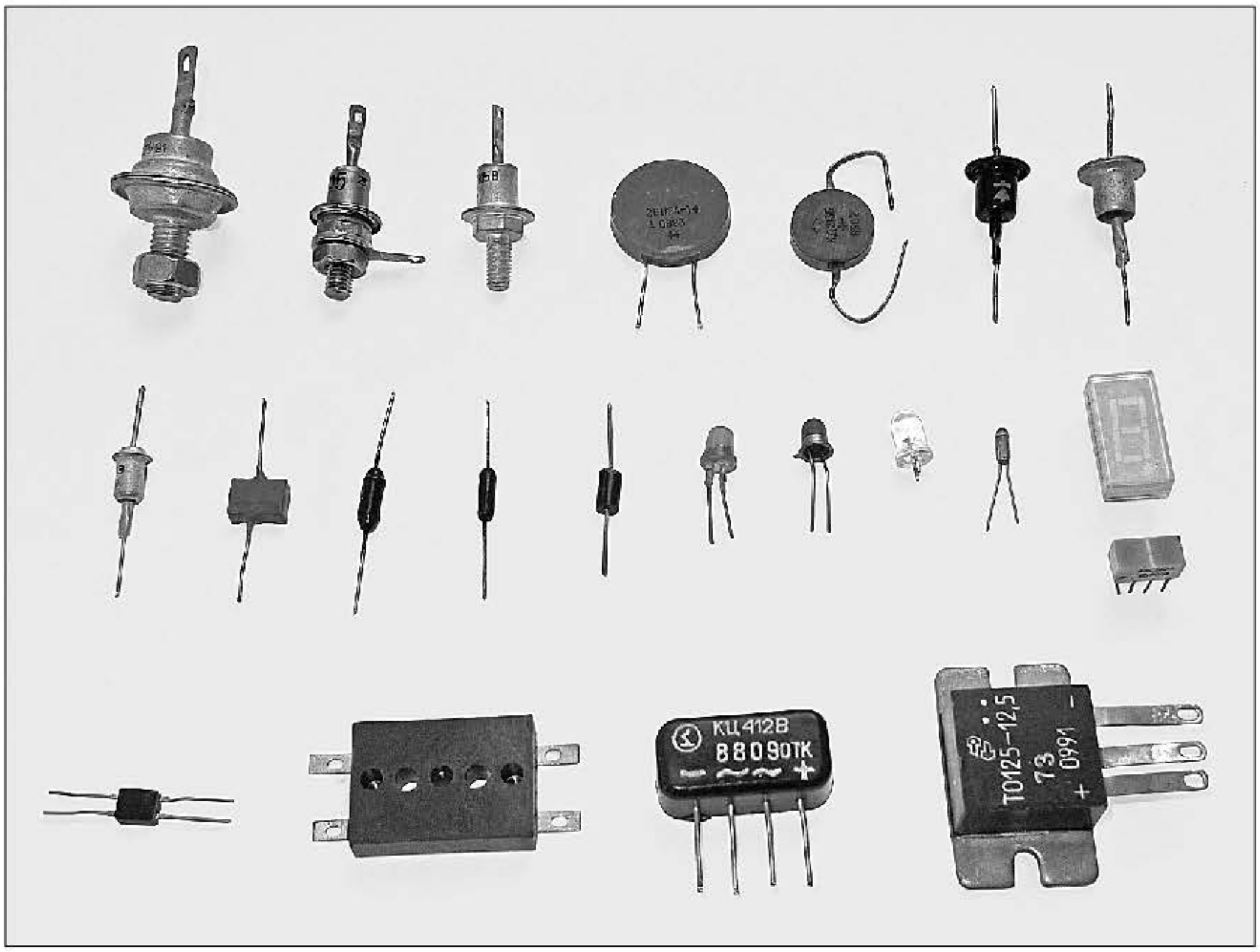


Рис. 6.7. Внешний вид некоторых типов диодов

На пластину германия или кремния накладывают пластину индия, после чего обе нагревают в вакууме. Индий вплавляется 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. Они используются для выпрямления переменного тока. Вольт-амперная характеристика этих диодов представлена на рис. 6.8, *а*. Промышленность выпускает силовые диоды с самыми различными параметрами, например:

диоды Д226 с выпрямленным током до 0,3 А и обратным напряжением до 400 В;

диоды Д302-305 с выпрямленным током от 1 до 10 А и обратным напряжением от 20 до 50 В;

диоды Д1004-1008 с выпрямленным током 100 мА и напряжением до 10 000 В;

диоды ВКВ-1000 — мощные германиевые с воздушным охлаждением, работающие при токах до 1 000 А.

Для силовых диодов характерно наличие допустимого обратного напряжения, превышение которого ведет к тепловому нагреву n—p-перехода и его разрушению (*тепловому пробою*).

Условное графическое обозначение 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 возрастет лавинообразно, и даже незначительные изменения напряжения ведут к значительному изменению тока (рис. 6.8, *б*).

Лавинообразный пробой — явление обратимое данном, и после снятия внешнего поля характеристики диода восстанавливаются.

Промышленность выпускает стабилитроны с напряжением стабилизации от 2 В (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 обозначение стабилитрона — .

Фотодиоды — это приборы, проводимость n—p перехода которых зависит от его освещенности.

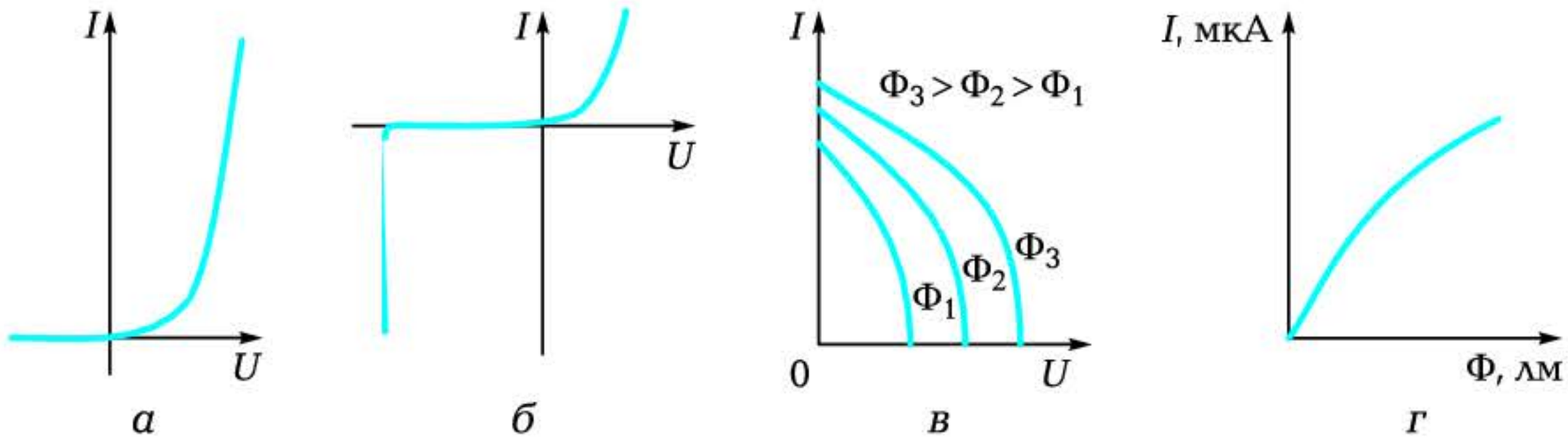


Рис. 6.8. Характеристики:

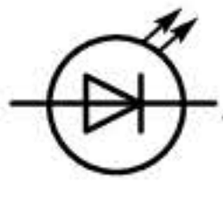
а — ВАХ силового диода; *б* — ВАХ стабилитрона; *в* — ВАХ фотодиода; *г* — генераторного режима работы фотодиода

Вольт-амперные характеристики фотодиода при различных световых потоках Ф, измеряемых в люменах (лм), приведены на рис. 6.8, *в*.

При отсутствии внешнего источника под действием света фотодиоды способны вырабатывать фототок, совпадающий по направлению с обратным током диода и в определенной области пропорциональный световому потоку Ф (рис. 6.8, *г*). Такой режим работы фотодиода, называемый генераторным, широко используется для преобразования световой энергии в электрическую в солнечных батареях (например, на космических кораблях).

Условное графическое обозначение 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 (святящиеся буквы, цифры).

Условное графическое обозначение светодиода — .

6.2.2. Полевые транзисторы

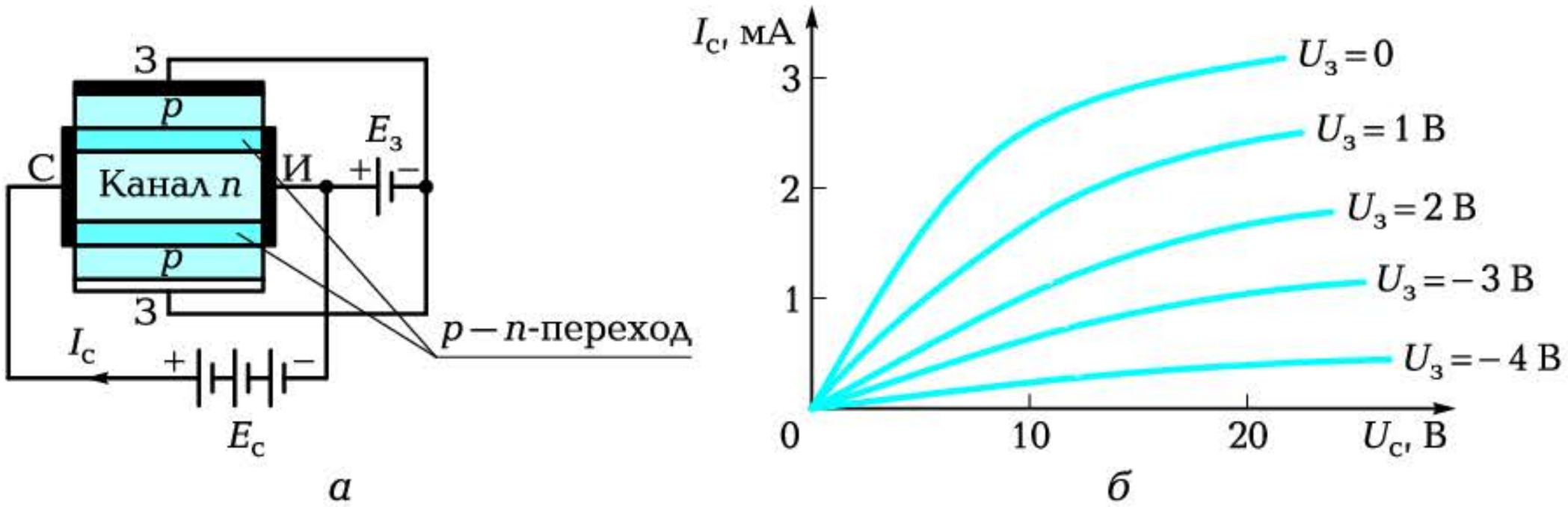
Полевые (*униполярные*) *транзисторы* — приборы, использующие один n—p-переход и способные усиливать электрические сигналы.

Свое название они получили потому, что, во-первых, управляются полем, а не током (как биполярные), а во вторых, используют лишь один тип основных носителей: электроны или дырки.

Конструктивно полевой транзистор представляет собой кристалл с n- или p-проводимостью, окруженный со всех сторон полупроводником с p- или n-проводимостью (рис. 6.9, *а*).

К торцам кристалла n подсоединены электроды, называемые истоком (И) и стоком (С). От p-области выведен электрод, называемый затвором (З).

Если между затвором и истоком включить батарею $E_з$, то, изменяя величину ее ЭДС и полярность, можно управлять шириной зоны n—p-перехода, а значит, площадью сечения канала n и его сопротивлением.



а *б*

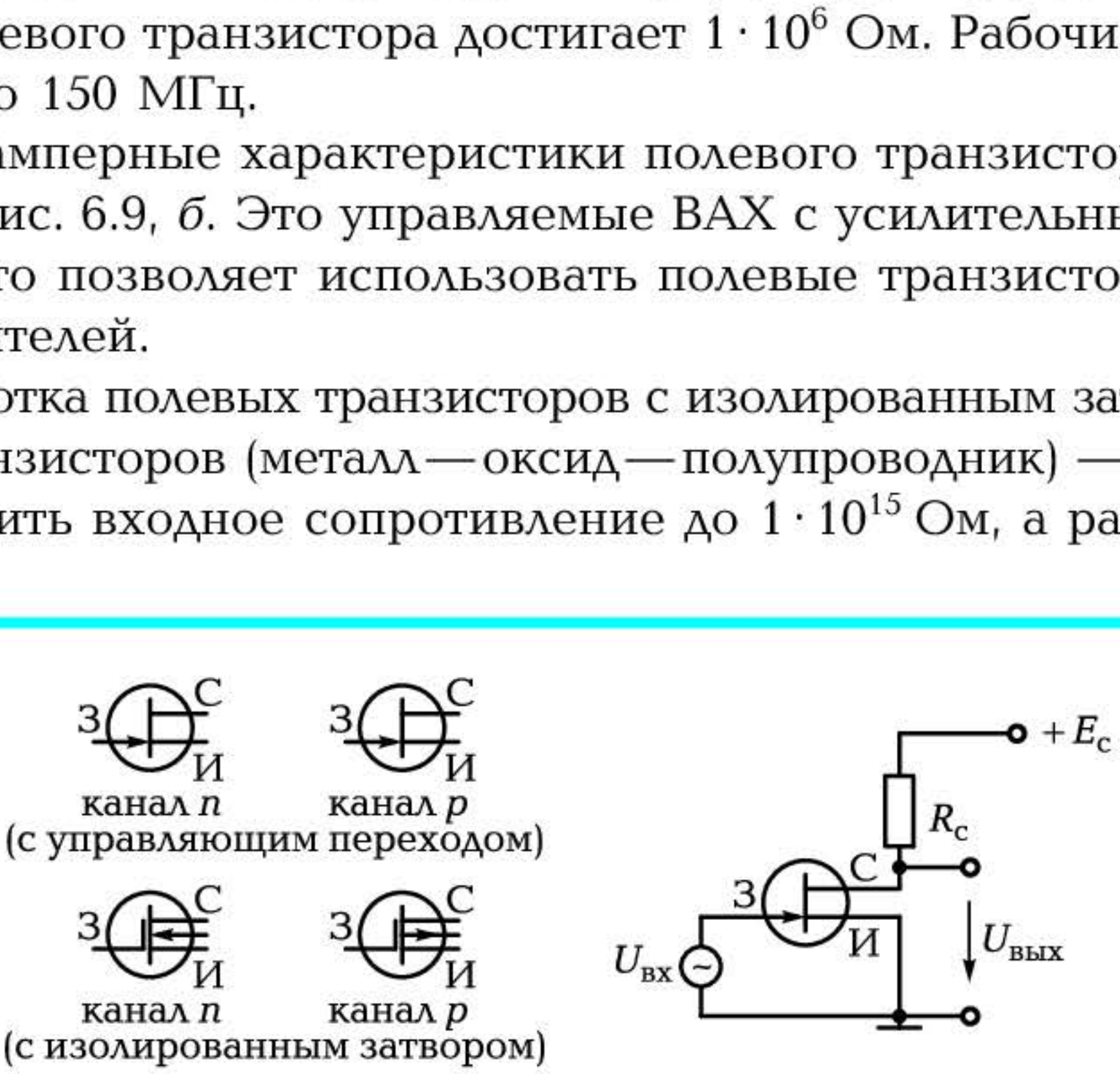
Рис. 6.9. Полевой транзистор:
а — конструктивная схема; *б* — вольт-амперная характеристика

Чем больше поле, приложенное 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 $E_с$, то потечет ток $I_с$, определяемый как напряжением батареи $E_с$, так и сопротивлением канала n, которое зависит от напряжения батареи $E_з$ в цепи затвора. Поскольку n—p-переход смещен в обратном направлении и ток затвора ничтожно мал, входное сопротивление полевого транзистора достигает $1 \cdot 10^6$ Ом. Рабочие частоты доходят до 150 МГц.

Вольт-амперные характеристики полевого транзистора приведены на рис. 6.9, *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 $1 \cdot 10^{15}$ Ом, а рабочие ча-



а *б*

Рис. 6.10. Графические изображения полевого транзистора (*а*) и схема усилителя на нем (*б*)

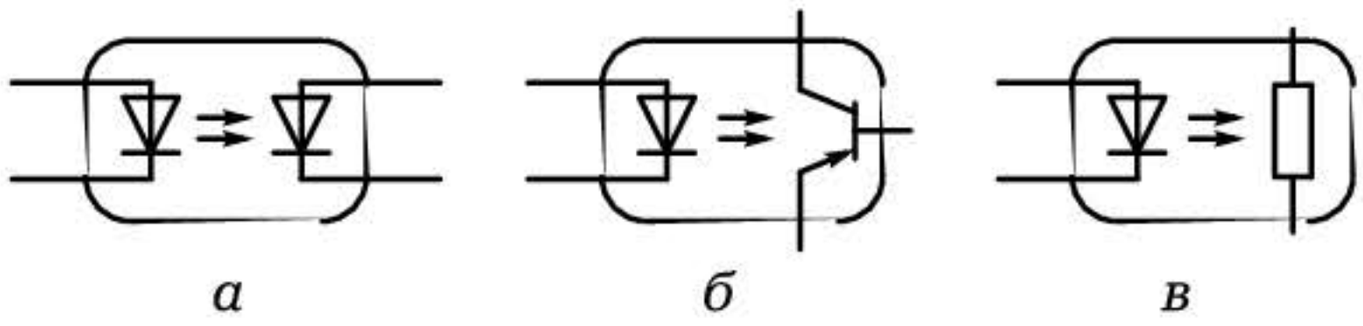


Рис. 6.11. Схемы оптронов:

а — с фотодиодом; *б* — с фототранзистором; *в* — с фоторезистором

стоты — до 1 000 МГц. Изменение сопротивления сток—исток осуществляется в таких транзисторах за счет изменения удельного электрического сопротивления ρ полупроводника. Коэффициент усиления по напряжению может достигать 100.

Условные графические обозначения полевых транзисторов приведены на рис. 6.10, *а*, схема усилителя на полевом транзисторе — на рис. 6.10, *б*.

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. 6.11).

Конструктивно эти элементы располагаются таким образом, чтобы обеспечить хорошую связь между ними по световому потоку и максимальную гальваническую развязку. Оптроны имеют переходное сопротивление до $1 \cdot 10^{11}$ 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.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие приборы строятся на базе одного *n*—*p*-перехода?
2. Перечислите и охарактеризуйте основные виды полупроводниковых диодов.
3. Приведите ВАХ силового и опорного диодов.
4. Поясните принцип работы полевого транзистора.
5. Приведите ВАХ полевого транзистора.

6.3. МНОГОПЕРЕХОДНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

6.3.1. Биполярные транзисторы

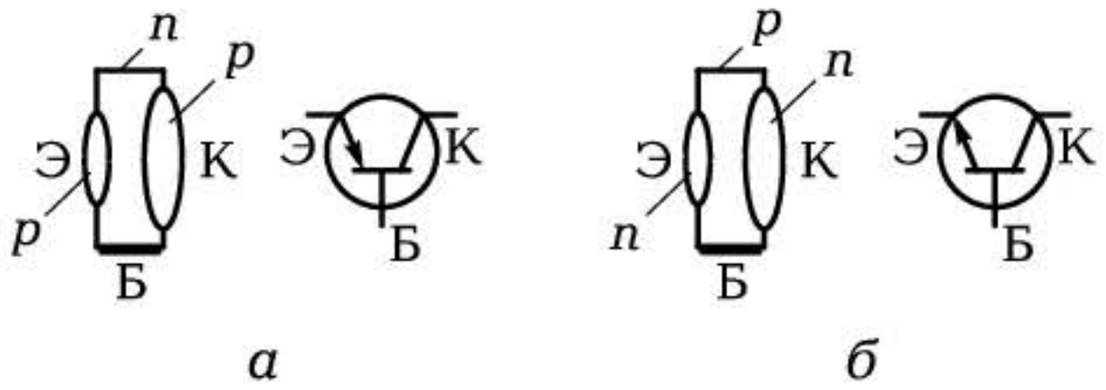
Широкое применение в качестве усилительных устройств нашли *биполярные транзисторы* на основе *двух* n—p-переходов, т. е. транзисторы n—p—n- или p—n—p-типа (рис. 6.12). Изготовляются они путем вплавления с двух сторон в кристалл германия с n-проводимостью (или кремния с p-проводимостью) кусочков индия 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 основе двух n—p-переходов.

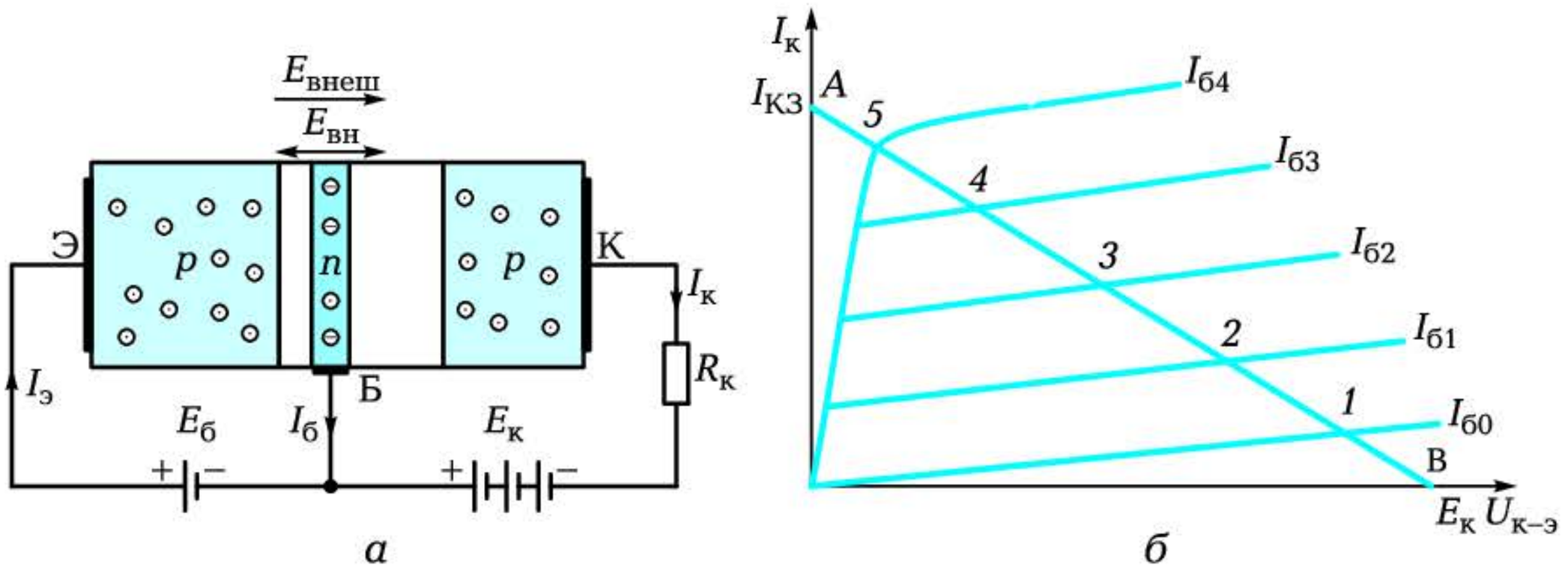
Процессы, происходящие в обоих транзисторах, аналогичны. Их можно понять, рассмотрев работу p—n—p-транзистора (рис. 6.13, *а*).

На один из n—p-переходов (Б—К) подадим напряжение батареи $E_к$ так, чтобы переход был смещен в обратном направлении ($E_{вн}$ и $E_{внеш}$ совпадают по направлению). В этом случае через нагрузку в коллекторной цепи течет ток неосновных носителей $I_{к0}$ (в базе это дырки), равный нескольким микроамперам. Если ко второму переходу (Э—Б) подключить батарею $E_б$ так, чтобы переход был смещен в прямом направлении ($E_{вн}$ направлено встречно $E_{внеш}$), то дырки эмиттера устремятся к базе и далее под дей-



а *б*

Рис. 6.12. Конструктивная схема и условное графическое изображение биполярного транзистора:
а — p—n—p-типа; *б* — n—p—n-типа



а *б*

Рис. 6.13. Биполярный транзистор:

а — схема, поясняющая принцип работы; *б* — вольт-амперная характеристика

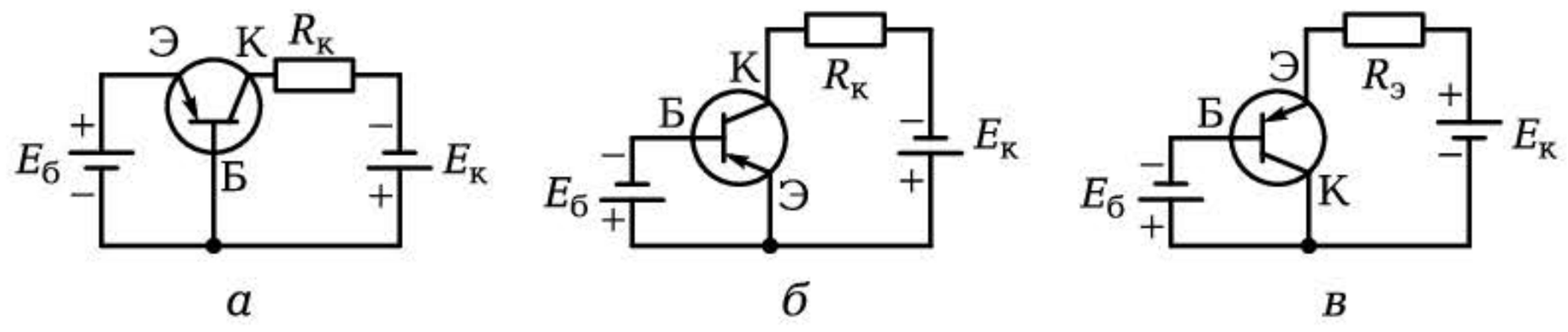
ствием внешнего поля второго n—p-перехода будут переходить на коллектор. В силу закона электрической нейтральности заряды дырок, прошедших от эмиттера к коллектору, будут компенсированы свободными электронами, поступающими в коллектор из внешней цепи (от $E_к$) и создающими ток коллектора $I_к$.

Электроны, являющиеся основными носителями в области базы, под действием $E_б$ создадут ток базы $I_б$.

Возможны три схемы включения транзистора (рис. 6.14): с общей базой (*а*), общим эмиттером (*б*) и общим коллектором (*в*). В них входной и выходной сигналы подаются и снимаются относительно одного электрода: базы, эмиттера или коллектора.

В схемах усилителей напряжения наиболее распространена схема с общим эмиттером.

Вольт-амперная характеристика транзистора с общим эмиттером представляет собой зависимость тока коллектора от напряжения коллектор — эмиттер при постоянном токе базы (рис. 6.13, *б*). При разных токах базы получаем семейство нелинейных управляемых характеристик, называемых выходными характеристика-



а *б* *в*

Рис. 6.14. Схемы включения транзистора:

а — с общей базой; *б* — общим эмиттером; *в* — общим коллектором

ми транзистора. На выходных характеристиках можно построить линию нагрузки $R_к$ по точке холостого хода B ($U = E_к$) и точке короткого замыкания A ($I_к = E_к/R_к$) — линия AB.

В зависимости от величины входного сигнала различают следующие режимы.

1. Усилительный режим работы (активный), когда рабочая точка перемещается между точками *1* и *5* на кривой 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 $I_б < 0$ (ниже точки *1*). Происходит закрытие транзистора и снижение тока коллектора до $I_{к0} \approx 0$. Сопротивление транзистора $R_{к–э}$ велико, и $U_к$ стремится к $E_к$, а мощность на транзисторе $P_к = U_к\, I_{к0}$ стремится к нулю.

3. Режим насыщения, соответствующий максимальному току базы $I_{б\,max}$ (выше точки *5*). При этом $I_к$ равен $I_{к\,max}$ и не изменяется при дальнейшем увеличении тока базы. Выходное сопротивление транзистора $R_{к–э}$ мало (стремится к нулю) и напряжение $U_к = I_к R_{к–э}$ стремится к нулю. Мощность $P_к = U_к\, I_к$, 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 режиме (ключевом) переключать цепи, в которых циркулируют значительные мощности, без опасения вывести из строя транзистор.

Режимы отсечки и насыщения нашли применение в логических устройствах автоматики и в усилителях мощности, 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.

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

В паспортных данных транзистора указываются предельно допустимые параметры:

- максимальный ток коллектора $I_{к\,max}$;
- максимальное напряжение коллектор — эмиттер $U_{к-э}$;
- максимальная мощность, рассеиваемая коллектором, $P_к$;
- предельная (граничная) 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.

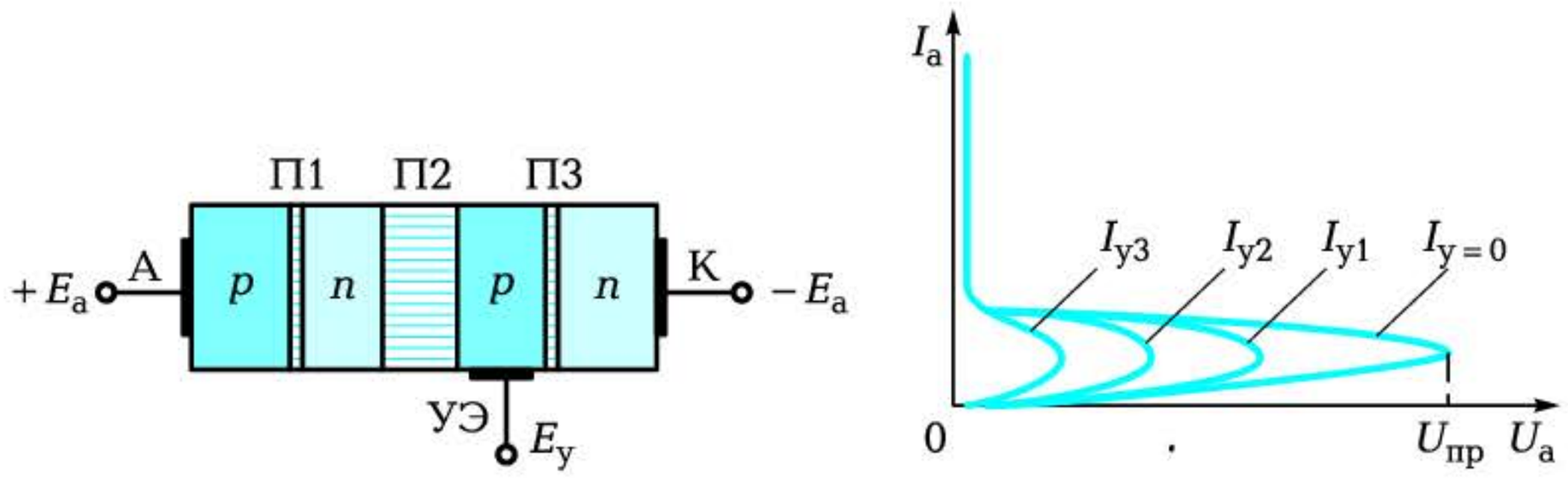
Третий элемент (трехзначная цифра) характеризует мощность и частоту прибора (табл. 6.1).

Четвертый элемент (буквенный) означает модификацию. Например, ГТ108А — германиевый маломощный низкочастотный транзистор модификации А.

6.3.2. Тиристоры

На основе *трех* n—p-переходов строятся *тиристоры* — элементы, обладающие вентильным свойством и управляемой ВАХ.

Напряжение источника $E_а$ между выходными электродами (анодом А и катодом К) прикладывается таким образом, чтобы крайние переходы (П1, П3) были смещены в прямом направлении (открыты), а средний переход П2 — в обратном (закрыт) (рис. 6.15, *а*). Если $E_у = 0$, то увеличение напряжения $E_а$ до определенного значения ($U_{пр}$) ведет к незначительному увеличению тока.



а *б*

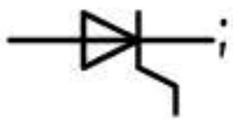
Рис. 6.15. Тиристор:

а — схема, поясняющая принцип работы; *б* — вольт-амперная характеристика

При $E_a = U_{пр}$ начинается лавинообразный пробой перехода П2 (как в стабилитроне) и переход П2 открывается. Ток резко возрастет и напряжение на тиристоре падает до 0,5...1 В.

Этот пробой не вызывает разрушения перехода и является обратимым. Подводя напряжение E_y через управляющий электрод (УЭ) к переходу П2, можно управлять с помощью тока I_y величиной $U_{пр}$ (рис. 6.15, *б*).

Условное графическое изображение 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.

Тиристоры — это мощные управляемые вентили, нашедшие применение в схемах управления мощными двигателями.

6.3.3. Интегральные микросхемы

Увеличение сложности устройств, числа пассивных и активных элементов ведет к увеличению габаритных размеров, стоимости устройства, потребляемой им энергии.

Это привело к появлению 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 электронную 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 выполняются в виде пленок, наносимых на подложку из диэлектрического материала, и навесных бескорпусных элементов: транзисторов, диодов.

В качестве резисторов используются тонкие пленки нихрома, а в качестве диэлектрика в конденсаторах — пленки керамики титанита бария. Проводники для соединения элементов между собой и подключения к выводным концам выполняются в виде тонкой пленки золота, меди или алюминия.

Навесные элементы — диоды, транзисторы — присоединяются к пленочной микросхеме пайкой или сваркой.

Собранная гибридная микросхема помещается в металлический или пластмассовый корпус.

В *полупроводниковых* интегральных микросхемах используются отдельные области кристалла. Каждая из этих областей выполняет функцию транзистора, диода, резистора или конденсатора.

Все элементы полупроводниковых микросхем получают в ходе единого технологического процесса в кристалле полупроводника. Такой технологический процесс базируется на травлении исходного поликристаллического кремния с применением защитных масок и последующем окислении и напылении соответствующих полупроводниковых материалов с различной проводимостью.

Оба типа микросхем обладают весьма высокой надежностью. Даже в предельно нагруженных режимах среднее время безотказной работы достигает $1 \cdot 10^6$ ч (200 лет непрерывной работы).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните принцип действия биполярного транзистора.
2. Назовите основные режимы работы транзистора.
3. Охарактеризуйте ключевой режим работы транзистора.
4. Назовите преимущество эмиттерного повторителя.
5. Для чего предназначен тиристор?
6. В чем суть элементной интеграции?
7. Назовите виды интегральных микросхем.

6.4. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА. ОДНОФАЗНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

6.4.1. Состав и назначение элементов выпрямительного устройства

Выпрямительные устройства предназначены для преобразования переменного тока в ток одного направления.

В общем случае выпрямительное устройство включает в себя силовой трансформатор, вентиль, сглаживающий фильтр и стабилизатор (рис. 6.16).

Известны 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.

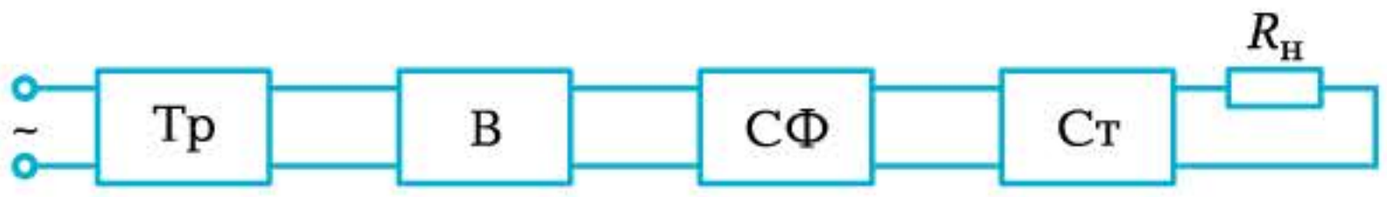


Рис. 6.16. Структурная схема выпрямительного устройства:
Тр — трансформатор; В — вентиль; СФ — сглаживающий фильтр; Ст — стабилизатор

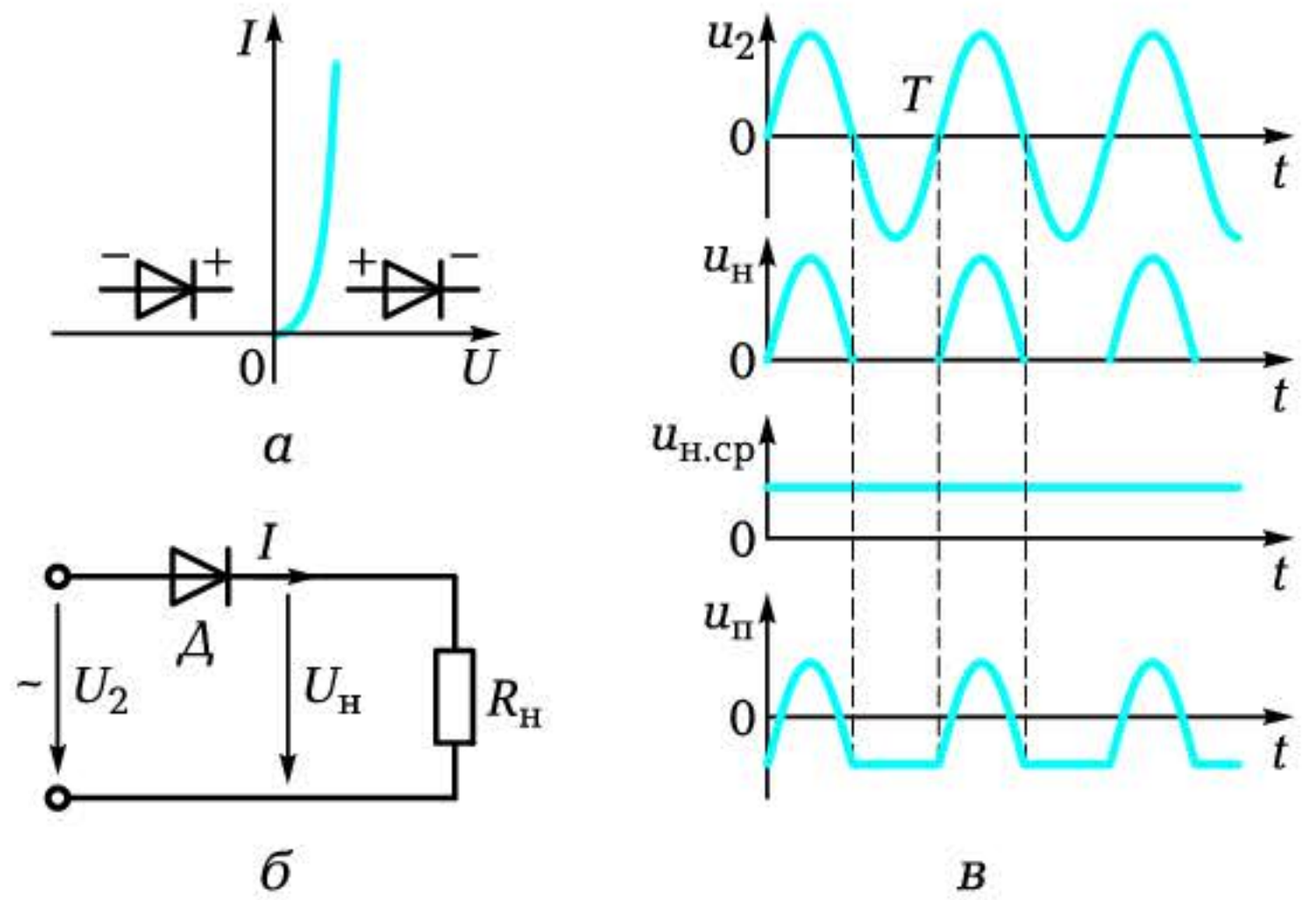


Рис. 6.17. Однополупериодный выпрямитель:

а — ВАХ диода; *б* — схема выпрямителя; *в* — временны́е диаграммы напряжений

Трансформатор предназначается для преобразования переменного напряжения, например 220 В, до значения, обеспечивающего 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.

Отдельные перечисленные узлы выпрямителя могут отсутствовать.

Основными элементами выпрямителя являются вентили — нелинейные элементы, проводимость которых зависит от полярности приложенного напряжения. Как правило, в качестве вентилей используются полупроводниковые диоды. ВАХ диода приведена 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 пульсации выпрямленного напряжения ($U_{осн\,max}$ — амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения);

$f_п$ — частота основной гармоники выпрямленного напряжения (напряжения пульсации).

6.4.2. Однополупериодный однофазный выпрямитель

Схема однополупериодного выпрямителя приведена на рис. 6.17, *б*.

Переменное напряжение с вторичной обмотки трансформатора u_2 подается на цепь из последовательно соединенных диода $Д$ и нагрузочного резистора $R_н$. При положительном полупериоде напряжения диод открыт и через нагрузку течет ток. При отрицательном полупериоде диод закрыт и ток в нагрузке отсутствует.

Выпрямленное напряжение $u_н$ можно представить в виде ряда Фурье — суммы постоянной $U_{н.ср}$ и переменной $u_п$ составляющих (рис. 6.17, *в*):

$$u = U_{2max}/[\pi\,(1 + (\pi/2)\sin\omega t - (2/3)\cos 2\omega t - (2/15)\cos 4\omega t - (2/35)\cos 6\omega t - ...)].$$

Среднее выпрямленное напряжение на нагрузке

$$U_{н.ср} = U_{2max}/\pi = 0{,}32\,U_{2max} = 0{,}45U_2.$$

Амплитуда основной гармоники $U_{осн\,max} = U_{2max}/2 = 0{,}7U_2$.

Коэффициент пульсации $p = U_{осн\,max}/U_{н.ср} = \pi/2 = 1{,}57$.

Частота пульсации $f_п = f$.

Как правило, однополупериодные выпрямители применяются для питания нагрузки малой мощности.

6.4.3. Двухполупериодные однофазные выпрямители

Наибольшее применение нашли две схемы: выпрямитель на базе трансформатора со средней точкой и двухполупериодный мостовой выпрямитель.

Выпрямитель на базе трансформатора со средней точкой. Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя представляет собой две схемы однополупериодного выпрямителя, построенные на диодах *Д1* и *Д2* и работающие на общую нагрузку $R_н$ (рис. 6.18, *а*).

В положительный полупериод ток в нагрузку поступает через диод *Д1*, а в отрицательный — через диод *Д2*. В итоге за период на нагрузке выделяются две полуволны напряжения (рис. 6.18, *б*).

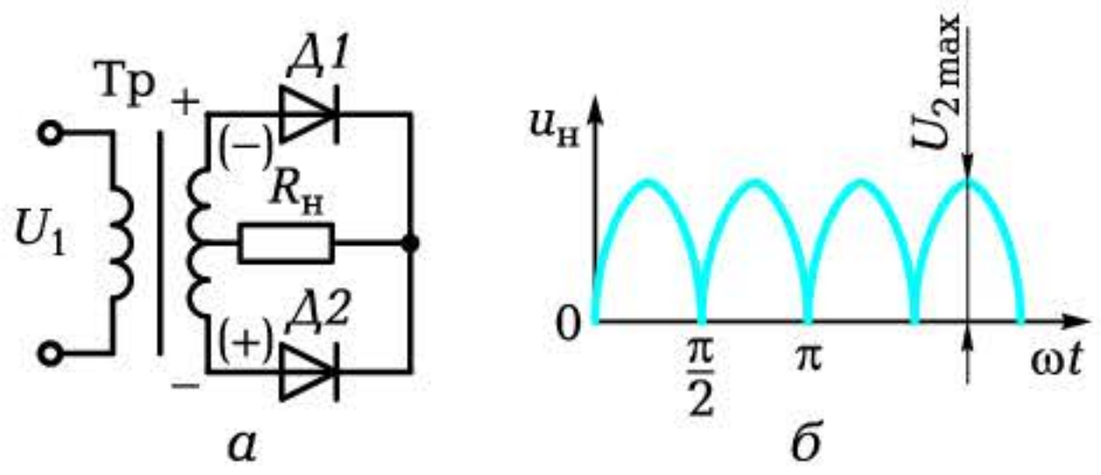


Рис. 6.18. Двухполупериодный выпрямитель:

а — схема; *б* — временна́я диаграмма напряжения

Недостаток схемы: сложная конструкция трансформатора и его неэкономичность. Этих недостатков лишена мостовая схема выпрямителя.

Двухполупериодный мостовой выпрямитель. Выпрямитель состоит из четырех диодов, включенных по мостовой схеме (рис. 6.19, *а*). Характер 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 *Д2* и *Д4* открыты и пропускают ток в нагрузку. Диоды *Д1* и *Д3* в этот момент закрыты. При отрицательном полупериоде напряжения диоды *Д2* и *Д4* закрываются, но открываются диоды *Д1* и *Д3* и пропускают ток в нагрузку в том же направлении.

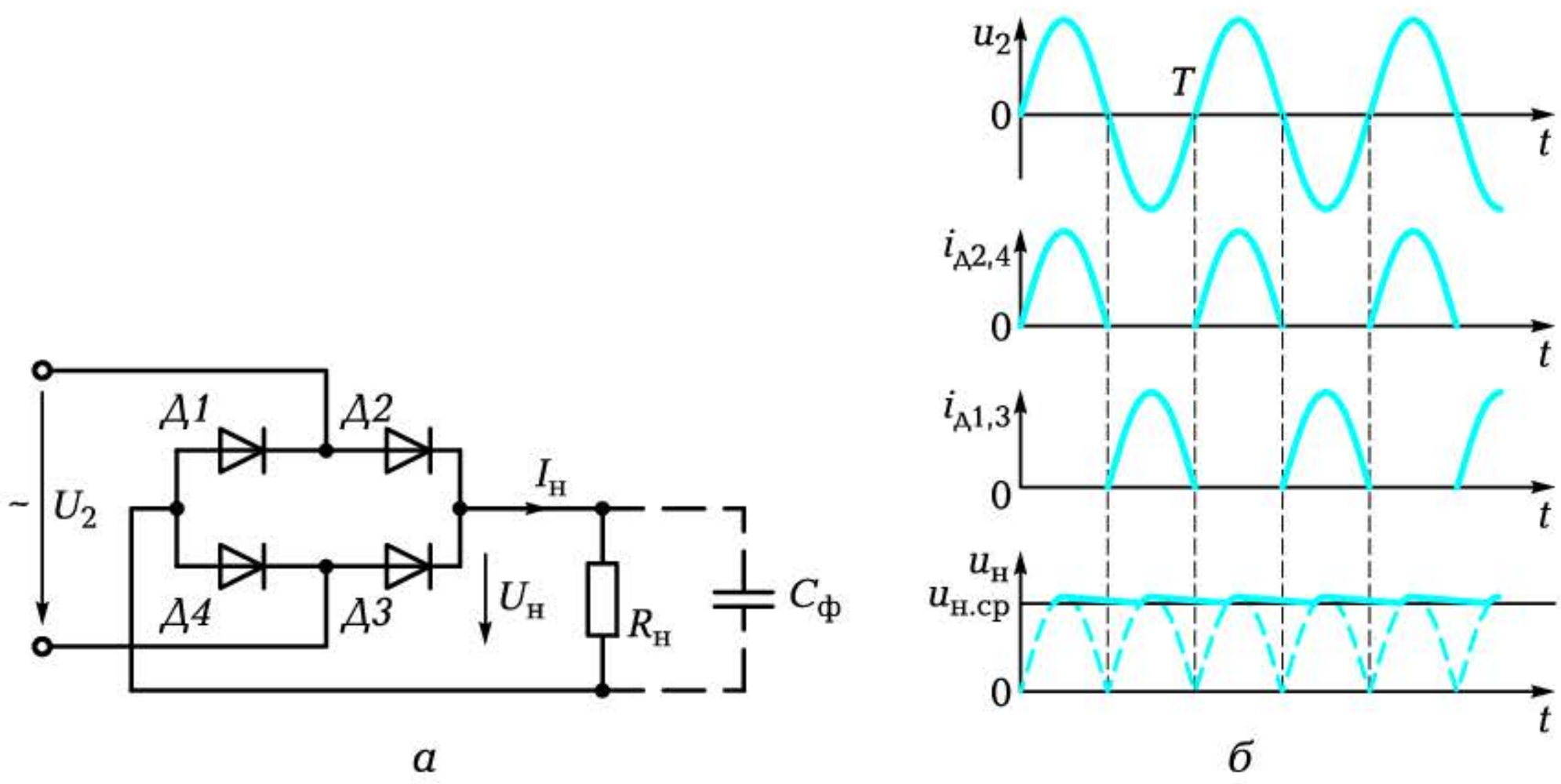


Рис. 6.19. Двухполупериодный мостовой выпрямитель:

а — схема; *б* — временна́я диаграмма напряжений и токов

Разложение полученной несинусоидальной функции в ряд Фурье для двухполупериодного выпрямителя с учетом лишь основной гармоники можно представить в виде

$$u_{\text{н}} = 2U_{2\max} / [\pi(1 - (2/3)\cos 2\omega t)].$$

Среднее выпрямленное напряжение на нагрузке $U_{\text{н.ср}} = 2U_{2\max}/\pi = 0{,}64U_{2\max} = 0{,}9U_2$.

Амплитуда основной гармоники $U_{\text{осн}\max} = 4U_{2\max}/(3\pi) = 0{,}6U_2$.

Коэффициент пульсации $p = U_{\text{осн}\max}/U_{\text{н.ср}} = 2/3 = 0{,}67$.

Частота пульсации $f_{\text{п}} = 2f$.

По сравнению с однополупериодным выпрямителем однофазный двухполупериодный выпрямитель обеспечивает большее среднее напряжение на нагрузке, меньшую амплитуду пульсаций и бóльшую их частоту, что облегчает задачу их подавления сглаживающими фильтрами.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные элементы выпрямительного устройства.
2. Назовите основные параметры выпрямителя.
3. Изобразите схему однополупериодного выпрямителя и диаграмму токов и напряжений.
4. Изобразите схему двухполупериодного выпрямителя и диаграмму токов и напряжений.
5. Назовите преимущества двухполупериодного выпрямителя по сравнению с однополупериодным.

6.5. ТРЕХФАЗНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ. ИНВЕРТОРЫ

6.5.1. Схемы трехфазных выпрямителей

Для выпрямления трехфазного напряжения на практике широко применяются трехфазные выпрямители. Простейшая схема однополупериодного выпрямителя приведена на рис. 6.20, *а*.

Это схема с нейтральной точкой и вторичной обмоткой трансформатора, включенной звездой. В каждую фазу трансформатора последовательно включен диод. Катоды диодов соединены вме-

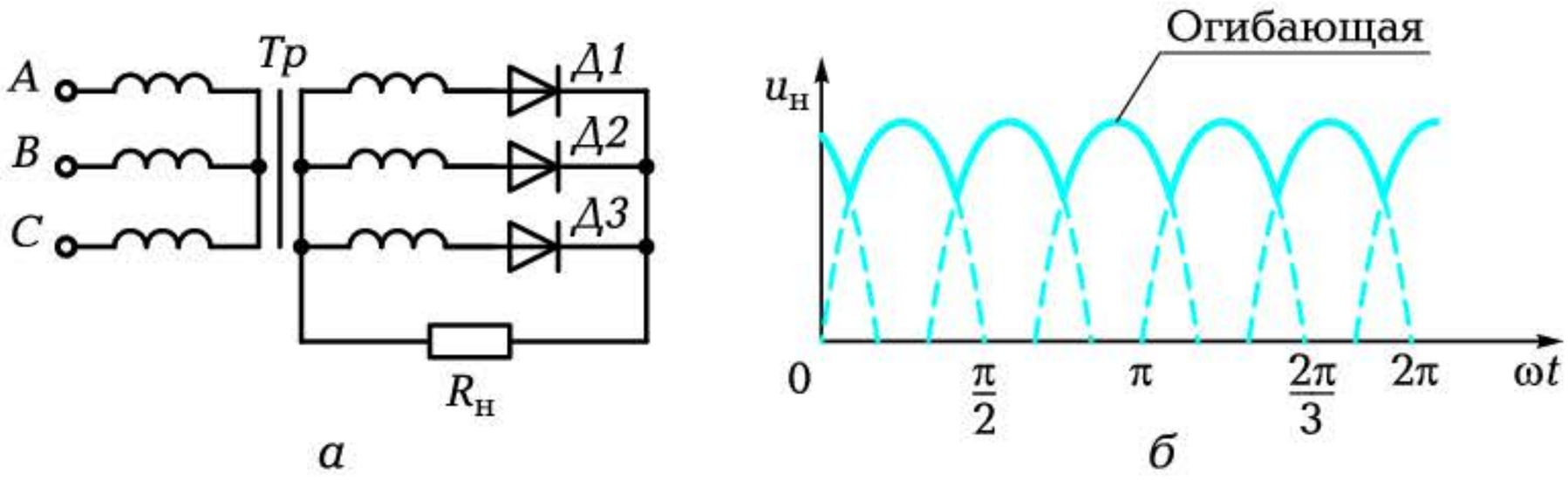


Рис. 6.20. Трехфазный однополупериодный выпрямитель:
а — схема; *б* — временна́я диаграмма напряжения

сте. Между общей точкой катодов и нейтральной точкой включается нагрузка $R_н$.

Первичная обмотка трансформатора может быть включена как звездой, так и треугольником.

Выпрямленные 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 и изменяется в соответствии с огибающей (рис. 6.20, *б*).

Среднее напряжение на нагрузке $U_{н.ср} = 1{,}17U_{2ф}$.

Амплитуда основной гармоники $U_{осн\,max} = 0{,}29U_{2ф}$.

Коэффициент пульсации $p = 0{,}25$.

Частота пульсации $f_п = 3f$.

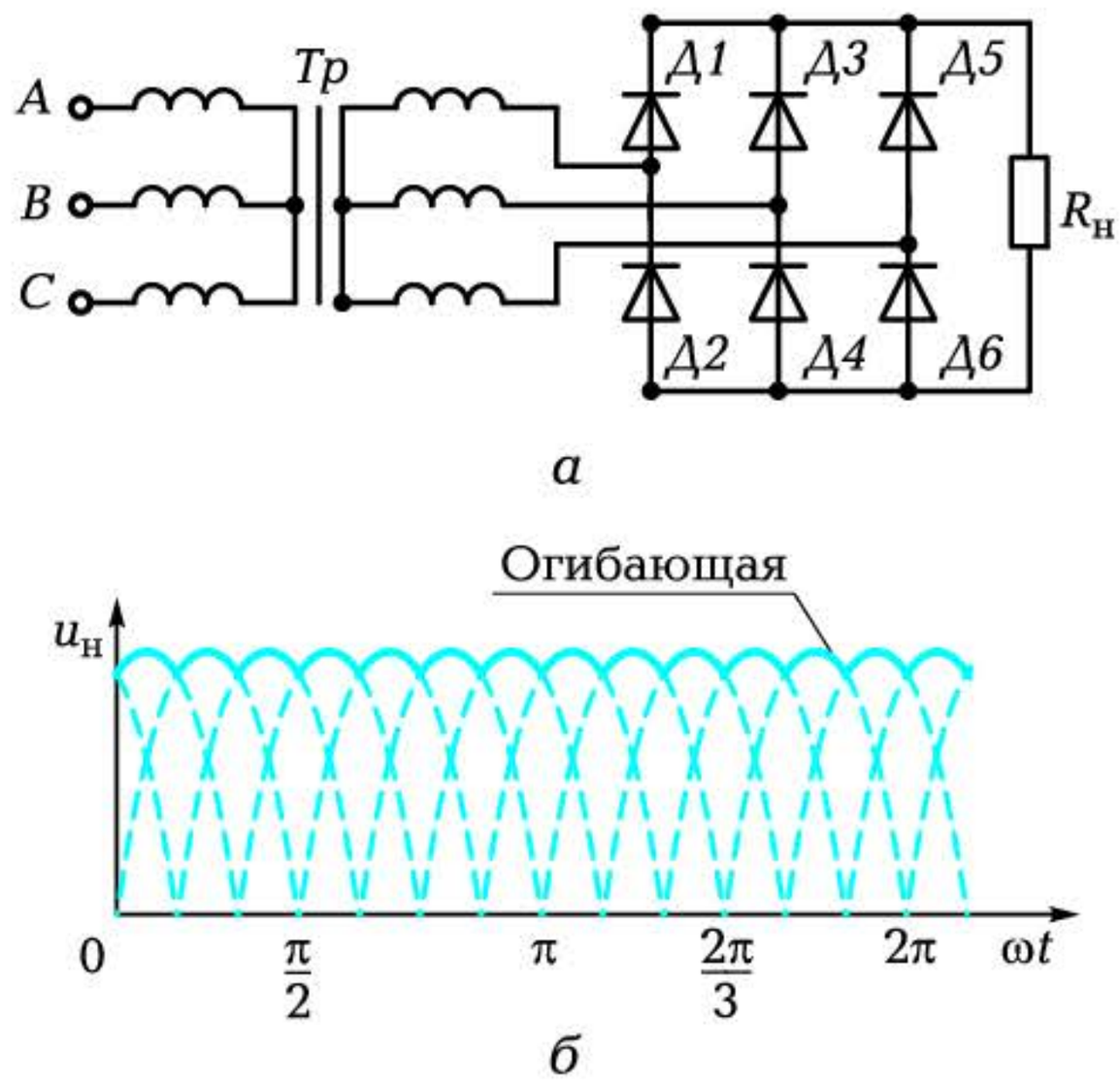


Рис. 6.21. Трехфазный двухполупериодный выпрямитель:
а — схема; *б* — временна́я диаграмма напряжения

Таблица 6.2

Схема	$U_{н.ср}/U_2$	$U_{осн\,max}/U_2$	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

Другая схема трехфазного выпрямителя известна как схема Ларионова. Она представляет собой три мостовые схемы, работающие на единую нагрузку.

На рис. 6.21, *а* приведена схема выпрямителя, а на рис. 6.21, *б* — временна́я диаграмма напряжения на нагрузке.

В трехфазном двухполупериодном выпрямителе диоды пропускают ток через нагрузку в обе полуволны для каждой фазы трехфазного напряжения. Уже одно это позволяет существенно снизить пульсации выпрямленного напряжения (см. огибающую на рис. 6.21, *б*).

Среднее напряжение на нагрузке $U_{н.ср} = 2{,}34U_{2ф}$.

Амплитуда основной гармоники $U_{осн\,max} = 0{,}13U_{2ф}$.

Коэффициент пульсации $p = 0{,}057$.

Частота пульсации $f_п = 6f$.

В табл.6.2 представлены основные параметры рассмотренных схем выпрямителей. Цифры приведены по отношению к напряжению на входе выпрямителя U_2 и частоте питающего напряжения f.

В трехфазной мостовой схеме мощных выпрямителей широкое применение нашли управляемые вентили — тиристоры. Это так называемые управляемые выпрямители. Изменяя моменты открытия тиристоров, можно сравнительно легко и экономично регулировать среднее значение выпрямленного напряжения.

6.5.2. Сглаживающие фильтры

Для подавления переменной составляющей выпрямленного напряжения между вентилем и нагрузкой устанавливают сглаживающие фильтры.

Основным параметром сглаживающего фильтра является коэффициент сглаживания $S_ф$. Он определяется отношением коэффициентов пульсаций на его входе и выходе:

$$S_ф = p_{вх}/p_{вых}.$$

В одних устройствах сглаживающие фильтры не нужны вообще (например, для питания электрического двигателя постоянного тока), в других коэффициент сглаживания может быть небольшим. Однако для питания целого ряда электронных устройств коэффициент пульсаций на выходе блока питания не должен превышать $1 \cdot 10^{-6}$, что требует установки фильтров с большим 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 $X_L = 2\pi f_п L$ существенно снижает переменную составляющую напряжения, практически не изменяя постоянной, так как активное сопротивление R дросселя небольшое.

С достаточной точностью можно принять $S_ф = 2\pi f_п L/R_н$.

Индуктивные фильтры применяются обычно в мощных низкоомных цепях.

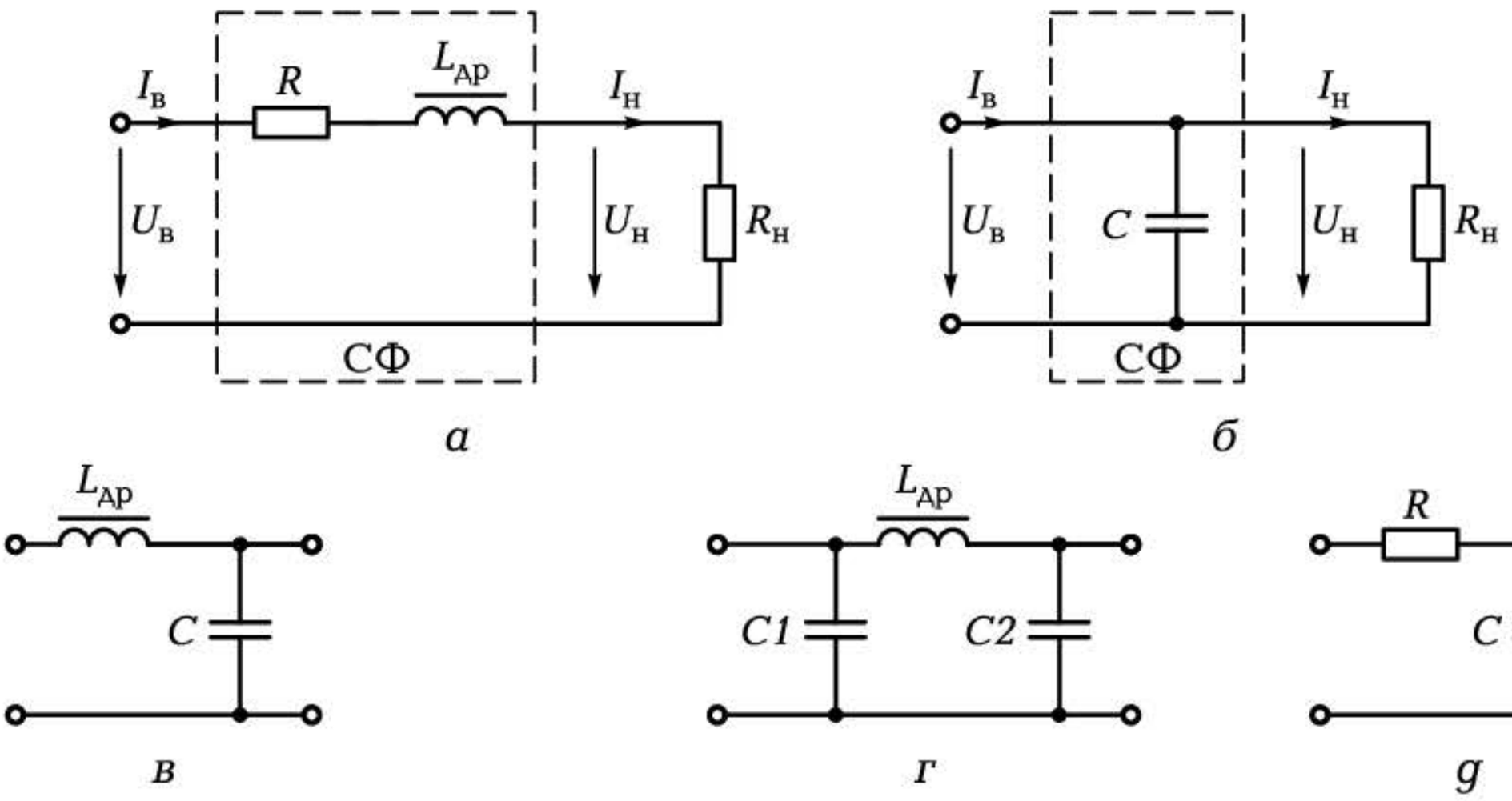


Рис. 6.22. Схемы фильтров:

а — индуктивный; *б* — емкостный; *в* — Г-образный *LC*-фильтр; *г* — П-образный *LC*-фильтр; *д* — Г-образный *RC*-фильтр

Емкостный фильтр (рис. 6.22, *б*) представляет собой конденсатор, включаемый параллельно нагрузке. При значительной емкости сопротивление для переменной составляющей выпрямленного тока небольшое ($X_C = 1/(2\pi f_п C) << R_н$) и она идет через конденсатор, минуя нагрузку. В нагрузку поступает лишь постоянная составляющая выпрямленного тока.

Можно также уяснить 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 $S_ф = 1{,}34 f C_ф R_н$.

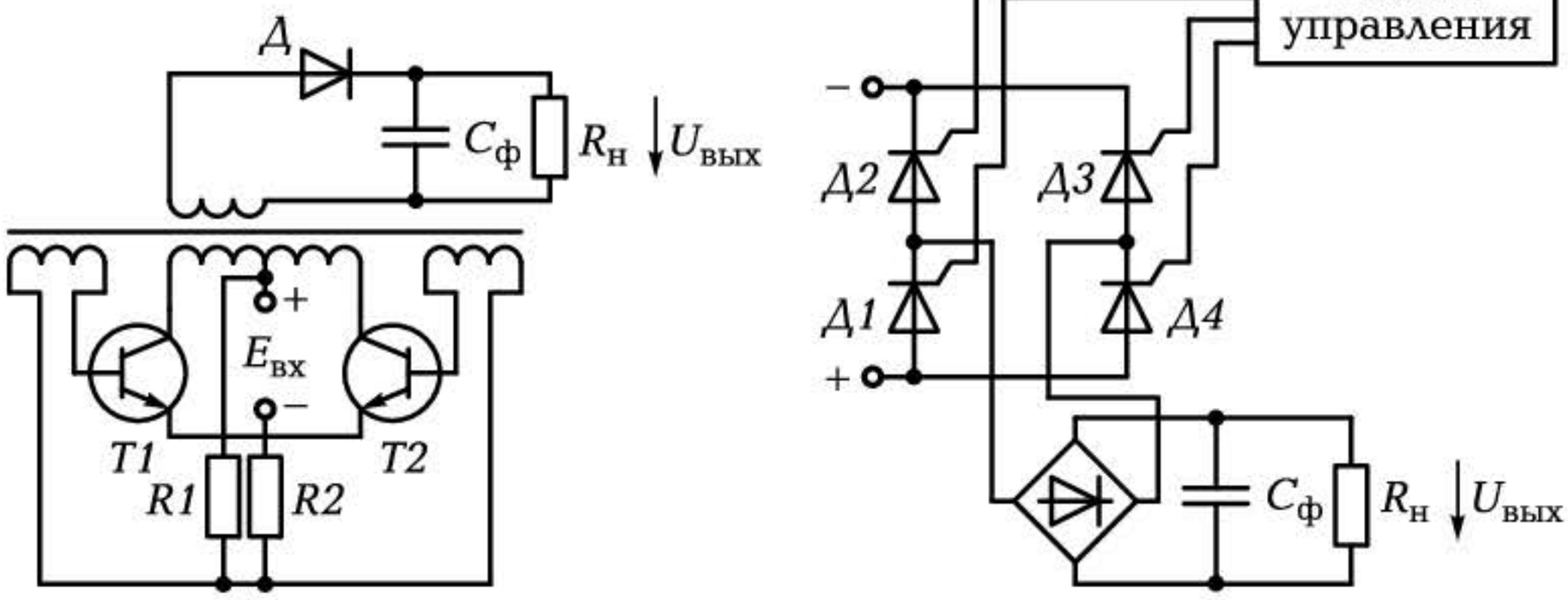
Основное применение емкостные фильтры нашли в маломощных высокоомных цепях.

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, *g*).

6.5.3. Инверторы

Наряду с выпрямительными устройствами в технике широкое применение 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* приведена схема инвертора на транзисторах с положительной трансформаторной обратной связью. Последняя приводит к самовозбуждению инвертора и появлению на его выходе двухполярных прямоугольных



а *б*

Рис. 6.23. Инверторы:

а — на транзисторах; *б* — на тиристорах

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 $U_{вых}$ другого значения.

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 (*Д1*—*Д3* или *Д2*—*Д4*), тем самым преобразуя постоянное напряжение с 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.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Изобразите схемы трехфазных выпрямителей и временны́е диаграммы к ним.
2. Дайте сравнительную оценку двух схем трехфазных выпрямителей.
3. Укажите назначение фильтра и его основной параметр.
4. Поясните принцип действия индуктивного и емкостного фильтров.
5. Для чего предназначен инвертор?
6. Какой принцип положен в основу работы инвртора?

6.6. СТАБИЛИЗАТОРЫ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

6.6.1. Назначение, типы и основной параметр стабилизатора

Для целого ряда потребителей требуется довольно стабильное питающее напряжение. Например, для питания радиовещательных и связных радиостанций допускается нестабильность 2...3 %, для электронного микроскопа нестабильность не должна превышать 0,005 %, 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 $I_н$, температуры окружающей среды и др. Для обеспечения заданной стабильности постоянного напряжения используются специальные устройства — стабилизаторы постоянного напряжения.

Стабилизатор постоянного напряжения осуществляет регулирование электрического тока в нагрузке таким образом, чтобы обеспечить относительное постоянство напряжения на своем выходе и на нагрузке.

По принципу действия стабилизаторы подразделяют следующим образом:

- параметрические,
- 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.

В реальных стабилизаторах при изменении входного напряжения $U_{вх}$ или тока нагрузки $I_н$ выходное напряжение $U_{вых}$ незначительно, но изменяется. Характер изменения $U_{вых}$ при изме-

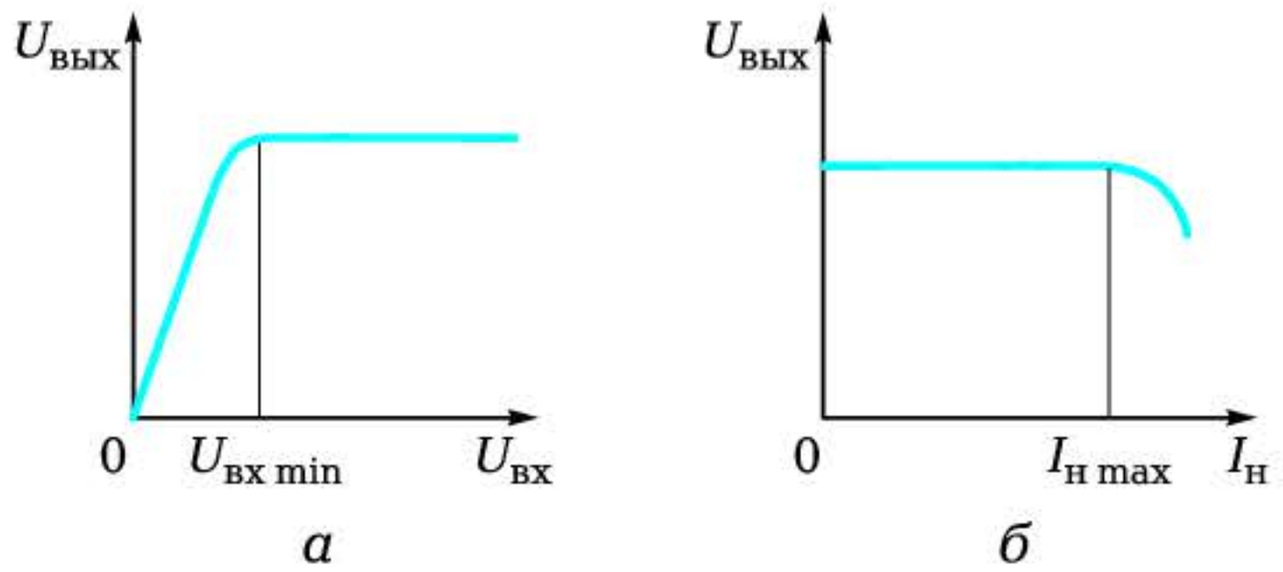


Рис. 6.24. Характер изменения напряжения на выходе стабилизатора:

а — при изменении входного напряжения; *б* — при изменении тока нагрузки

нении $U_{вх}$ представлен 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 $I_н = const$:

$$K_{ст1} = (\Delta U_{вх}/U_{вх.ном})/(\Delta U_{вых}/U_{вых.ном}) = \delta U_{вх}/\delta U_{вых},$$

где $\delta U_{вх}$, $\delta U_{вых}$ — относительные изменения соответственно входного и выходного напряжений.

В других случаях используется коэффициент стабилизации по току, который определяется отношением величин относительного изменения тока нагрузки $\delta I_н$ и выходного напряжения $\delta U_{вых}$ при $U_{вх} = const$:

$$K_{ст2} = (\Delta I_н/I_{н.ном})/(\Delta U_{вых}/U_{вых.ном}) = \delta I_н/(\delta U_{вых}).$$

6.6.2. Параметрический стабилизатор

Простейшая схема параметрического стабилизатора приведена на рис. 6.25, *а*.

Стабилизатор состоит из балластного резистора $R_б$ и полупроводникового стабилитрона *Д*. Выходное напряжение $U_{вых}$ стабилизатора равно напряжению стабилизации $U_{ст}$ стабилитрона *Д*.

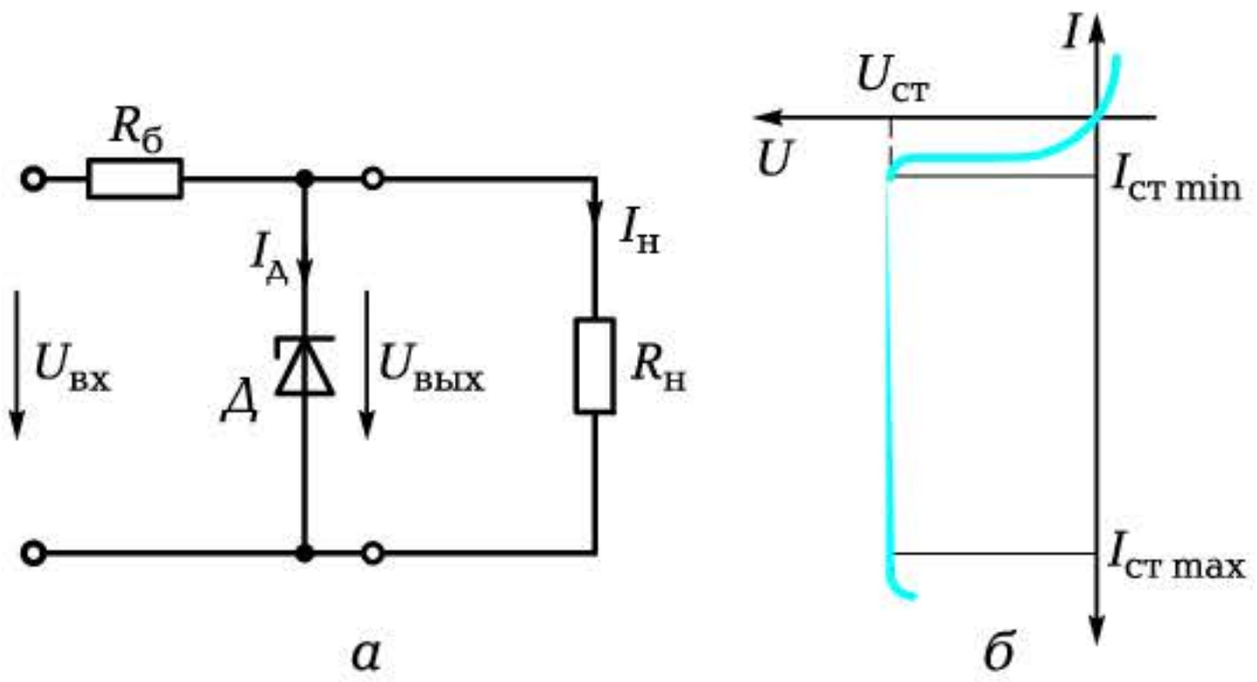


Рис. 6.25. Параметрический стабилизатор:

а — схема; *б* — вольт-амперная характеристика

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:

$U_{ст}$ — напряжение стабилизации;

$I_{ст\ min}$ — минимальный ток стабилитрона;

$I_{ст\ max}$ — максимальный ток стабилитрона.

Для параметрических стабилизаторов значение $K_{ст}$ не превышает, как правило, нескольких десятков. КПД стабилизатора не более 10 %.

6.6.3. Компенсационный стабилизатор

Структурная схема стабилизатора приведена на рис. 6.26, *а*.

Стабилизатор состоит из регулирующего элемента (РЭ), усилителя (У), сравнивающего устройства (СУ) и источника опорного (эталонного) напряжения $U_{оп}$.

Некоторые из этих элементов часто объединяют. Например усилитель может одновременно выполнять функции сравнивающего устройства.

При работе стабилизатора его выходное напряжение $U_{вых}$ сравнивается с опорным напряжением $U_{оп}$.

При отклонении $U_{вых}$ от заданного уровня на выходе сравнивающего устройства появляется электрический сигнал разбаланса. Этот сигнал усиливается и поступает на вход регулирующего эле-

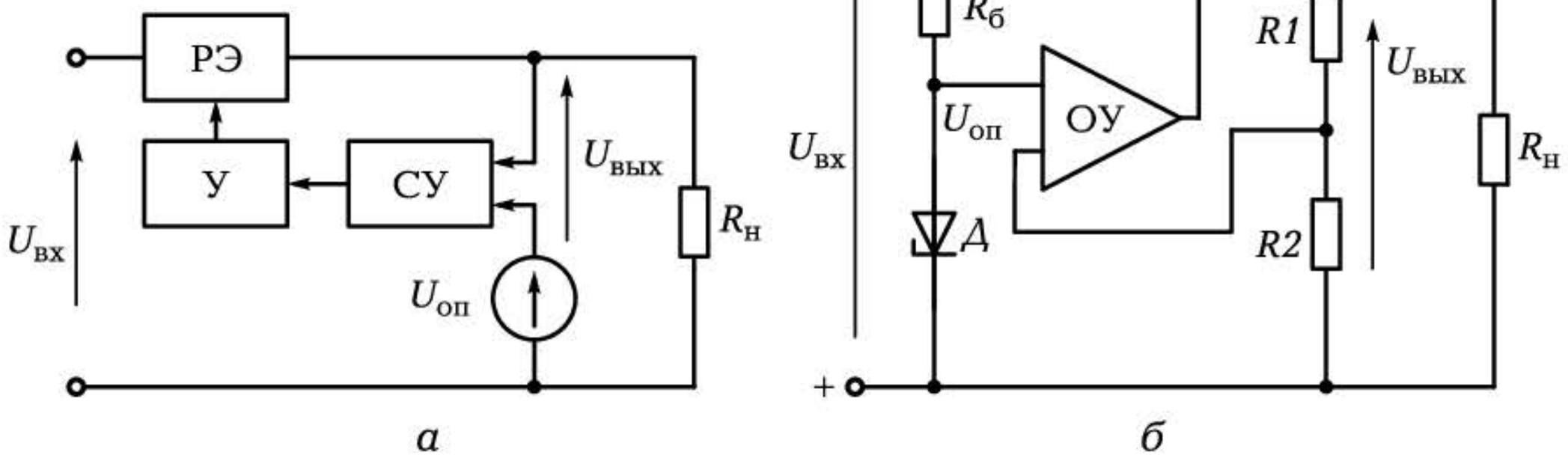


Рис. 6.26. Схемы компенсационного стабилизатора:
а — структурная; *б* — электрическая

мента, 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 принимает исходное значение.

Электрическая схема компенсационного стабилизатора приведена 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 ($R_б$—*Д*), а на другой — часть выходного напряжения, снимаемого с делителя *R1* — *R2*.

По сравнению с параметрическими стабилизаторами компенсационные стабилизаторы обладают более высокими характеристиками: коэффициент стабилизации может достигать нескольких тысяч, КПД составляет примерно 70 %.

Чем больше коэффициент усиления усилителя, тем больше коэффициент стабилизации и меньше выходное сопротивление стабилизатора.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите два основных типа стабилизаторов напряжения.
2. На чем основана работа параметрического стабилизатора?

3. Что положено в основу работы компенсационного стабилизатора?
4. Что является основным параметром стабилизатора?

6.7. УСИЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА. РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ПРИНЦИП РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ

6.7.1. Назначение и классификация

Рассмотренные нами полупроводниковые приборы наиболее широкое применение нашли в электронных *усилителях*.

Под усилителем будем понимать устройство, усиливающее мощность электрических сигналов за счет энергии источника электропитания.

По роду работы усилители подразделяются:

на линейные (пропорциональные), у которых сигнал на выходе пропорционален входному сигналу (рис. 6.27, *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. 6.27, *б*).

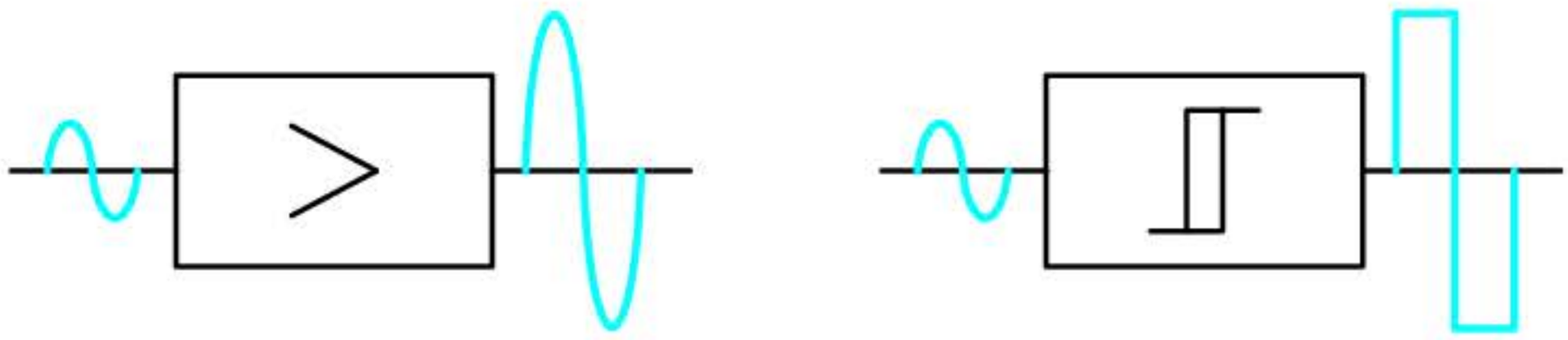
В зависимости от назначения различают:

- усилители тока;
- усилители напряжения;
- усилители мощности.

По характеру спектра сигналов усилители подразделяются следующим образом:

- усилители постоянного тока (УПТ) — усиливают постоянные электрические сигналы, а также переменные частотой от долей герца до нескольких килогерц;
- низкой частоты (УНЧ) — от 10 Гц до 20 кГц;
- широкополосные (ШУ) — от единиц герца до десятков мегагерц;
- избирательные (ИУ) — усиливают электрические сигналы только одной частоты.

Связь, осуществляемая между каскадами усилителя, может быть:



а *б*

Рис. 6.27. Усилители:

а — линейный; *б* — релейный

- гальваническая — применяется в УПТ (только с помощью резисторов);
- реостатно-емкостная (*RC*-связь) — применяется в УНЧ и ШУ;
- трансформаторная — применяется в УНЧ и ИУ.

6.7.2. Параметры и характеристики

Одним из основных параметров, характеризующих усилительные свойства усилителя, является *коэффициент усиления*.

Различают коэффициент усиления по напряжению $K_U = U_{вых}/U_{вх}$, т. е. отношение переменной составляющей напряжения на выходе к переменной составляющей напряжения на входе, а также коэффициенты усиления по току K_I и 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 усилители также оцениваются:

амплитудной характеристикой $U_{вых} = f(U_{вх})$, которая снимается на средней частоте (рис. 6.28, *а*). Точка *A* соответствует $U_{вх} = 0$, т. е. на выходе $U_{вых} = U_ш$ (напряжение шума), точка *B* соответствует $U_{вх\,min}$, отрезок *BC* соответствует линейному диапазону работы усилителя и определяет K_0 — коэффициент усиления на средней частоте, точка *D* соответствует максимальному напряжению, 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. 6.28, *б*). Частотная характеристика показывает, что постоянным отноше-

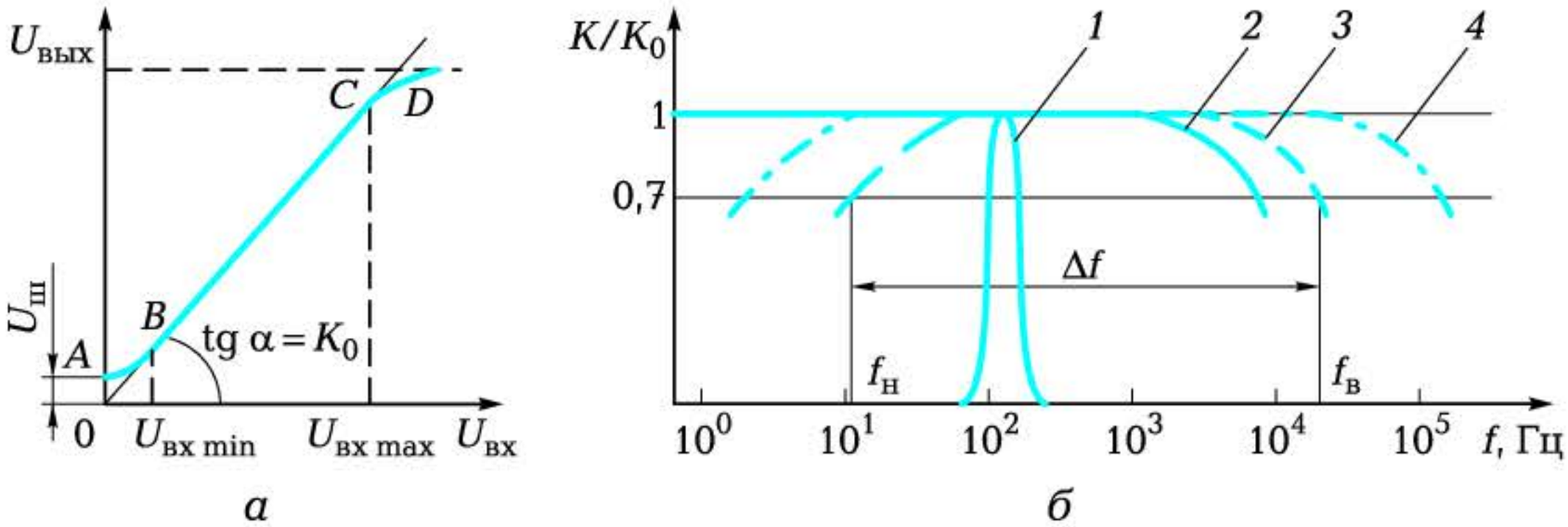


Рис. 6.28. Характеристики усилителя:

а — амплитудная; *б* — частотные для ИУ (кривая *1*), УПТ (*2*), УНЧ (*3*) и ШУ (*4*)

ние K/K_0 остается только в определенной области частот. Диапазон между верхними и нижними частотами $f_в$ и $f_н$ определяет полосу пропускания усилителя $\Delta f = f_в - f_н$, которая находится на уровне 0,7 от максимального отношения K/K_0.

6.7.3. Режимы работы

В зависимости от амплитуды входного сигнала и положения рабочей точки *P* (точки покоя) на нагрузочной прямой *AB* (рис. 6.29, *а*) усилитель может работать:

в линейном режиме (класс *A*) — точка *P* в средней части нагрузочной прямой и $2I_{вх\ max} \le (I_{б.н} - I_{б0})$. Это основной режим для усилителей напряжения. КПД в этом режиме около 25 %;

режиме класса *B*, когда точка *P* в нижней части нагрузочной прямой (совпадает с точкой *B*), а $I_{вх\ max} \le (I_{б.н} - I_{б0})$. КПД в этом режиме около 70 %. Данный режим используется в двухтактных усилителях мощности;

ключевом режиме (класс *D*), когда $I_{вх\ max} >> (I_{б.н} - I_{б0})$. Выходной сигнал имеет прямоугольную форму, КПД — около 95 %. Данный режим используется в импульсных устройствах автоматики.

6.7.4. Принцип работы

Основными элементами полупроводникового усилителя (рис. 6.29, *б*) являются:

- транзистор *T* — активный элемент с управляемой ВАХ, способный усиливать сигналы u_c;

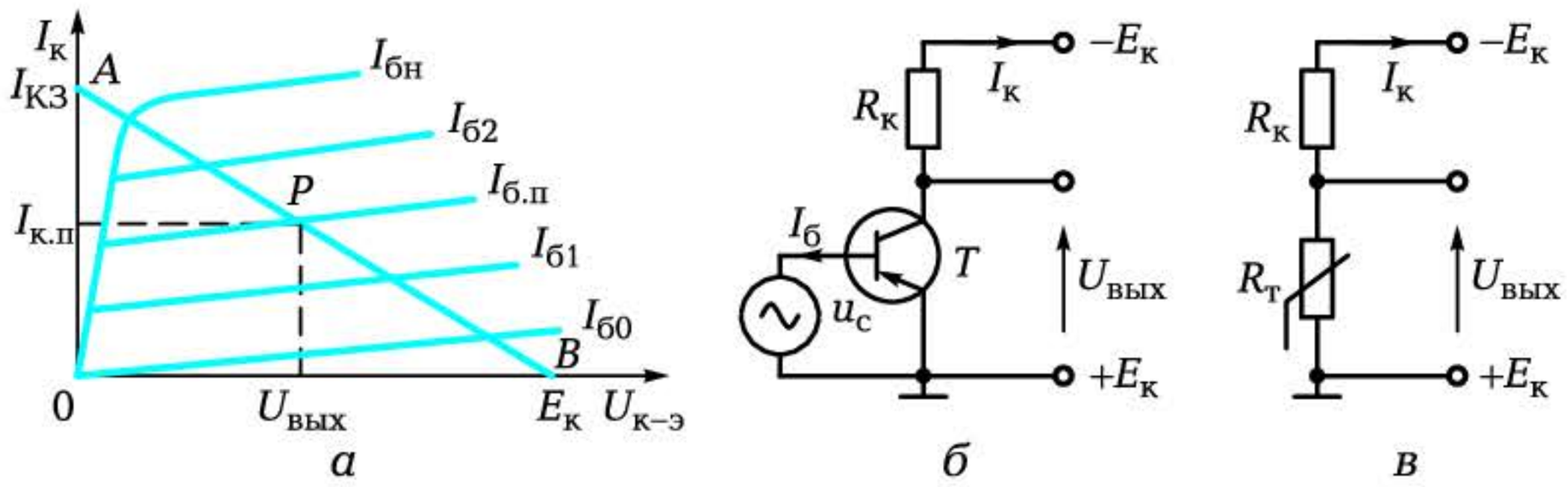


Рис. 6.29. Принцип работы усилителя:
а — ВАХ транзистора и нагрузки; *б* — электрическая схема усилителя; *в* — схема замещения

- нагрузка $R_к$, включаемая последовательно с активным элементом;
- источник питания $E_к$ (как правило, постоянного тока).

На рис. 6.29, *в* приведена эквивалентная схема замещения усилителя, в которой транзистор T представлен резистором с нелинейным сопротивлением $R_т$. Анализ такой схемы можно выполнить, используя реальную ВАХ транзистора и опрокинутую ВАХ резистора. Последняя строится по двум точкам: холостого хода (ХХ) $I_к = 0$, $U_{вых} = E_к$(т.B) и короткого замыкания (КЗ) $I_к = I_{КЗ} = E_к/R_к$, $U_{вых} = 0$ (т. A).

Пусть в исходном состоянии $I_б = I_{б.п}$ (см. рис. 6.29, *а*). Тогда $I_к = I_{к.п}$ и $U_{вых} = E_к – I_{к.п}R_к$. Увеличение $I_б$ приводит к увеличению тока коллектора $I_к$, а соответственно к увеличению $U_{R_к} = I_к R_к$ и уменьшению $U_{вых} = E_к – I_к R_к$. Уменьшение $I_б$ ведет к уменьшению $I_к$ и соответственно к увеличению $U_{вых}$. Таким образом, $U_{вых}$ и $U_{вх}$ изменяются в противофазе.

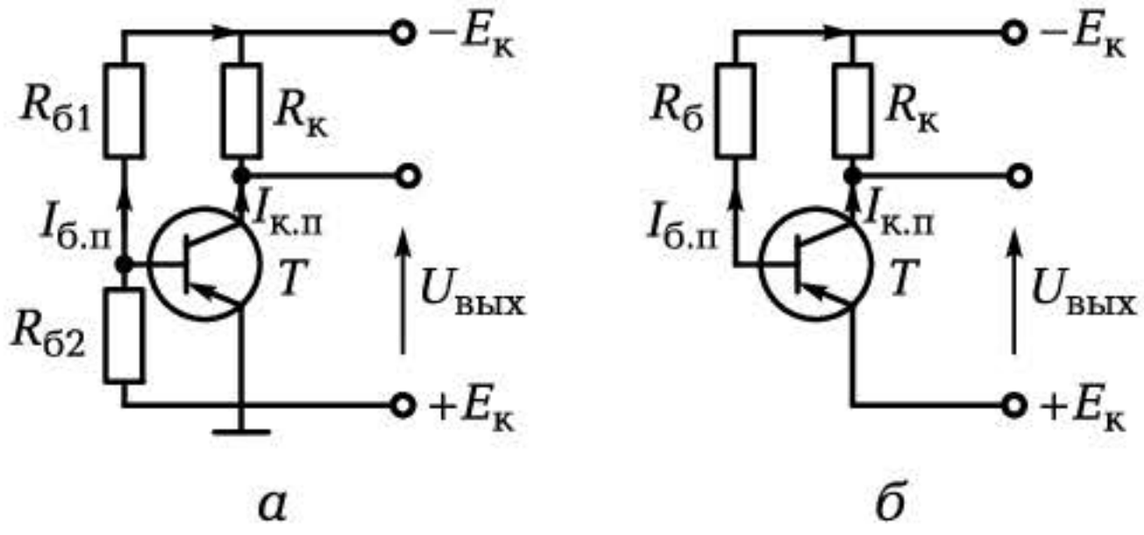
Как же зафиксировать рабочую точку P на нагрузочной прямой?

Фиксация рабочей точки может быть выполнена двумя способами:

- с помощью базового делителя (рис. 6.30, *а*);
- с помощью тока базы (рис. 6.30, *б*).

Базовый делитель $R_{б1}$—$R_{б2}$, включенный параллельно источнику $E_к$, обеспечивает протекание тока $I_{б.п}$, что создает падение напряжения на резисторе $R_{б2}$. В зависимости от соотношения сопротивлений $R_{б1}$ и $R_{б2}$ точка покоя P может быть расположена на нагрузочной прямой в любом месте между точками A и B (см. рис. 6.29, *а*).

Ток базы покоя $I_{б.п}$ обеспечивается также включением резистора $R_б$ между базой транзистора и зажимом $–E_к$ (см. рис. 6.30, *б*).



а *б*

Рис. 6.30. Схемы фиксации рабочей точки:
а — с помощью базового делителя; *б* — с помощью тока базы

Недостаток усилителя на транзисторах — существенная зависимость характеристик транзисторов от температуры.

Это требует применения специальных схем термостабилизации, основные из которых осуществляются за счет введения отрицательных обратных связей по постоянным составляющим тока и напряжения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что собой представляют усилители и как их классифицируют?
2. Назовите основные параметры и характеристики усилителя.
3. Назовите основные режимы работы усилителя.
4. Поясните принцип действия усилителя.
5. Изобразите схемы фиксации рабочей точки в усилителях.

6.8. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В УСИЛИТЕЛЯХ. ВЛИЯНИЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЯ

6.8.1. Виды обратных связей

Обратной связью (ОС) в усилителе называется воздействие выходного сигнала на вход усилителя.

Обратная связь может быть последовательной (рис. 6.31, *а*) и параллельной (рис. 6.31, *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 $U_{ОС}$,

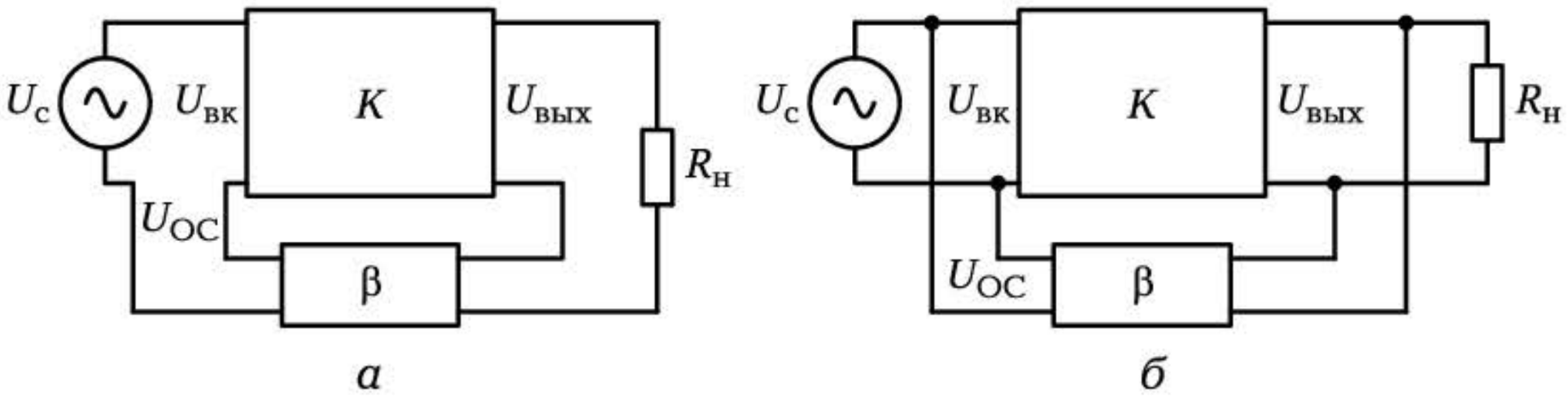


Рис. 6.31. Обратная связь в усилителях:

а — последовательная; *б* — параллельная

подаваемого на вход усилителя, к выходному напряжению усилителя $U_{вых}$. Он показывает, какая часть выходного сигнала передается на вход усилителя.

Если сигнал ОС подается на вход в фазе с входным сигналом ($\beta > 0$), то ОС положительна, если в противофазе ($\beta < 0$) — отрицательна.

Обратная связь оказывает влияние на коэффициент усиления усилителя.

Пусть $\beta > 0$.

Тогда коэффициент усиления усилителя без ОС

$$K = U_{вых}/U_{вх},$$

а при наличии ОС и при условии $U_{вх} = U_с + U_{ОС}$

$$K_{ОС} = U_{вых}/U_с = U_{вых}/(U_{вх} - U_{ОС}) = (U_{вых}/U_{вх})/(1 - U_{ОС}/U_{вх}) =$$
$$= (U_{вых}/U_{вх})/(1 - (U_{ОС}/U_{вых})(U_{вых}/U_{вх})) = K/(1 - \beta K).$$

Таким образом

$$K_{ОС} = K/(1 - \beta K),$$

т. е. положительная ОС вызывает увеличение коэффициента усиления усилителя.

При $\beta K = 1$ ОС называется критической, так как в этот момент $K_{ОС} \to \infty$, т. е. усилитель даже при $U_{вх} = 0$ имеет $U_{вых} \neq 0$, а следовательно, переходит в режим самовозбуждения (генерации).

В усилителях положительная ОС практически не применяется, она используется лишь в автогенераторах.

Пусть $\beta < 0$.

Тогда напряжение входного сигнала

$$U_{вх} = U_с - U_{ОС},$$

откуда

$$K_{ОС} = U_{вых}/U_с = K/(1 + \beta K).$$

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.).

Введение ООС по постоянному току позволяет повысить стабильность работы усилителя при изменении температуры окружающей среды.

6.8.2. Принцип термостабилизации

При увеличении температуры ВАХ транзистора (рис. 6.32, *а*) смещается вверх (+50 °С без ООС), точка покоя P перемещается по нагрузочной прямой в точку P', ток коллектора растет ($I'_к$). Это ведет к уменьшению выходного напряжения ($U'_{вых}$). Для исключения этого в цепь эмиттера включается резистор $R_э$ (рис. 6.32, *б*). Он обеспечивает ООС по току коллектора, так как напряжение ООС, снимаемое с резистора $R_э$, пропорционально выходному току. Увеличение тока коллектора ведет к увеличению падения напряжения на резисторе $R_э$. Поскольку падение напряжения $U_б$ на резисторе $R_{б2}$ не зависит от температуры, то напряжение между базой и эмиттером транзистора $U_{б–э} = U_б - U_э$ уменьшается. Это приводит к уменьшению тока базы до $I''_б$, и рабочая точка перемещается в точку P'', близкую к точке P. Таким образом, выходное напряжение $U_{вых}$ остается практически неизменным.

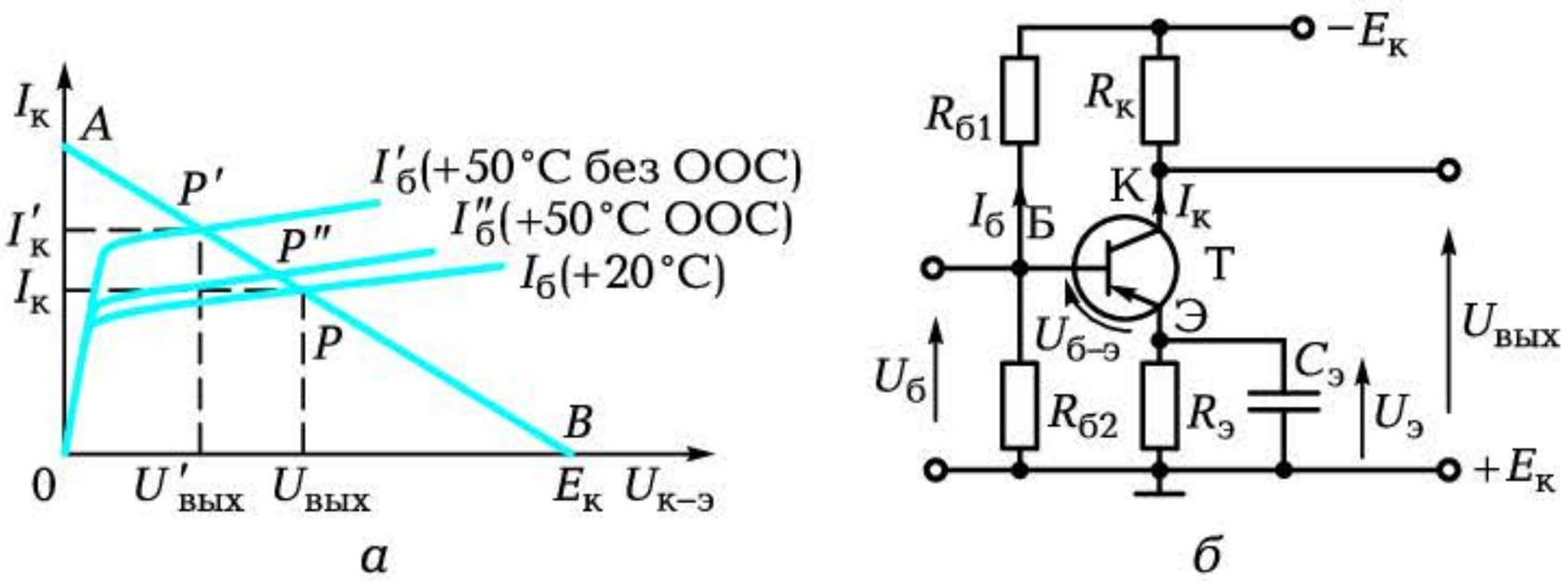


Рис. 6.32. ВАХ, поясняющие принцип термостабилизации (*а*), и схема усилителя с термостабилизацией (*б*)

ООС позволяет также улучшить частотные характеристики усилителя, т. е. увеличить его полосу пропускания, уменьшить нелинейные искажения в выходном напряжении, увеличить входное и уменьшить выходное сопротивления усилителя в $(1 + \beta K)$ раз.

В схеме на рис. 6.32, *б* ООС обеспечивается как по постоянному, так и по переменному току. ОС по постоянному току является цепью термостабилизации. ОС по переменному току применяется для повышения устойчивости усилителя.

Если по каким-либо причинам ООС по переменному току не нужна (схема устойчиво работает, а коэффициент K и так мал), то резистор $R_э$ шунтируется конденсатором $C_э$, через который проходит переменная составляющая тока эмиттера.

При этом на нижней граничной частоте $f_н$ емкостное сопротивление должно быть на порядок меньше сопротивления $R_э$. Емкость шунтирующего конденсатора определяется выражением

$$C_э = (10 \ldots 20)/(2\pi f_н R_э).$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что собой представляют обратные связи в усилителе и как их классифицируют?
2. К чему приводит введение положительной обратной связи?
3. Укажите основное назначение отрицательной обратной связи и поясните ее влияние на параметры усилителя.
4. Поясните принцип термостабилизации в усилителях.

6.9. МНОГОКАСКАДНЫЕ УСИЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ

6.9.1. Виды межкаскадных связей

Рассмотренные однокаскадные усилители имеют, как правило, коэффициент усиления по напряжению порядка нескольких десятков. Однако во многих устройствах промышленной электроники часто требуется гораздо больший коэффициент усиления (до сотен и даже тысяч). В этом случае применяются многокаскадные

усилители, общий коэффициент усиления которых равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов:

$$K = K_1 K_2 \dots K_n.$$

При этом отдельные каскады между собой могут быть соединены посредством:

- *RC*-связи;
- трансформаторной связи;
- гальванической связи.

6.9.2. Усилители с *RC*-связью

Наибольшее распространение в усилителях напряжения получили многокаскадные *усилители с RC-связью* (рис. 6.33). Связь между каскадами в них осуществляется за счет разделительного конденсатора $C_р$ и коллекторного резистора $R_к$.

Конденсатор $C_{р1}$ 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 $C_{р1}$.

Конденсатор $C_{р2}$ не пропускает постоянную составляющую на выход усилителя (в нагрузку $R_н$), а конденсатор $C_р$ исключает влияние выходного сопротивления источника сигнала на входную цепь усилителя. Форма сигнала в отдельных точках усилителя представлена в виде выносок в окружностях.

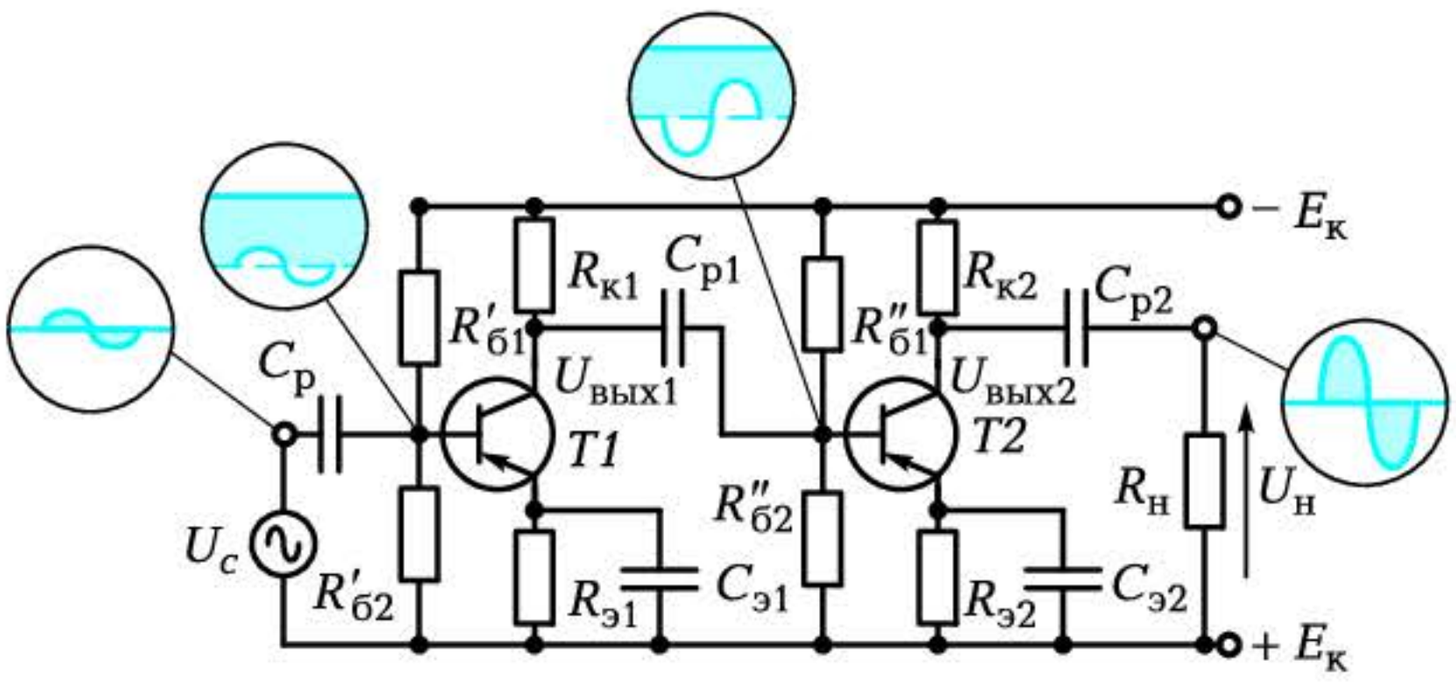


Рис. 6.33. Схема двухкаскадного усилителя с *RC*-связью между каскадами

6.9.3. Усилители с трансформаторной связью

Усилители напряжения, в которых связь между каскадами осуществляется с помощью трансформатора, называются *усилителями с трансформаторной связью* (рис. 6.34).

При отсутствии входного напряжения $U_{вх}$ по первичным обмоткам *Тр2* и *Тр3* проходят постоянные коллекторные токи транзисторов *Т1* и *Т2* соответственно.

Во вторичных обмотках напряжение равно нулю (трансформатор не передает постоянное напряжение во вторичную обмотку).

Если на входе действует переменное напряжение $U_{вх}$, то во вторичной обмотке *Тр1* также появляется переменное напряжение, передаваемое на вход первого каскада.

В первичной, а значит, и вторичной обмотках *Тр2* появляется переменное напряжение, которое передается на вход следующего каскада и т.д.

Благодаря применению трансформатора постоянная составляющая коллекторного питания не попадает на вход следующего каскада.

Достоинством усилителей с трансформаторной связью является возможность изменения фазы выходного сигнала на 180° путем переключения зажимов вторичной обмотки транзисторов.

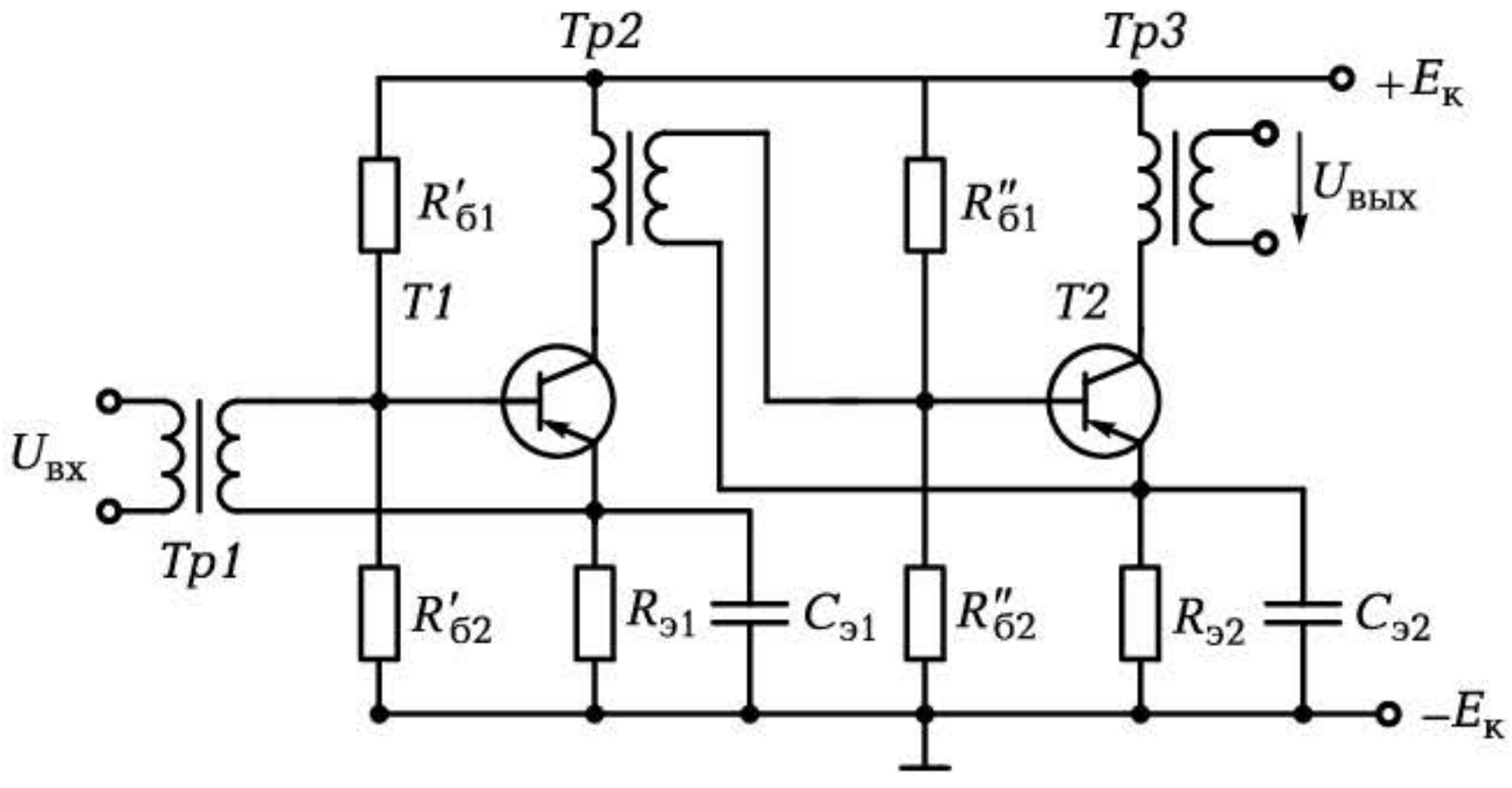


Рис. 6.34. Схема усилителя с трансформаторной связью

6.9.4. Усилители с гальванической связью

В тех случаях, когда необходимо усиливать сигналы частотой от долей герца, использование реактивных элементов в цепях связи между каскадами становится невозможным (емкость C должна быть очень большой). В цепи связи в этом случае используются резисторы. Построенные по такому принципу усилители называются *усилителями с гальванической связью*. Они являются усилителями постоянного тока (УПТ).

В них разделение постоянной и переменной составляющих 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. 6.35).

Нагрузка включается между коллекторами двух 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 $R_б$ служит для балансировки схемы — выравнивания потенциалов на коллекторах. Температурная стабилизация осуществляется за счет общего для обоих транзисторов резистора $R_э$.

Входной сигнал $U_{вх1}$ подается на базу транзистора *T1* (потенциал базы) *T2* постоянен и определяется делителем $R''_{б1}$—$R''_{б2}$). В этом случае в нагрузке появляется ток, пропорциональный амплитуде и знаку входного сигнала. Если на базу транзистора *T2* подается другой входной сигнал $U_{вх2}$, то сигнал на выходе будет пропорционален разности входных сигналов:

$$U_{вых} = K_U(U_{вх1} - U_{вх2}).$$

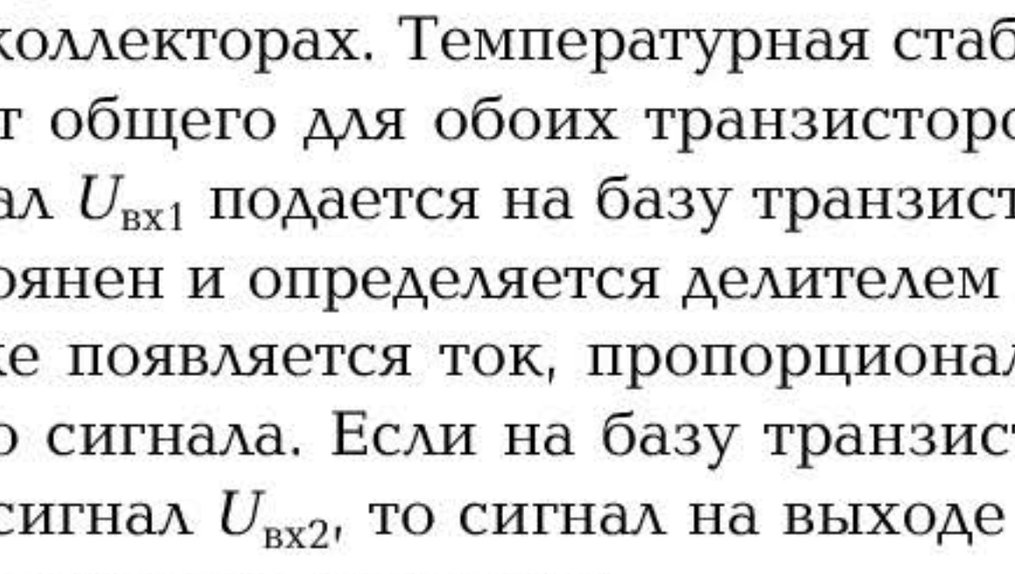


Рис. 6.35.Схема усилителя с гальванической связью

Усилитель с двумя входами называют *усилителем* с *дифференциальным входом*. Как правило, такой усилитель имеет несколько каскадов, что позволяет получить значительный коэффициент усиления.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается основное назначение многокаскадных усилителей?
2. Назовите виды межкаскадных связей в усилителях и охарактеризуйте их.
3. Поясните по схеме многокаскадного усилителя последовательность прохождения сигнала.

6.10. УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА И УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

6.10.1. 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 $U_{вых} = K_U U_{вх1}$, а если только на инверсный (–), то $U_{вых} = -K_U U_{вх2}$.

На рис. 6.36 показаны условное обозначение 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.

Операционный усилитель может использоваться для усиления электрических сигналов, например от датчиков автоматических систем управления. В этом случае используется один из входов усилителя, как правило, инверсный. Второй вход усилителя (прямой) соединяется с корпусом. Поскольку коэффициент усиления операционного усилителя слишком высок, необходимы дополнительные меры для его уменьшения до нужной величины.

Коэффициент усиления операционного усилителя можно легко регулировать, если ввести отрицательную обратную связь с выхода усилителя на его инверсный вход (рис. 6.37, *а*).

Изменение напряжения на выходе всегда противоположно по знаку изменению напряжения на инверсном входе, т. е. эти напряжения всегда 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 устанавливается за счет изменения сопротивления одного из резисторов в цепи обратной связи (обычно резистора *R2*). С достаточной точностью можно считать, что коэффициент усиления с обратной связью $K_{OC} = K_U R_2 / R_1$.

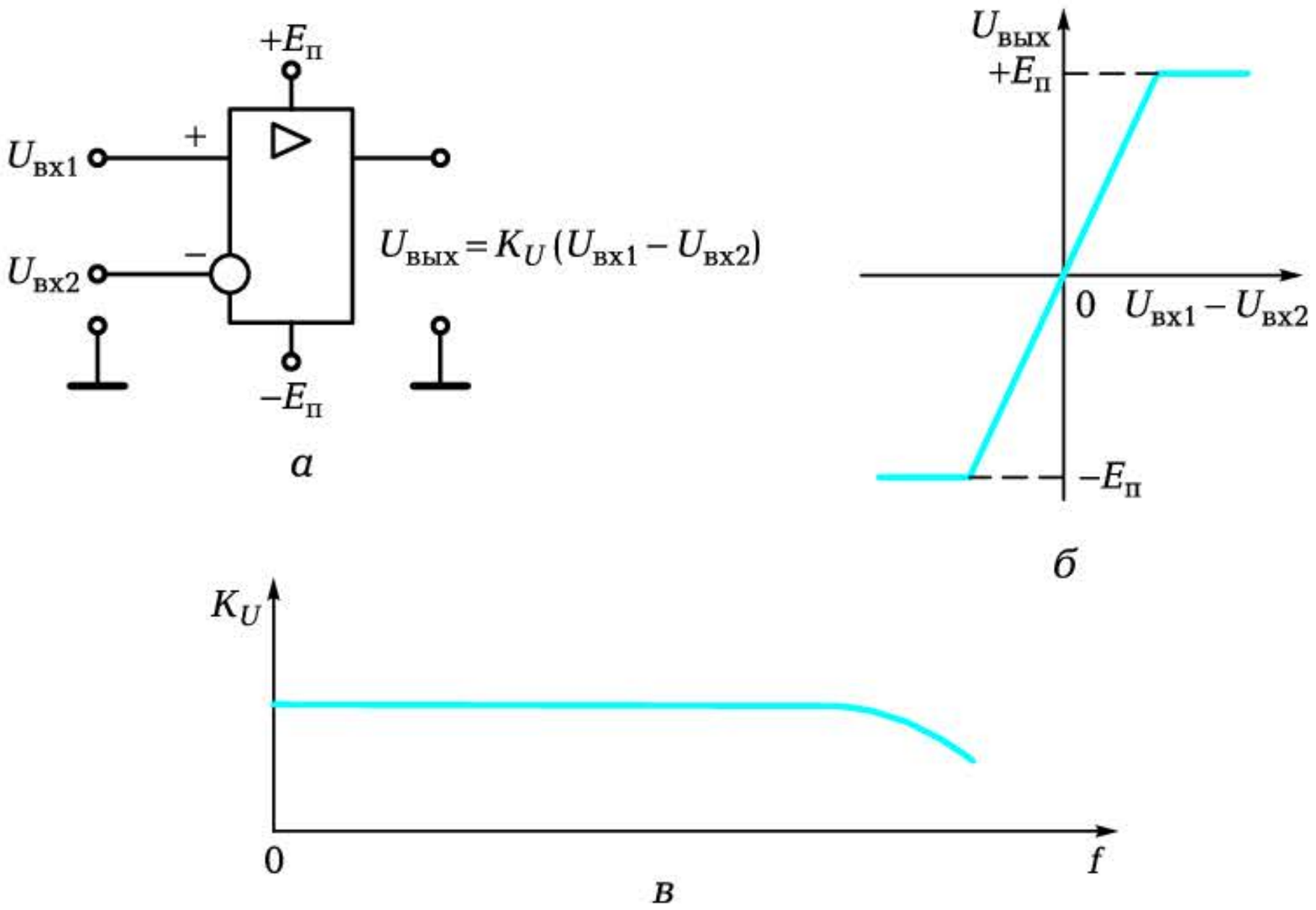


Рис. 6.36. Операционный усилитель:

а — схема; *б* — амплитудная характеристика; *в* — частотная характеристика

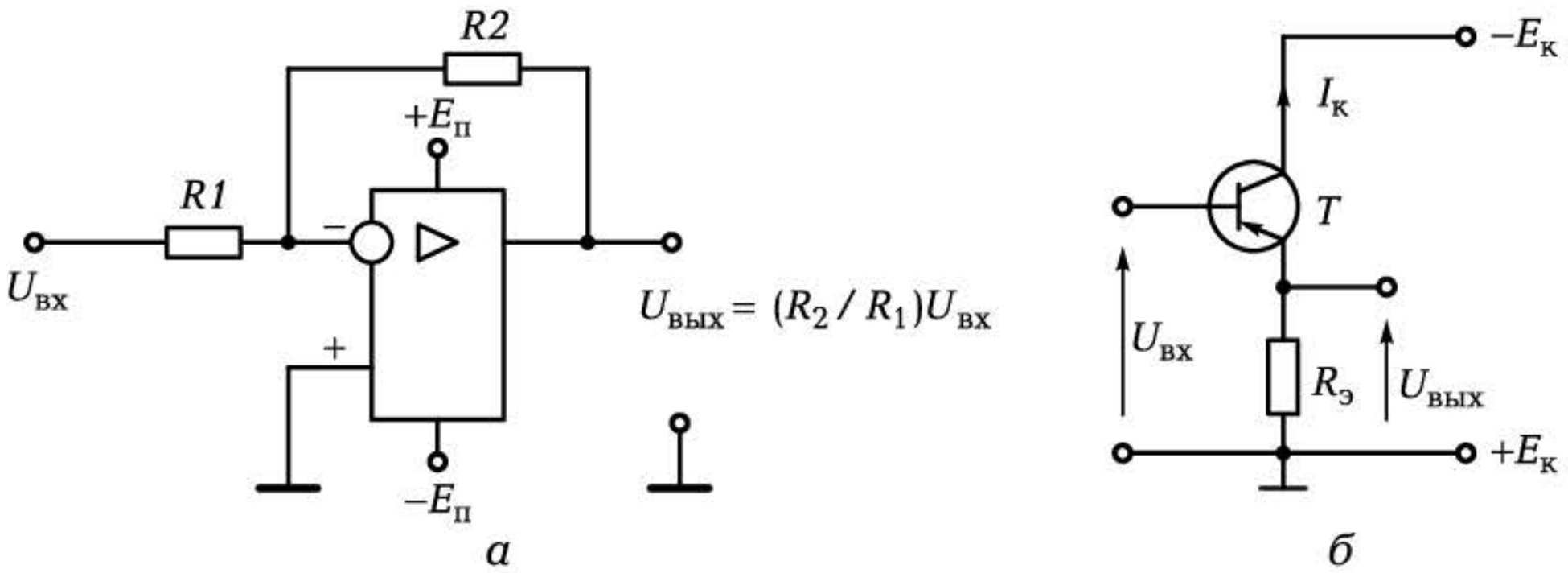


Рис. 6.37. Операционный усилитель с ООС (*а*) и эмиттерный повторитель (*б*)

Достоинство УПТ — усиление постоянного тока и сигналов низкой частоты.

6.10.2. 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 и надежный отвод теплоты от коллекторного p—n-перехода. В этом случае корпус транзистора надежно соединяют с корпусом усилителя (его массой) либо со специальным радиатором, способным хорошо рассеивать теплоту.

В связи с тем, что сопротивление нагрузки, подключаемой к выходу усилителя мощности, обычно невелико (например, динамики с сопротивлением до 4 Ом), применяется трансформаторная связь, позволяющая за счет коэффициента трансформации провести согласование малого сопротивления нагрузки с большим выходным сопротивлением усилителя.

Усилители мощности могут быть построены по однотактной и двухтактной схемам.

Однотактная схема, работающая в режиме *A*, применяется относительно редко из-за низкого КПД (30...40 %) и возможности получения незначительной выходной мощности.

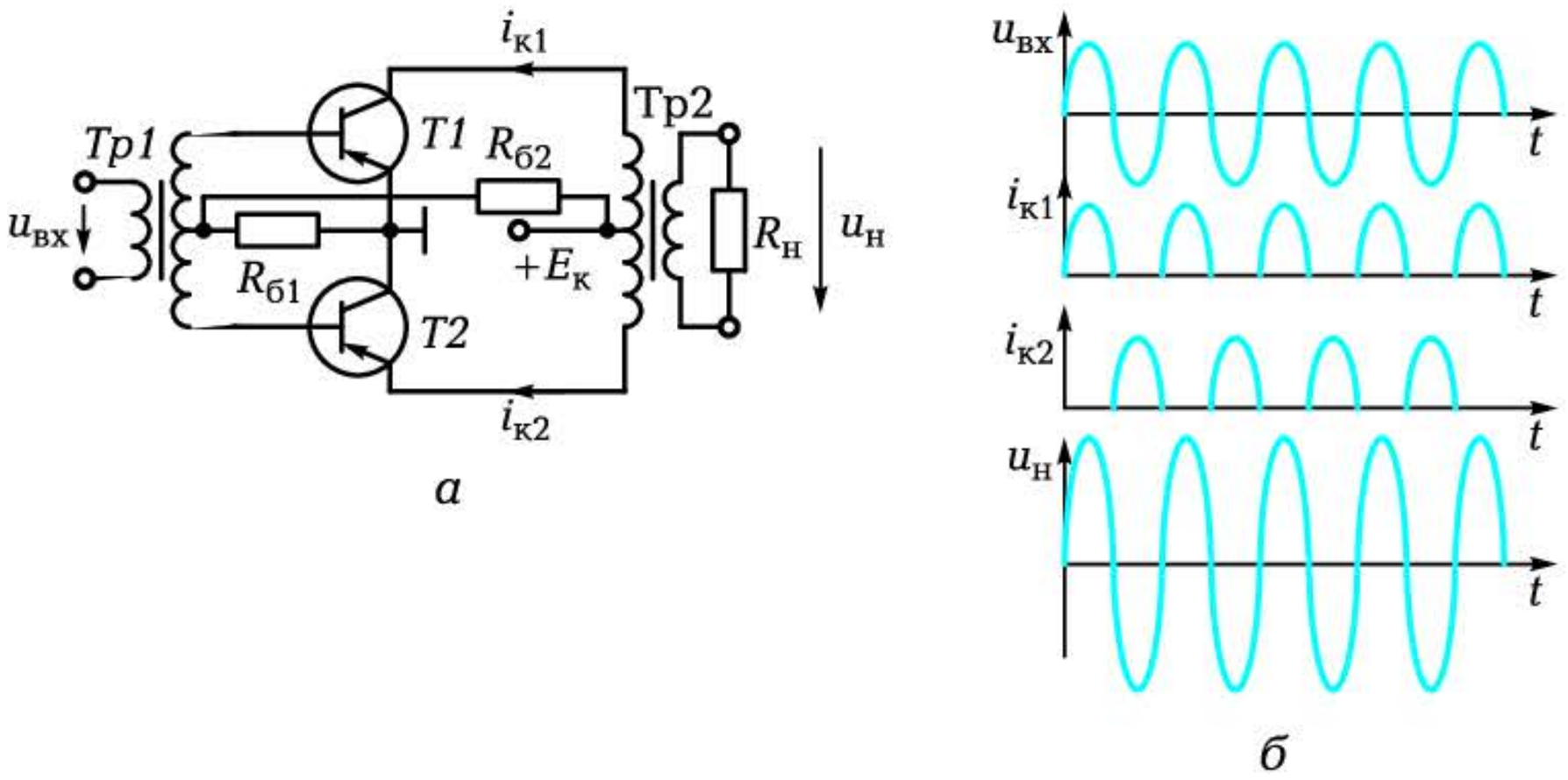


Рис. 6.38. Двухтактный усилитель мощности:
а — схема; *б* — временны́е диаграммы

Этих недостатков лишены двухтактные схемы усилителей мощности, работающие в режиме *B* (рис. 6.38, *а*).

Их КПД достигает 70 %, мощность свыше 10 Вт, ток покоя при $U_{вх} = 0$ также равен нулю, и сердечник трансформатора не насыщен.

Для управления двухтактными 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 *Тр1*, вторичная обмотка которого имеет средний вывод.

Резисторы $R_{б1}$ и $R_{б2}$ обеспечивают требуемый режим работы транзисторов — режим В.

Трансформатор *Тр2* служит для согласования выходного сопротивления усилителя с низкоомной нагрузкой.

Работу усилителя можно проанализировать с помощью временны́х диаграмм (рис. 6.38, *б*). Входной сигнал $u_{вх}$, подаваемый через трансформатор *Тр1*, поступает на базы транзисторов *T1* и *T2* в противофазе. Поскольку транзисторы работают в режиме В, то, если *T1* находится в активном режиме и пропускает коллекторный ток $i_{к1}$, *T2* закрыт и не пропускает ток. Во время второй полуволны входного напряжения *T2* проводит ток $i_{к2}$, а *T1* закрыт. Оба тока протекают через первичную обмотку трансформатора *Тр2* 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 напряже-

ния. При этом мощность сигнала на нагрузке может во много раз превышать мощность входного сигнала.

В качестве усилителей мощности может также использоваться транзисторный усилитель, собранный по схеме с общим коллектором — эмиттерный повторитель (рис. 6.37, *б*).

Коэффициент усиления транзисторного усилителя по напряжению равен единице. При этом фаза выходного сигнала совпадает с фазой входного (отсюда и название *эмиттерный повторитель)*. В то же время коэффициент усиления по току, а значит, и по мощности может достигать значительной величины.

Входное сопротивление такой схемы лежит в пределах 0,5...1 МОм (тогда как у схемы с общим эмиттером 0,1...1 кОм). Это позволяет подключать к входу электрические цепи с высоким выходным сопротивлением. В то же время выходное сопротивление невелико — единицы ом, что позволяет подключать к выходу низкоомную нагрузку. Поэтому эмиттерный повторитель применяется также в качестве согласующего элемента.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные свойства и области применения операционных усилителей.
2. Изобразите схему включения операционного усилителя с регулируемым коэффициентом усиления.
3. Укажите особенности построения схем усилителей мощности.
4. Как работает двухтактный усилитель мощности?
5. Почему транзисторный усилитель, собранный по схеме с общим коллектором, получил название эмиттерный повторитель?

6.11. ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ СИНУСОИДАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

6.11.1. Классификация электронных генераторов

Электронные генераторы — это устройства, в которых энергия постоянного тока преобразуется с помощью электронных ламп или полупроводниковых приборов в энергию электрических колебаний определенных 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, что положительная ОС с коэффициентом $\beta = 1/K$ ведет к самовозбуждению усилителя и превращению его в генератор. На этом принципе и построены все автогенераторы как синусоидальных, так и релаксационных колебаний.

6.11.2. *LC*-генераторы

Рассмотрим полупроводниковый автогенератор с параллельным контуром $L_к C_к$ в коллекторной цепи транзистора и трансформаторной положительной обратной связью по базе (рис. 6.39, *а*). При включении источника питания конденсатор заряжается по

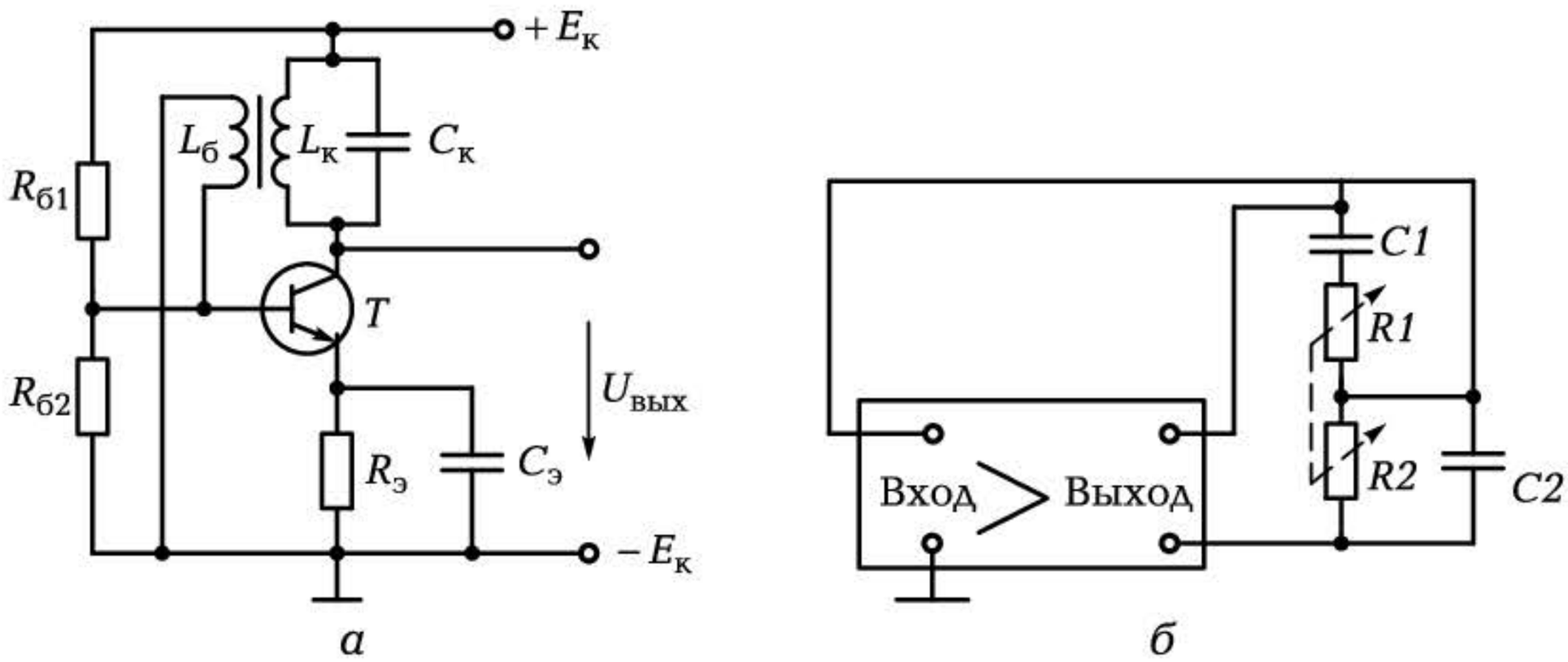


Рис. 6.39. Генераторы синусоидальных колебаний:
а — *LC*-генератор; *б* — *RC*-генератор с мостом Вина

цепи: «+$E_к$» — $C_к$ — T — $R_э$ — «–$E_к$». Зарядившись до значения $E_к$, конденсатор $C_к$ начинает разряжаться на индуктивную катушку $L_к$. При этом электрическая энергия конденсатора преобразуется в магнитную энергию катушки. Затем индуктивная катушка разряжается на конденсатор, т. е. магнитная энергия преобразуется вновь в электрическую и т. д. В контуре возникают затухающие колебания с частотой $f = 1/(2\pi\sqrt{L_к C_к})$. Быстрота затухания колебаний определяется величиной активного сопротивления катушки $R_к$, на котором выделяется теплота, представляющая собой невосполнимые потери энергии на нагрев. Если бы их не было, колебания не затухли бы.

Для устранения затуханий часть напряжения колебательного контура $L_к C_к$ с помощью вторичной обмотки трансформатора $L_б$ в фазе подается на базу транзистора. В этом случае колебания на резонансной частоте $f_р$ могут стать незатухающими. На выходе каскада также будут незатухающие колебания.

Для возбуждения колебаний должны быть выполнены два условия:

баланс амплитуд — $\beta = 1/K$;
баланс фаз — $\varphi_{вых} + \varphi_{вх} = 0$,
где $\varphi_{вых}$ — фаза напряжения на контуре; $\varphi_{вх}$ — фаза напряжения на базе.

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: $L_к$ или $C_к$.

Генераторы с параллельным *LC*-контуром нашли применение в высокочастотных цепях.

6.11.3. *RC*-генераторы

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 положительная ОС, т. е. такая связь, у которой коэффициент ОС β и фаза сигнала φ 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° и ослабляющий сигнал в β раз (рис. 6.39, *б*). Таковым может быть, например, фильтр, состоящий из спаренных резисторов *R1* и *R2* ($R_1 = R_2$) и конденсаторов *C1* и *C2* ($C_1 = C_2$). Он получил название мост Вина. На некоторой частоте $f_0 = 1/(2\pi RC)$ (резонансной) коэффициент β имеет максимальное значение ($\beta = {}^1/_3$), а $\varphi_{вых} + \varphi_{вх} = 0$.

На других частотах, отличных от f_0, коэффициент β резко падает, а фаза φ 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_0. Это можно сделать, например, за счет одновременного изменения сопротивлений резисторов *R1* и *R2*.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что собой представляют и для чего предназначены электронные генераторы? Дайте их классификацию.
2. Поясните принцип получения незатухающих колебаний в *LC*-генераторе.
3. Какие условия должны быть выполнены для получения гармонических колебаний в *RC*-генераторе?
4. Чем определяется частота колебаний?

6.12. ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

6.12.1. 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 положен заряд и разряд конденсаторов схемы. Данные генераторы называются релаксационными.

В качестве генератора колебаний *пилообразной формы* может быть использована схема, состоящая из транзистора *T* с

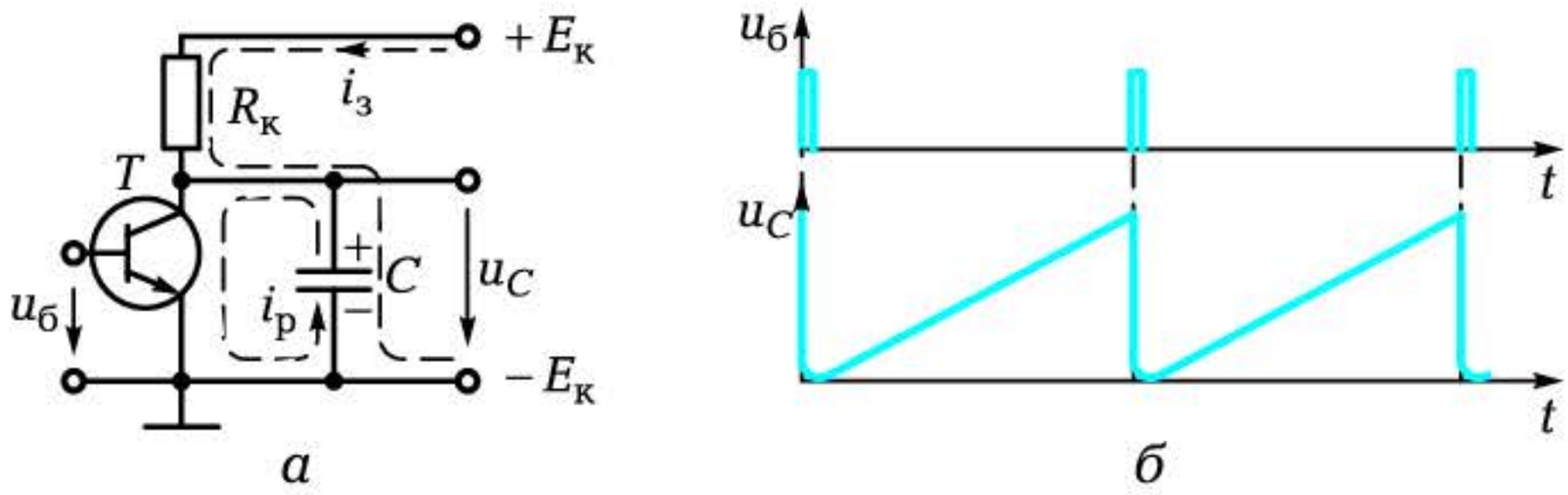


Рис. 6.40. Генератор пилообразного напряжения:

а — электрическая схема; б — временны́е диаграммы напряжений

коллекторной нагрузкой $R_к$ и конденсатора C, включенного между коллектором и эмиттером транзистора (рис. 6.40, *а*).

В исходном состоянии транзистор T закрыт и конденсатор C заряжается током $i_з$ от источника $E_к$ по цепи «$+E_к$» — $R_к$ — C — «$-E_к$». Напряжение на конденсаторе растет плавно по экспоненте, стремясь к максимальной величине — напряжению источника питания. В момент прихода на базу положительного импульса транзистор открывается и конденсатор C практически мгновенно разряжается ($i_р$) через малое сопротивление открытого транзистора. После окончания действия положительного импульса транзистор вновь закрывается и начинается заряд конденсатора C (рис. 6.40, *б*).

Наиболее широкое применение генераторы пилообразного напряжения, называемые также генераторами линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН), нашли в электронно-лучевых осциллографах для перемещения электронного луча по горизонтали и быстрого его возврата в исходное положение (горизонтальная развертка). Они применяются также в аналого-цифровых преобразователях, схемах широтно-импульсной модуляции и т. д.

6.12.2. 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, т. е. является прямоугольным. На рис. 6.41 изображена результирующая колебаний лишь для трех гармоник, из которой видно, что даже в этом случае сигнал приближается к прямоугольному.

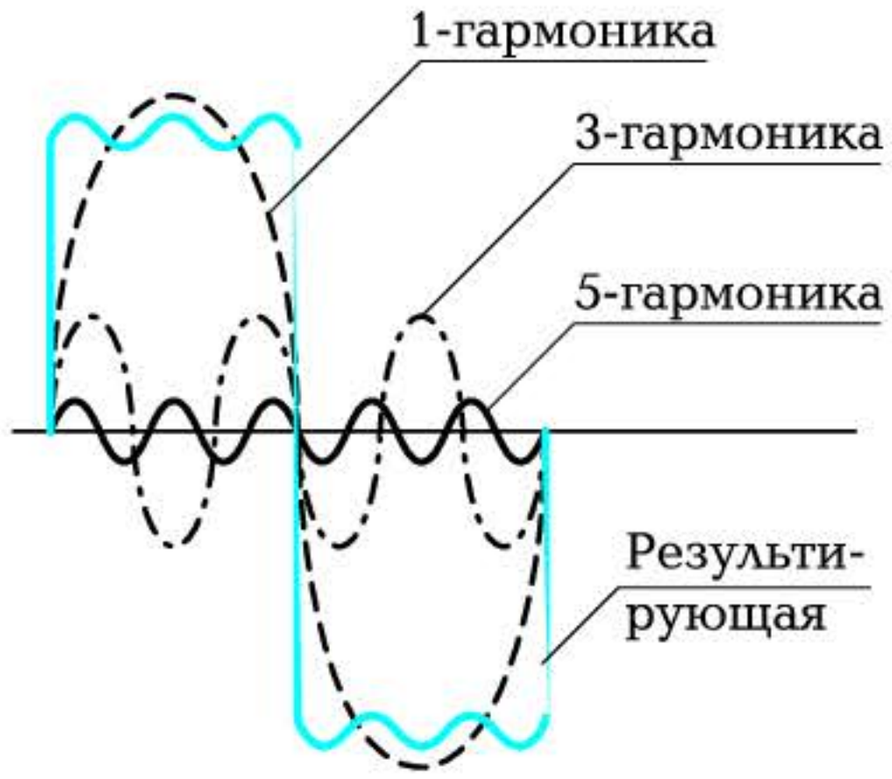


Рис. 6.41. Гармонические составляющие прямоугольного сигнала

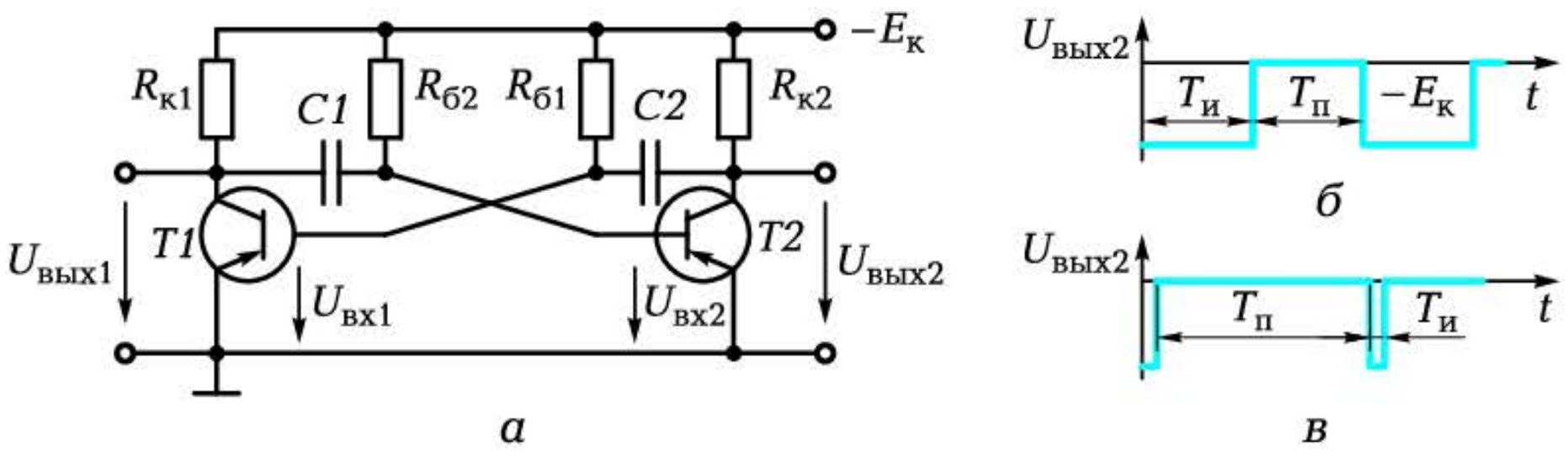


Рис. 6.42. Мультивибратор:

а — электрическая схема; *б*, *в* — временны́е диаграммы соответственно для симметричной и несимметричной схем

В основу действия мультивибратора положен двухкаскадный усилитель со 100%-й положительной обратной *RC*-связью (выходное напряжение полностью приложено к его входу). Напряжение $U_{вых1}$ подводится через *C1* к базе *T2*, а $U_{вых2}$ — через *C2* к базе *T1*. Транзисторы *T1* и *T2* работают в противофазе: если *T1* открыт, то *T2* закрыт, и наоборот (рис. 6.42, *а*).

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 $R_б$. Изменяя *C* и $R_б$, можно менять частоту колебаний в широких пределах.

Если $C_1 = C_2$, $R_{б1} = R_{б2}$, $R_{к1} = R_{к2}$ и транзисторы идентичны, то на выходе мультивибратора будут симметричные импульсы (рис. 6.42, *б*), при которых длительности импульса и паузы равны ($T_и = T_п$). Такой мультивибратор называется *симметричным*. Период

колебаний $T = T_и + T_п$ можно приближенно определить как $T = 0{,}7R_{б1}C_1 + 0{,}7R_{б2}C_2$. Если необходимо получение коротких импульсов, следующих с большим промежутком (рис. 6.42, *в*), то используется *несимметричный* мультивибратор, у которого $C_1 \neq C_2$ или $R_{б1} \neq R_{б2}$. Отношение периода колебаний к длительности импульса $\gamma_и = T/T_и$ называется *скважностью*.

6.12.3. Электронное реле (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. 6.43, *а*).

В основу триггера положен двухкаскадный усилитель с положительной ОС (как и в мультивибраторе, но здесь отсутствует заряд-разряд емкостей). Переход из одного состояния в другое происходит под действием внешних запускающих импульсов. В нашем случае ими являются отрицательные импульсы, поступающие через диоды *Д1* и *Д2* на базы транзисторов *Т1* и *Т2*. Пусть *Т1* открыт, а *Т2* закрыт. Отрицательный импульс через *Д2* не действует на *Т2* (он и так закрыт), а через *Д1* поступает на базу, *Т1* и закрывает его. Коллекторный ток уменьшается, и растет положительное напряжение на коллекторе *Т1*, которое поступает на базу транзистора *Т2* и открывает его. Появляется коллек-

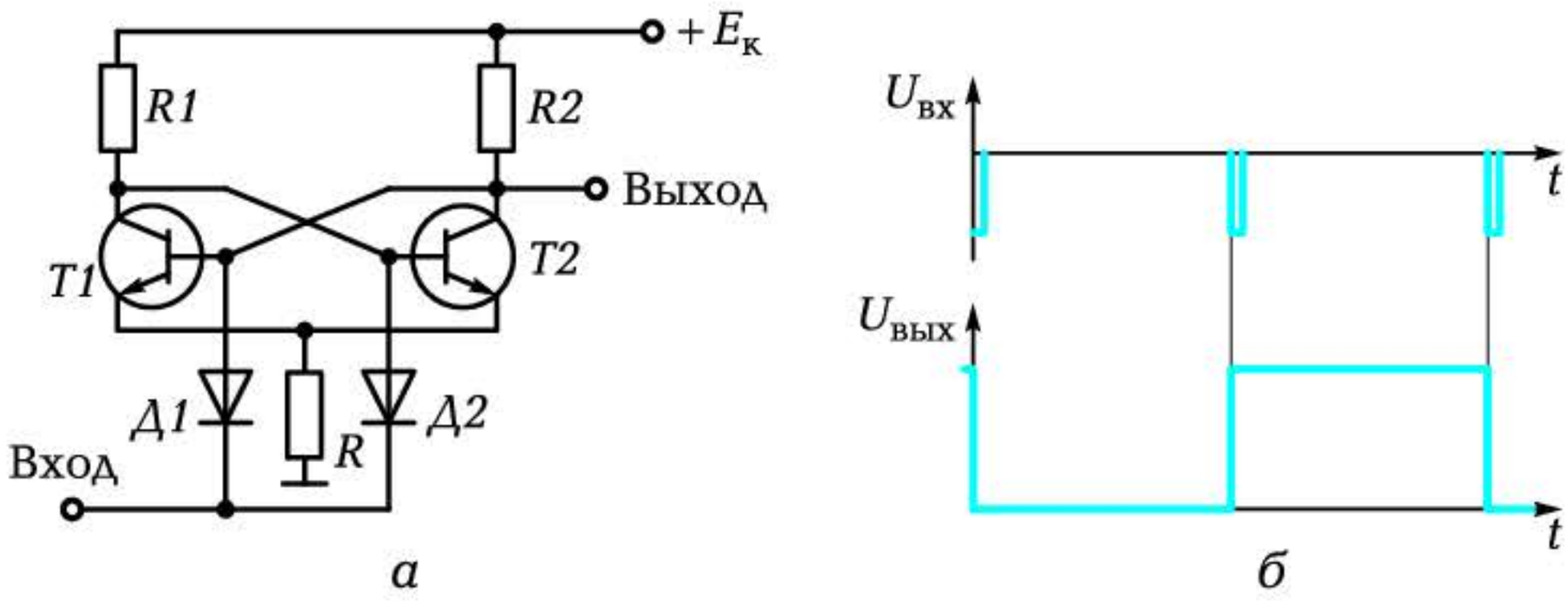


Рис. 6.43. Триггер:

а — электрическая схема; *б* — временны́е диаграммы напряжений на входе и выходе

торный ток в транзисторе *T2*, и напряжение на коллекторе уменьшается, поступая на базу *T1* в фазе с запускающим импульсом (положительная ОС). Процесс перехода транзисторов *T1* и *T2* из одного устойчивого состояния равновесия в другое осуществляется практически мгновенно. Это позволяет получать на выходе триггера практически прямоугольные импульсы (рис. 6.43, *б*).

Триггеры используют также для подсчета импульсов, для осуществления логических и арифметических операций в вычислительных машинах, в качестве устройств памяти и т. д.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие генераторы называются релаксационными и на каком принципе построена их работа?
2. Поясните принцип работы ГЛИНа.
3. Поясните принцип работы мультивибратора.
4. Изобразите схему триггера и поясните принцип его работы.
5. Где нашли применение триггеры?

Глава 7

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ. НАЗНАЧЕНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

7.1.1. Основные понятия и определения

Под электрическими машинами (ЭМ) будем понимать электромагнитные механизмы и 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 — основной вид источников механической энергии.

В начале XX в. были созданы все основные виды ЭМ, разработаны основы их теории. Сегодня идет их совершенствование.

Если в начале прошлого века мощность генератора не превышала 5 МВт, то сегодня успешно эксплуатируется генератор мощностью в 1 000 МВт (Курская АЭС). Имеется возможность получения мощности в 5 000 МВт при использовании криогенной техники и явления сверхпроводимости. Совершенствуются и трансформаторы — необходимые устройства в системе передачи энергии. Если в начале прошлого века их напряжение не превышало 50 кВ, то сегодня $U = 1\,500$ кВ, а мощность возросла до 3 000 МВ · А.

Несмотря на огромную разницу в мощности и частоте вращения все ЭМ можно подразделить на два типа:

- постоянного тока;
- переменного тока, в том числе трансформаторы.

7.1.2. Принципы, положенные в основу работы электрических машин

В основу работы любой электрической машины положены два принципа:

принцип электромагнитной индукции: если проводник длиной *l* перемещать со скоростью *v* в магнитном поле с индукцией *B*, то в проводнике индуцируется ЭДС (формула Фарадея)

$$e = lBv;$$

принцип электромагнитных сил: если проводник длиной *l* с током *i* поместить в магнитное поле с индукцией *B*, то на него действует электромагнитная сила (формула Ампера)

$$F_{эм} = lBi.$$

Первый принцип положен в основу работы генератора. При этом направление ЭДС определяется правилом правой руки (*гене-ратоР — пРавая* рука), которое гласит: если ладонь расположить так, чтобы силовые линии входили в нее, 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 правилом левой руки (*двигателЬ — Левая* рука), формулируемым если ладонь расположить так, чтобы силовые линии входили в нее, а вытянутые четыре пальца указывали направление тока в проводнике, то отогнутый большой палец укажет направление силы.

Электрическая мощность *ei* может быть преобразована в механическую:

$$ei = (Blv) \cdot (F_{эм}/(Bl)) = F_{эм}v.$$

В свою очередь, механическая мощность $F_{эм}v$ может быть преобразована в электрическую:

$$F_{эм}v = (iBl) \cdot (e/(Bl)) = ie.$$

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 относительное перемещение проводников и магнитного поля.

Конструктивно ЭМ состоят из двух основных частей:
неподвижного статора;
подвижного ротора.
Обе части машины, как правило, несут на себе обмотки. У трансформатора подвижная часть — ротор — отсутствует.

7.1.3. Назначение и конструктивная схема трансформатора

Трансформатор — это статический (без подвижных частей) электромагнитный аппарат, который служит для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения.

При этом основное назначение трансформатора — передача электрической мощности от источника к потребителю.

В основе работы трансформатора лежит явление взаимоиндукции, т. е. возможность передачи энергии с помощью электромагнитного поля от одной обмотки к другой. Конструктивные схемы трансформаторов различны, но все они имеют (рис. 7.1, *а*):

- магнитопровод *1*, в качестве которого используются ферромагнитные материалы (трансформаторное железо, электротехническая листовая сталь или ферриты). Слу-

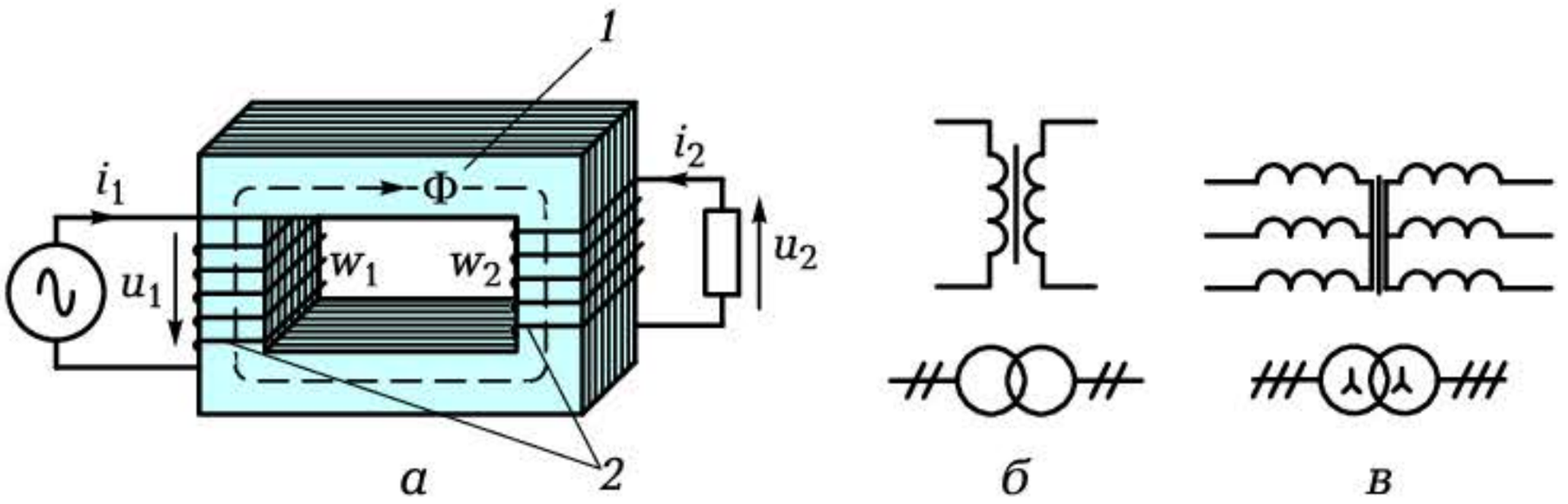


Рис. 7.1. Трансформаторы:

а — конструктивная схема; *б* — условное графическое обозначение однофазного трансформатора; *в* — условное графическое обозначение трехфазного трансформатора; *1* — магнитопровод; *2* — обмотки

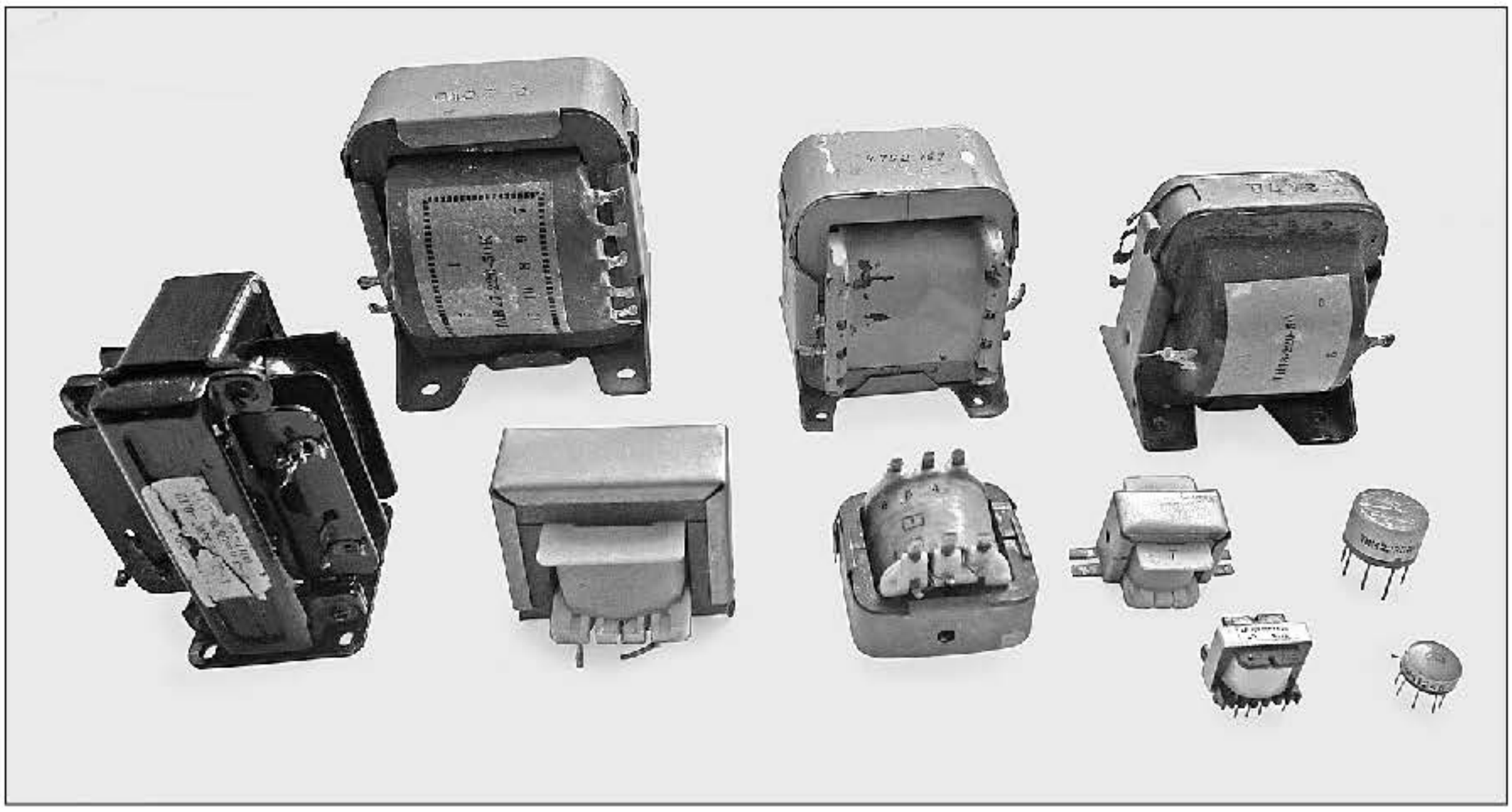


Рис. 7.2. Трансформаторы, используемые в радиотехнике

жит для усиления магнитной связи между обмотками за счет уменьшения магнитного сопротивления;

- обмотки *2* (две и более), выполняемые изолированным проводом, располагаемые на магнитопроводе и сцепленные общим магнитным потоком.

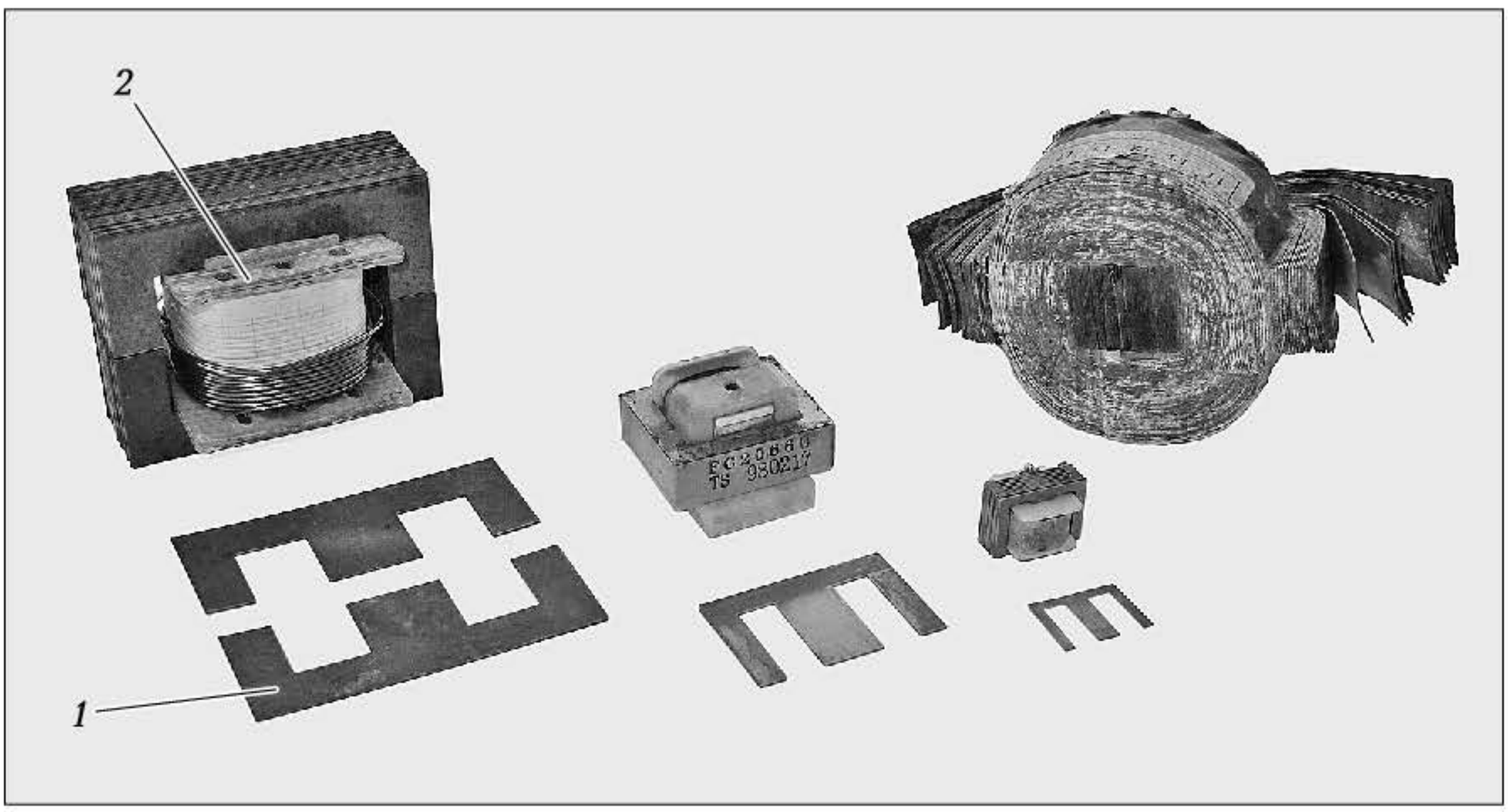


Рис. 7.3. Составляющие трансформатора:
1 — пластины; *2* — катушка с обмоткой

На рис. 7.2 приведен 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: для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод изготовляется из отдельных электрически изолированных пластин *1* — рис. 7.3).

Первичная обмотка w_1 подключается к генератору, а вторичная w_2 — к нагрузке. Если напряжение на w_2 выше, чем на w_1, то трансформатор называется повышающим, если ниже, то — понижающим.

В системе электропередачи трансформаторы являются необходимым элементом. Без трансформатора практически невозможна передача энергии большой мощности на дальние расстояния, что обусловлено значительными потерями в линии электропередач (ЛЭП) при низких напряжениях. Мощность потерь определяется по формуле в виде

$$P_{\text{п}} = I^2 R_{\text{ЛЭП}} = I^2 \rho l / s_{\text{пр}} = (S^2 / U^2) \cdot (\rho l U j / S) = S l \rho j / U,$$

где S — полная мощность, В · А; l — длина ЛЭП, м; ρ — удельное электрическое сопротивление материала ЛЭП (для алюминия 0,029 Ом · мм^2/м); $s_{\text{пр}}$ — площадь сечения провода ЛЭП, мм^2; j — плотность тока, А/мм^2.

Проведем расчет мощности потерь.

Мощность источника 1 000 МВ · А необходимо передать на расстояние 500 км. Если передача идет при напряжении 250 кВ, то потери в алюминиевом проводе ЛЭП при плотности тока 2 А/мм^2 составят около 120 МВт, т. е. 12 % передаваемой мощности. Если повысить напряжение до 1 000 кВ, то потери снизятся до 30 МВт, что составит менее 5 % передаваемой мощности. Это считается вполне допустимым.

Таким образом, мощность потерь $P_{\text{п}}$ в ЛЭП обратно пропорциональна величине передаваемого напряжения U.

Чем выше напряжение, тем меньше потери в ЛЭП.

Площадь сечения проводов также обратно пропорциональна напряжению:

$$s_{\text{пр}} = \kappa_2 / U.$$

Чем выше напряжение, тем меньше сечение проводов, которые могут быть использованы для передачи этого напряжения.

По назначению трансформаторы подразделяются следующим образом:

- силовые;
- специального назначения (автотрансформаторы, измерительные, сварочные).

Силовые трансформаторы могут быть однофазными и трехфазными, повышающими и понижающими.

Условное графическое изображение однофазного трансформатора приведено на рис. 7.1, *б*, трехфазного — на рис. 7.1, *в*. Нижние два изображения на этих рисунках используются в схемах с большим числом трансформаторов, например в схемах передачи и распределения электрической энергии, в схемах трансформаторных подстанций.

Основные параметры трансформатора, указываемые в паспортных данных или на щитке:

полная (кажущаяся) мощность, $В \cdot А$ или $кВ \cdot А$;

линейные токи, А;

линейные напряжения, В или кВ;

частота, Гц.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение электрических машин.
2. Какие принципы положены в основу работы электрических машин?
3. Как определить направление ЭДС в генераторе и электромагнитной силы в электродвигателе?
4. Дайте определение трансформатора.
5. Изобразите конструктивную схему трансформатора и приведите его условное графическое изображение.

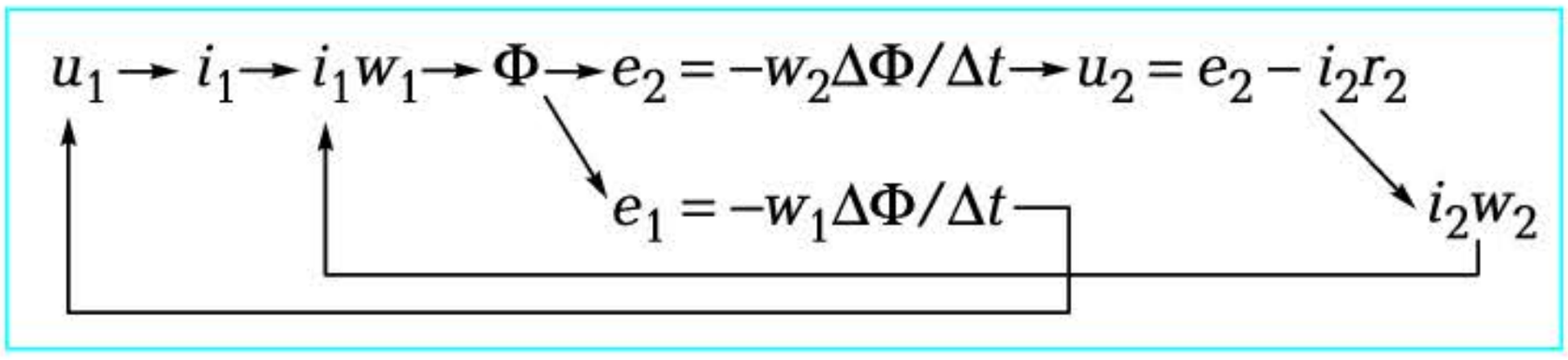
7.2. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ В ОДНОФАЗНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ. ПОТЕРИ И КПД ТРАНСФОРМАТОРА

7.2.1. Принцип действия трансформатора

В основу работы трансформатора положен принцип электромагнитной индукции.

Если к первичной обмотке w_1 подвести переменное синусоидальное напряжение u_1, то по обмотке начинает течь ток i_1, который создает намагничивающую силу (н.с.) i_1w_1. Под действием н.с. в сердечнике возникает переменный магнитный поток Φ. Под действием синусоидального потока Φ в первичной обмотке наводится ЭДС самоиндукции $e_1 = -w_1\Delta\Phi/\Delta t$, стремящаяся уравновесить приложенное напряжение u_1, а во вторичной — ЭДС взаимоиндукции $e_2 = -w_2\Delta\Phi/\Delta t$. Именно эта ЭДС является причиной появления на нагрузке напряжения $u_2 = e_2 - i_2r_2$, где r_2 — активное сопротивление обмотки w_2; i_2 — ток во вторичной обмотке w_2.

Сказанное ранее можно выразить в виде следующей схемы:



Результирующий магнитный поток в сердечнике при работе трансформатора под нагрузкой определяется совместным действием н.с. первичной и вторичной обмоток, равной $i_1w_1 - i_2w_2$, а на холостом ходу — н.с. только первичной обмотки i_0w_1, где i_0 — ток холостого тока трансформатора.

7.2.2. Уравнение напряжений и коэффициент трансформации

В реальном трансформаторе наряду с основным рабочим потоком Φ, сцепленным с обмотками w_1 и w_2, образуются потоки рассеяния $\Phi_{\sigma1}$ и $\Phi_{\sigma2}$, сцепленные каждый со своей обмоткой. Эти потоки создают ЭДС $e_{\sigma1}$ и $e_{\sigma2}$ (рис. 7.4, *а*).

Протекающие в обмотках токи создают падения напряжения на активных сопротивлениях обмоток i_1r_1 и i_2r_2.

Уравнения напряжений трансформатора для первичной и вторичной обмоток, записанные в соответствии со вторым законом Кирхгофа, имеют вид

$$u_1 = -e_1 - e_{\sigma1} + i_1r_1;$$

$$u_2 = e_2 + e_{\sigma2} - i_2r_2.$$

Если пренебречь потоками рассеяния ($\Phi_б = 0$) и падением напряжения на активных сопротивлениях (они составляют не более 10 %), то уравнения напряжений трансформатора (называемого в данном случае *идеальным*) можно записать так:

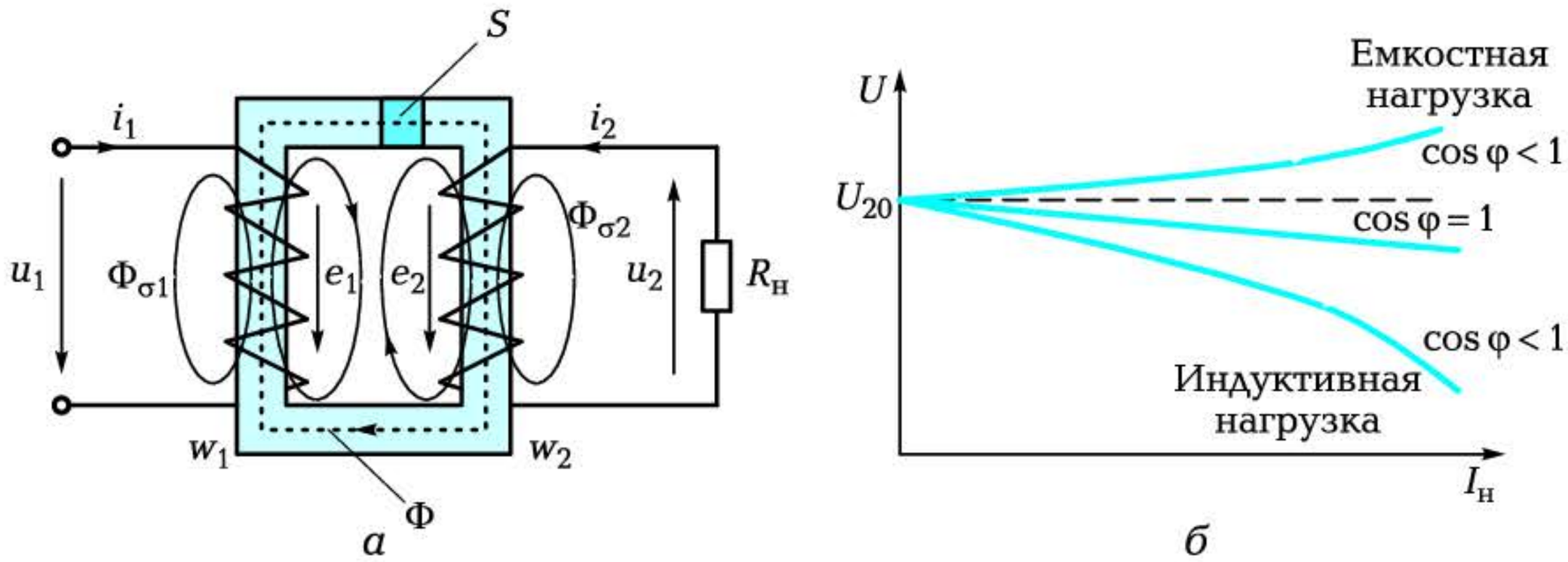


Рис. 7.4. Трансформатор:

а — схема к анализу уравнений напряжений; *б* — внешние характеристики

$$u_1 = -e_1 = w_1 \Delta\Phi/\Delta t;$$

$$u_2 = e_2 = -w_2 \Delta\Phi/\Delta t.$$

Трансформатор можно рассматривать как четырехполюсник с двумя входными и двумя выходными зажимами.

Отношение напряжения на вторичной обмотке u_2 к напряжению на первичной обмотке u_1 называют *коэффициентом трансформации*

$$\kappa_{21} = u_2/u_1 = e_2/e_1 = w_2/w_1.$$

Он равен отношению чисел витков вторичной и первичной обмоток. Если $w_2 > w_1$, то $\kappa_{21} > 1$ и трансформатор называется повышающим, т. е. $u_2 > u_1$. Если $w_2 < w_1$, то $\kappa_{21} < 1$ и трансформатор называется понижающим, т. е. $u_2 < u_1$.

При синусоидальном магнитном потоке Φ наводимые ЭДС e_1 и e_2 также синусоидальны, но сдвинуты по фазе относительно потока на 90°, так как определяются скоростью изменения потока $\Delta\Phi/\Delta t$:

$$e_1 = E_{1m} \sin(2\pi f - 90°);$$

$$e_2 = E_{2m} \sin(2\pi f - 90°),$$

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

$$U = 4{,}44\, wf\Phi_m.$$

Величина приложенного к первичной обмотке w_1 напряжения U_1 определяет амплитуду магнитного потока Φ_m. Причем величина потока при неизменном приложенном напряжении остается неизменной при всех режимах работы трансформатора — от холостого хода до номинальной нагрузки:

при $f = 50$ Гц $\Phi_m = 0{,}0045\, U_1/w_1$, а при $U_1 = 220$ В $\Phi_m \approx 1/w_1$.

Мгновенные значения токов, как и напряжений, также связаны коэффициентом трансформации, но в обратно пропорциональной зависимости:

$$\kappa_{21} = u_2/u_1 = (S/i_2)/(S/i_1) = i_1/i_2.$$

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 передаваемого напряжения позволяет снизить величину передаваемого по проводам тока, а значит, потери 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. Как будет показано далее, он расходуется на магнитные потери. Включение нагрузки во вторичную обмотку вызывает появление тока i_2, что ведет к увеличению тока i_1 в первичной обмотке.

7.2.3. Потери и КПД

При работе под нагрузкой трансформатор передает мощность от первичной обмотки к нагрузке не полностью. Часть ее расходуется необратимо. Это, в первую очередь, потери электрические, связанные с нагревом первичной (теряется мощность $P_{э1}$) и вторичной ($P_{э2}$) обмоток, и потери магнитные ($P_м$), расходуемые на вихревые токи и гистерезис (перемагничивание сердечника):

$$P_2 = P_1 - (P_{э1} + P_{э2} + P_м),$$

где P_2 — мощность нагрузки; P_1 — мощность в первичной обмотке.

Среди ЭМ трансформатор обладает наивысшим КПД (86...99 %), поскольку у него отсутствуют механические потери,

связанные с дополнительными преобразованиями энергии из магнитной в механическую.

Расчет и определение КПД трансформатора ведут косвенными методами, связанными с определением суммарных потерь ($\sum P_{\text{п}}$).

В основу этих методов положены опыты холостого хода (ХХ) (рис. 7.5, *а*) и короткого замыкания (КЗ) (рис. 7.5, *б*), в процессе которых могут быть определены магнитные $P_{\text{м}}$ и электрические $P_{\text{э1}}$ и $P_{\text{э2}}$ потери.

Опыт холостого хода. Проводится при номинальном напряжении на первичной обмотке и разомкнутой вторичной обмотке.

Поскольку при ХХ $I_2 = 0$, то полезная мощность $P_2 = 0$. Входная мощность $P_1 = P_{\text{ХХ}}$ расходуется на потери в магнитопроводе ($P_{\text{м}}$) и потери в меди ($P_{\text{э1}}$). Ток ХХ I_{10} мал и составляет 2...10 % номинального тока $I_{\text{ном}}$, поэтому потерями в меди можно пренебречь. В то же время магнитный поток в сердечнике номинален, а следовательно, номинальны магнитные потери и можно считать, что вся мощность при ХХ представляет собой магнитные потери ($P_{\text{м}} = P_{\text{ХХ}}$). Эту мощность можно измерить ваттметром по схеме, приведенной на рис. 7.5, *а*.

Опыт короткого замыкания. Проводится при номинальных токах в обмотках и пониженном напряжении на первичной обмотке.

Если $U_1 = U_{1\,\text{ном}}$, то $I_2 = (10...20)I_{2\,\text{ном}}$, т. е. имеет место аварийный режим; если $I_2 = I_{2\,\text{ном}}$, то $U_1 = U_{\text{КЗ}} = (0{,}05...0{,}1)U_{1\,\text{ном}}$. Именно при этих значениях напряжения и тока проводится опыт КЗ.

Так как по обмоткам течет номинальный ток, то и электрические потери номинальные. Поскольку прикладываемое к первичной обмотке напряжение мало, то и магнитный поток Ф мал, в связи с чем магнитными потерями можно пренебречь. Можно

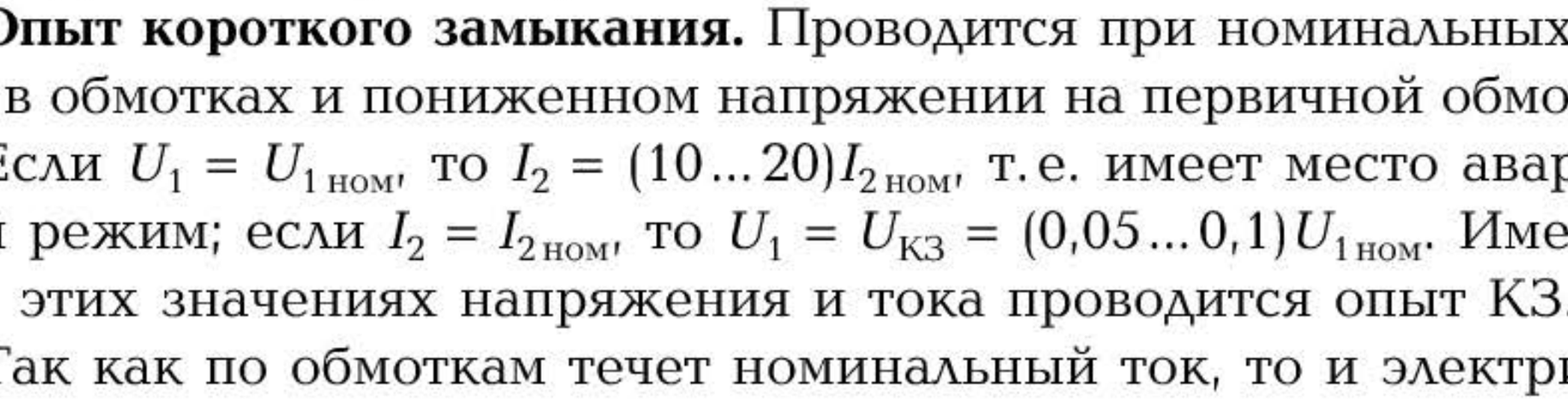


Рис. 7.5. Схемы измерения потерь в трансформаторе:
а — опыт холостого хода; *б* — опыт короткого замыкания

считать, что измеренные ваттметром в опыте КЗ потери есть потери электрические ($P_{КЗ} = P_{эл\,1} + P_{эл\,2}$).

Таким образом, полученные в результате опытов холостого хода и короткого замыкания показания ваттметров позволяют вычислить КПД трансформатора:

$$\eta = P_2/P_1 = 1 - (P_{XX} + P_{КЗ})/P_1.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой принцип лежит в основе работы трансформатора?
2. Поясните принцип действия трансформатора.
3. Поясните, что собой представляет коэффициент трансформации, и назовите определяющие его параметры.
4. Чем определяется амплитуда магнитного потока в магнитопроводе трансформатора?
5. Назовите виды основных потерь в трансформаторе и способы их уменьшения.
6. Укажите способы измерения потерь в трансформаторе.
7. Как вычислить КПД трансформатора?

7.3. ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАНСФОРМАТОРА. ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ, ТРАНСФОРМАТОРЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

7.3.1. Внешняя характеристика трансформатора

Внешняя характеристика трансформатора отражает зависимость напряжения на нагрузке U_2 от тока нагрузки I_2 и снимается при постоянном напряжении на первичной обмотке (U_1 = = const) и неизменном характере нагрузки ($\cos\varphi = \text{const}$).

Вид внешней характеристики существенно зависит от характера нагрузки (рис. 7.4, *б*). При чисто активной нагрузке (лампа накаливания, нагреватель) $\cos\varphi = 1$, внешняя характеристика слегка падающая, что объясняется увеличением падения напряжения на активном сопротивлении обмоток. Для индуктивной нагрузки

$\cos\varphi < 1$ (дроссель, сварочный трансформатор, электрический двигатель), напряжение может падать при увеличении тока довольно резко, так как индуктивная составляющая тока размагничивает сердечник. Для емкостной нагрузки $\cos\varphi < 1$ (синхронная машина в режиме компенсатора, батарея конденсаторов), напряжение при увеличении тока может расти, так как емкостная составляющая тока подмагничивает сердечник.

Изменение вторичного напряжения принято выражать в процентах от номинального напряжения:

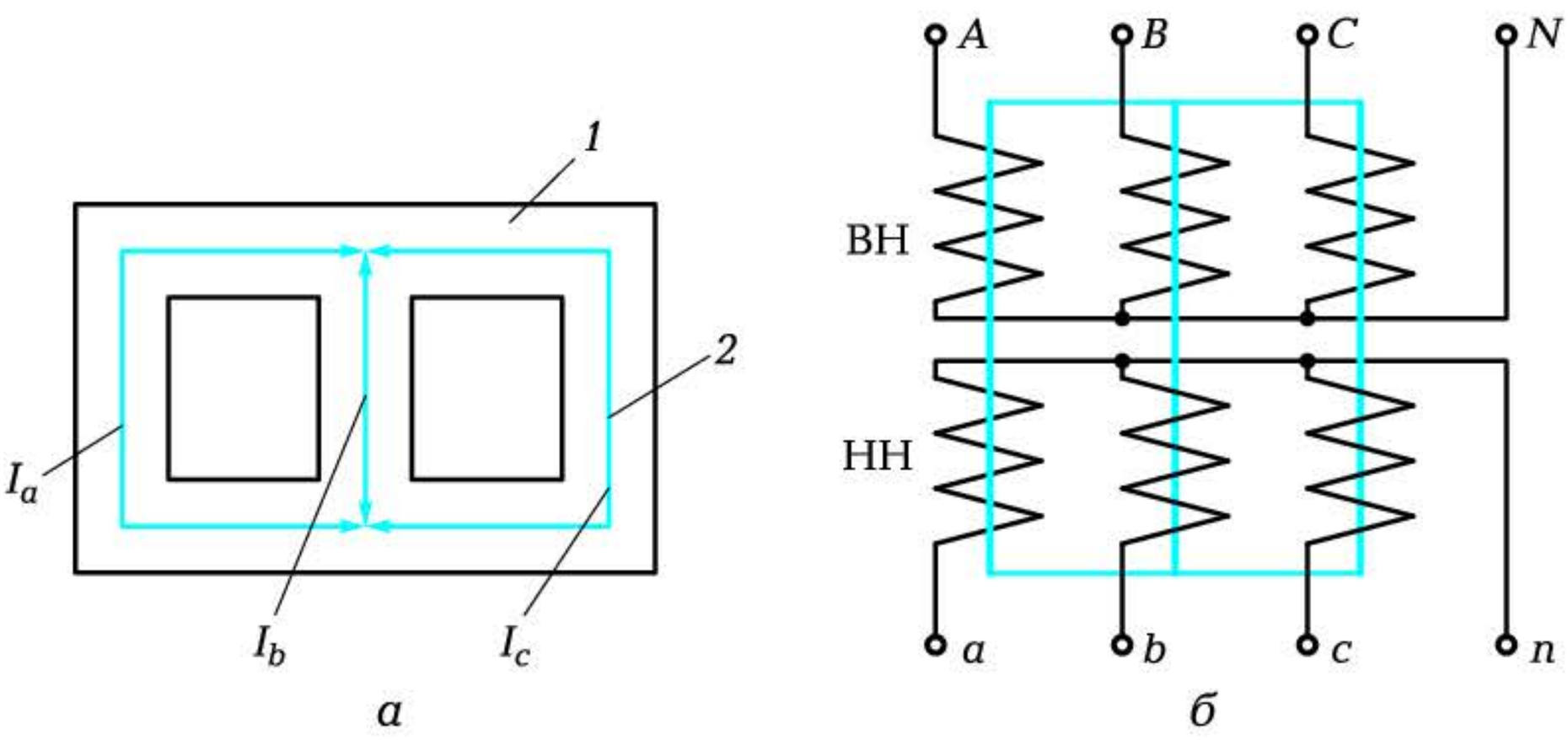
$$\Delta U = \frac{(U_{20} - U_{2\,\text{ном}})}{U_{20}} \cdot 100,$$

где U_{20}, $U_{2\,\text{ном}}$ — напряжение на вторичной обмотке соответственно при холостом ходе и при номинальной нагрузке.

7.3.2. Трехфазные трансформаторы

Для трансформирования трехфазного напряжения могут быть использованы три однофазных трансформатора, однако в целях экономии материала применяют один трехстержневой трансформатор с несимметричной магнитной цепью (рис. 7.6, *а*).

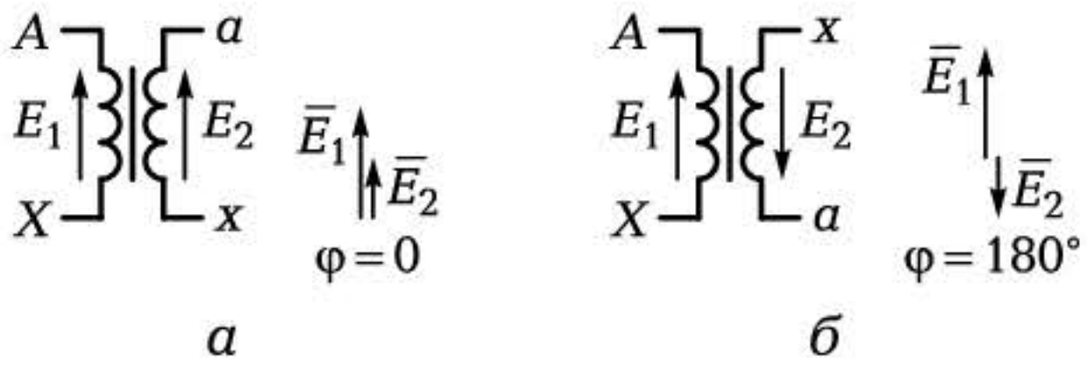
Для симметрирования увеличивают площадь сечения ярма *1* на 15...20 % по отношению к площади сечения стержней *2*. Это позволяет расчеты и анализ трехфазного трансформатора вести для одной фазы.



а *б*

Рис. 7.6. Схемы трехфазного трансформатора:

а — магнитопровода; *б* — соединения обмоток звездой; *1* — ярмо; *2* — стержень



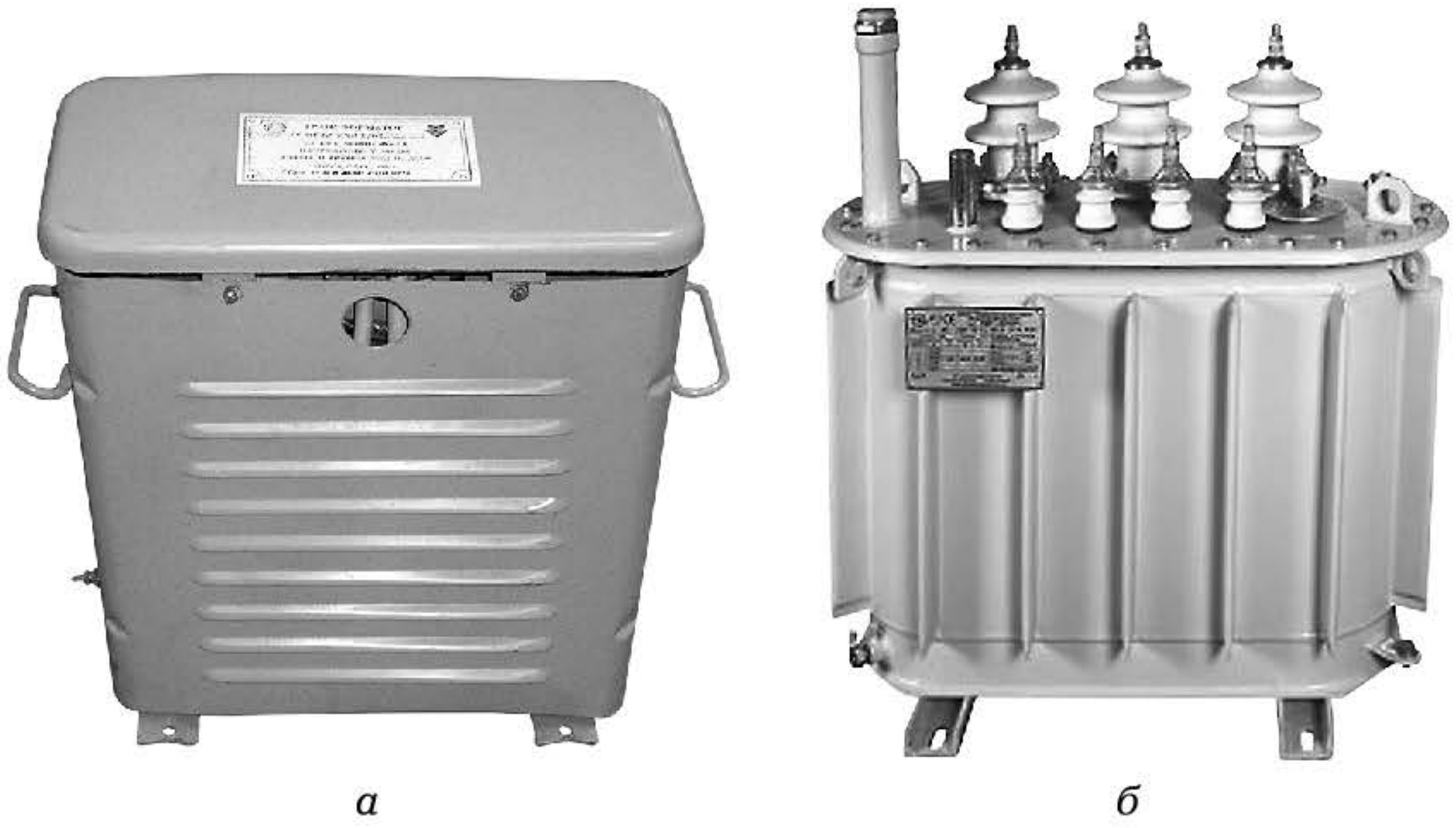
а *б*

Рис. 7.7. Группы соединений однофазного трансформатора:
а — нулевая; *б* — шестая

Обмотки высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений и каждой фазы располагаются на своих стержнях, и могут быть соединены звездой (рис. 7.6, *б*) или треугольником. Схему соединения обмоток трехфазного трансформатора определяют дробью: в числителе — схема соединения обмоток ВН, в знаменателе — схема соединения обмоток НН.

В трехфазных трансформаторах коэффициент трансформации линейных напряжений зависит от схемы соединения обмоток. Так, для звезды $U_л = \sqrt{3}\, U_ф$, а для треугольника $U_л = U_ф$. Поэтому в трехфазных трансформаторах говорят о коэффициенте трансформации фазных напряжений:

$$K_ф = U_{ф2} / U_{ф1} = w_{ф2} / w_{ф1}.$$



а *б*

Рис. 7.8. Трехфазные трансформаторы:
а — сухой; *б* — масляный

При включении нескольких трансформаторов в параллельную работу наряду со схемой соединения обмоток следует учитывать *группу соединения обмоток*, определяющую угол смещения векторов линейных ЭДС обмоток ВН и НН.

Для однофазного трансформатора государственным стандартом разрешена к применению лишь нулевая группа (рис. 7.7, *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°. Такой трансформатор относится к шестой группе (рис. 7.7, *б*). Номер группы определяется делением угла сдвига фаз на 30° (6 = 180°/30°).

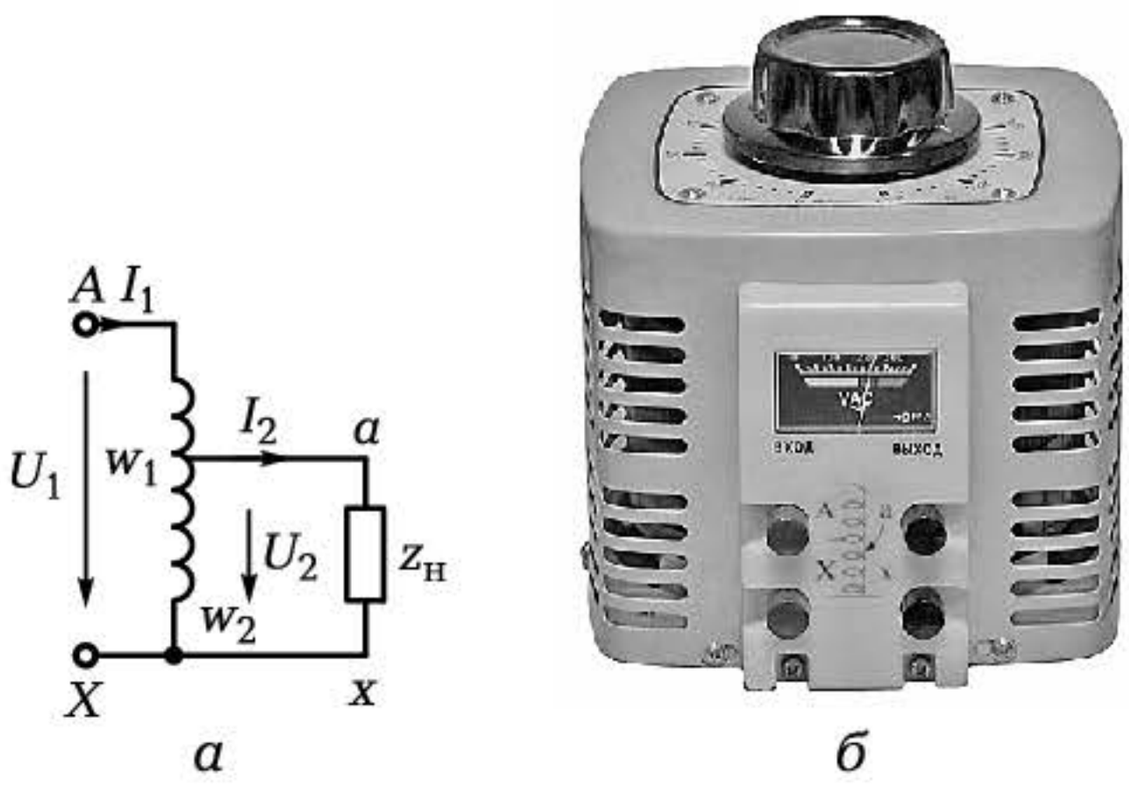
Для трехфазного трансформатора существуют 12 групп соединений, но государственным стандартом разрешены к применению лишь две: нулевая и одиннадцатая.

На рис. 7.8, *а* приведен внешний вид трехфазного сухого трансформатора со следующими параметрами: $S = 2$ кВ·А, $U_1 = 220$ В, $U_2 = 36$ В. На рис. 7.8, *б* показан масляный трансформатор с гофрированным баком ТМГ-25 мощностью 25 кВ·А.

7.3.3. Автотрансформатор

Автотрансформатор (рис. 7.9) имеет лишь одну обмотку с отводом, т. е. вторичная обмотка w_2 (НН) является частью первичной обмотки w_1 (ВН).

Таким образом, коэффициент трансформации автотрансфоратора $к_а$ всегда меньше единицы: $к_а = w_2/w_1 = U_2/U_1$, поэтому такой трансформатор всегда является понижающим.



а *б*

Рис. 7.9. Лабораторный автотрансформатор:
а — схема включения; *б* — внешний вид

Широкое применение автотрансформаторы нашли в качестве регуляторов напряжения. При этом регулирование может осуществляться плавно и дискретно.

В лабораторных условиях для регулирования напряжения питания электрических схем часто применяется лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) (рис. 7.9, *б*).

7.3.4. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы служат для преобразования тока и напряжения в величины, удобные для измерения стандартными приборами, и повышения при этом безопасности работы.

Трансформатор напряжения (ТН) — это понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации k, равным 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.

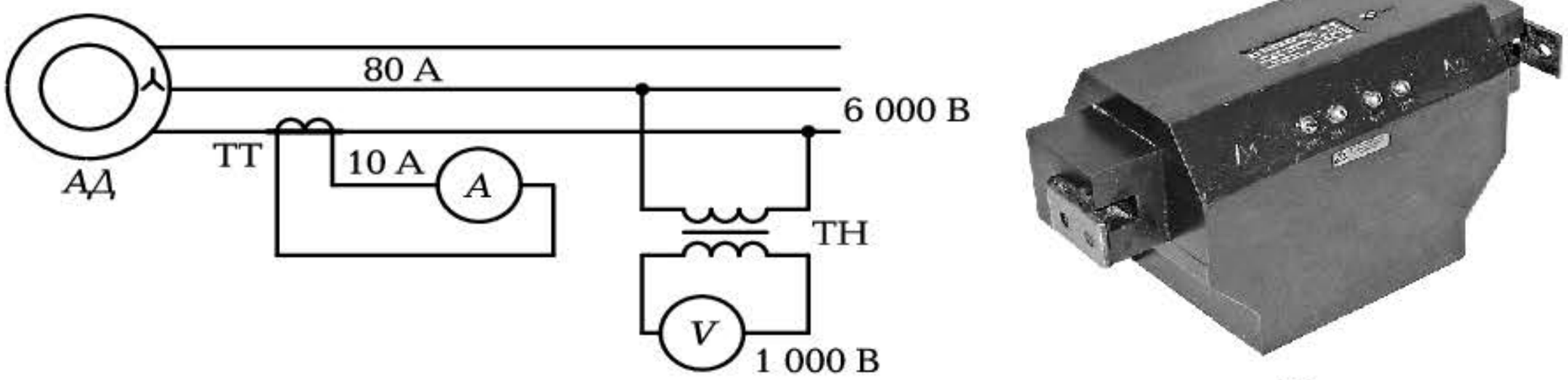
Трансформатор тока (ТТ) — это повышающий трансформатор по напряжению с коэффициентом трансформации k, равным 10, 100 и более. Следовательно, по току этот трансформатор является понижающим. Его первичная обмотка имеет один — три витка и включается в измерительную цепь последовательно с нагрузкой. Во вторичную обмотку 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 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. 7.10, *а* приведена схема включения в цепь мощного высоковольтного асинхронного двигателя *АД* стандартных измерительных приборов с использованием измерительных трансформаторов. Двигатель включен звездой, питается линейным напряжением $U_л = 6\,000$ В и имеет номинальный ток 80 А. Измерительная лаборатория располагает вольтметром на 1 000 В и ампермет-



а *б*

Рис. 7.10. Измерительные трансформаторы тока и напряжения:

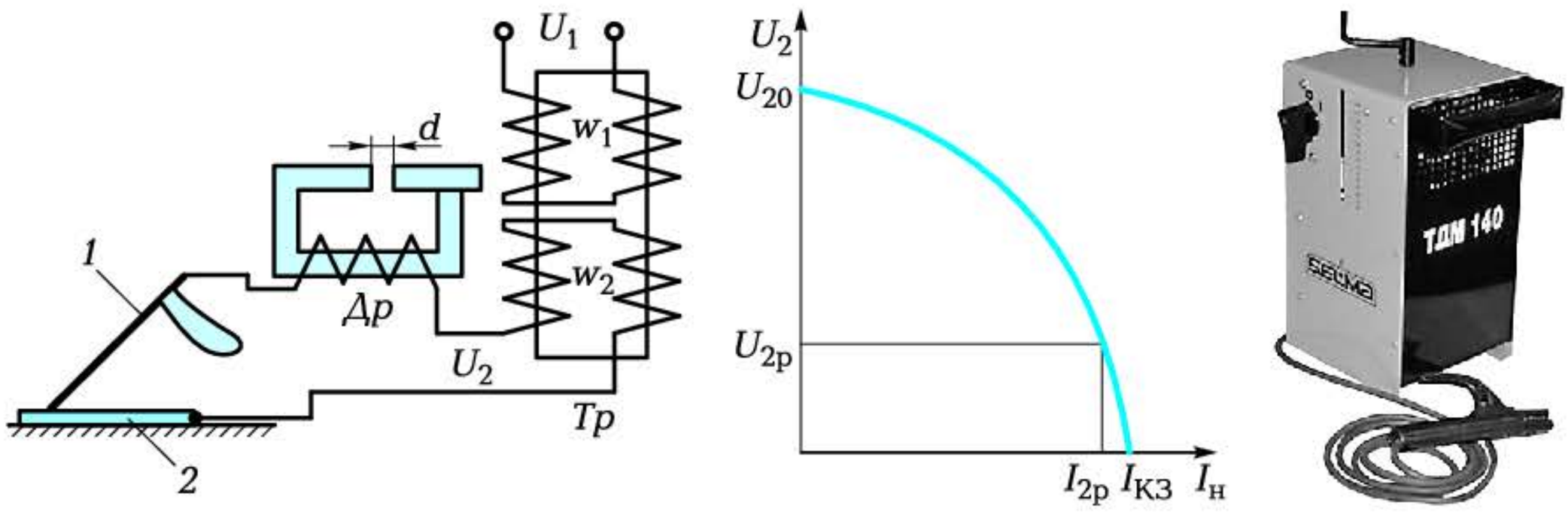
а — схема включения ТТ и ТН в комплексе со стандартными измерительными приборами; *б* — внешний вид трансформатора тока

ром на 10 А. Чтобы измерить электрические параметры при работе двигателя указанными приборами, необходимо включить их через трансформатор напряжения ТН с коэффициентом трансформации $к = 0{,}1$ и через трансформатор тока ТТ с коэффициентом трансформации $к = 10$. В этом случае вольтметр должен показать 600 В, а амперметр — 8 А.

Внешний вид ТТ показан на рис. 7.10, *б*.

7.3.5. Сварочный трансформатор

Перед началом сварки рабочий касается детали *2* электродом *1* и закорачивает вторичную обмотку трансформатора



а *б* *в*

Рис. 7.11. 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*

(рис. 7.11, *а*). В обычном трансформаторе ток короткого замыкания в 10—20 раз превышает номинальный. Но при индуктивной нагрузке внешняя характеристика $U_2 = f(I_н)$ — резко падающая (рис. 7.11, *б*).

Это позволяет получить значение тока короткого замыкания, близкое к рабочему току. Сварочный ток регулируется за счет изменения зазора *d*. При этом изменяются индуктивность дросселя *Др* и крутизна внешней характеристики.

На рис. 7.11, *в* приведен внешний вид сварочного трансформатора ТДМ-140 с максимальным током до 140 А.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что собой представляет внешняя характеристика трансформатора и от чего она зависит?
2. Что характерно для трехфазных трансформаторов?
3. По какой схеме могут быть включены обмотки трехфазных трансформаторов?
4. Что характерно для автотрансформатора? Где он используется?
5. Укажите назначение измерительных трансформаторов и правила их включения.
6. В чем особенность работы сварочного трансформатора?

7.4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АСИНХРОННЫХ МАШИНАХ

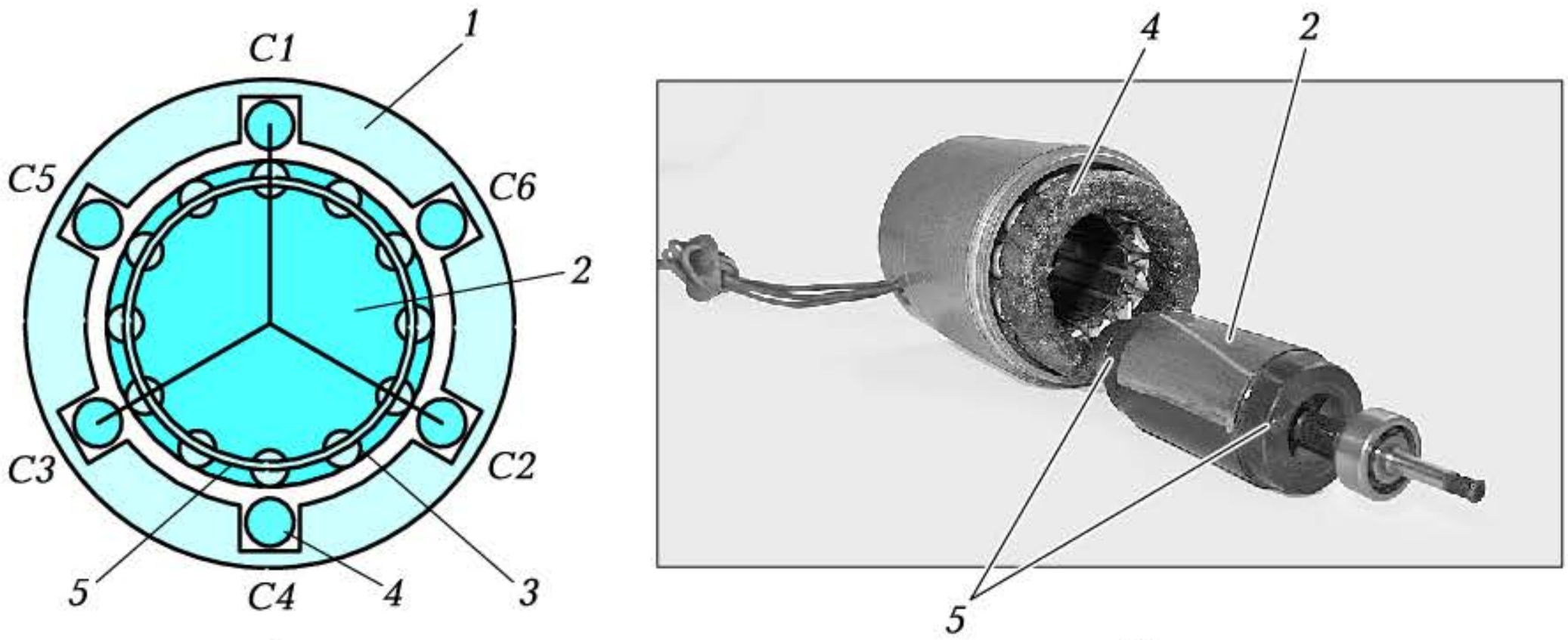
7.4.1. Конструкция асинхронной машины

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 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



а *б*

Рис. 7.12. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором:

а — конструктивная схема; *б* — внешний вид узлов двигателя УАД; *1* — статор; *2* — ротор; *3* — обмотка ротора; *4* — обмотка статора; *5* — кольца, замыкающие обмотку ротора по торцам

двух основных узлов: неподвижного *статора 1* и вращающегося *ротора 2* (рис. 7.12, *а*).

Статор выполняется в виде полого цилиндра с пазами на внутренней поверхности. В пазы укладывается обмотка *4*, выполненная изолированным проводом. Изготовляют 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, объединяют либо в три обмотки, оси которых сдвинуты в пространстве на 120° (трехфазные машины), либо в две обмотки, сдвинутые в пространстве на 90° (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 *C4*, *C5*, *C6* объединяются, а начала фаз *C1*, *C2*, *C3* подключаются к линейным проводам *A*, *B*, *C* (рис. 7.13, *а*). При соединении фаз треугольником начало фазы *C1* объединяется с концом *C5*, *C2* — с *C6* и *C3* — с *C4*. Образовавшиеся узловые точки подключаются к линейным проводам (рис. 7.13, *б*).

Для однофазных машин обмотки подразделяются на рабочие (обмотки возбуждения) и пусковые. Соответственно концы рабочей обмотки обозначаются *Р1* и *Р2* (или *В1* и *В2*), а пусковой — *П1* и *П2* (рис. 7.13, *в*).

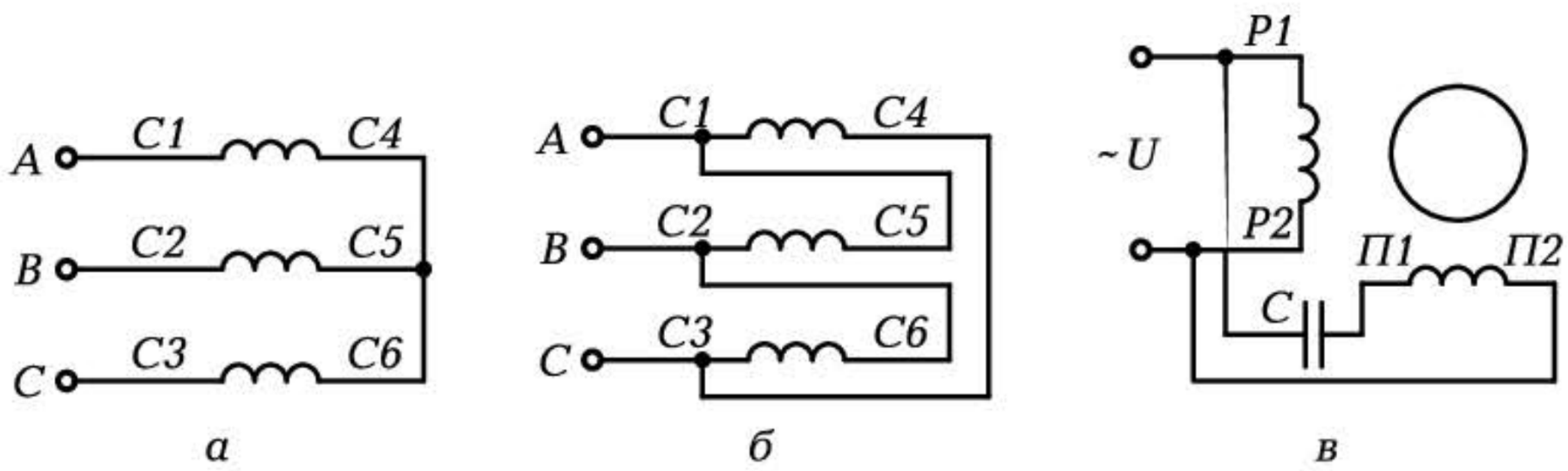


Рис. 7.13. Схемы соединения обмоток асинхронного двигателя:
а — звездой; *б* — треугольником; *в* — схема включения обмоток однофазного асинхронного двигателя

Ротор асинхронного двигателя выполняется в виде сплошного цилиндра также из отдельных ферромагнитных пластин и имеет пазы на внешней поверхности, в которые укладывается обмотка. Обмотка ротора может быть короткозамкнутой или фазной.

Короткозамкнутая обмотка *3* (см. рис. 7.12, *а*) выполняется заливкой пазов в ферромагнитном роторе *2* алюминием с закорачиванием полученных стержней по торцам кольцами *5*. В результате получается так называемое беличье колесо (рис. 7.14, *а*).

Фазная обмотка укладывается изолированным проводом в виде трех фаз, соединенных звездой. Начала фаз подключаются к трем контактным кольцам, расположенным на оси ротора (рис. 7.14, *б*). Подключение обмотки ротора к цепи осуществляется с помощью контактных щеток, располагаемых на корпусе и скользящих по кольцам при вращении ротора.

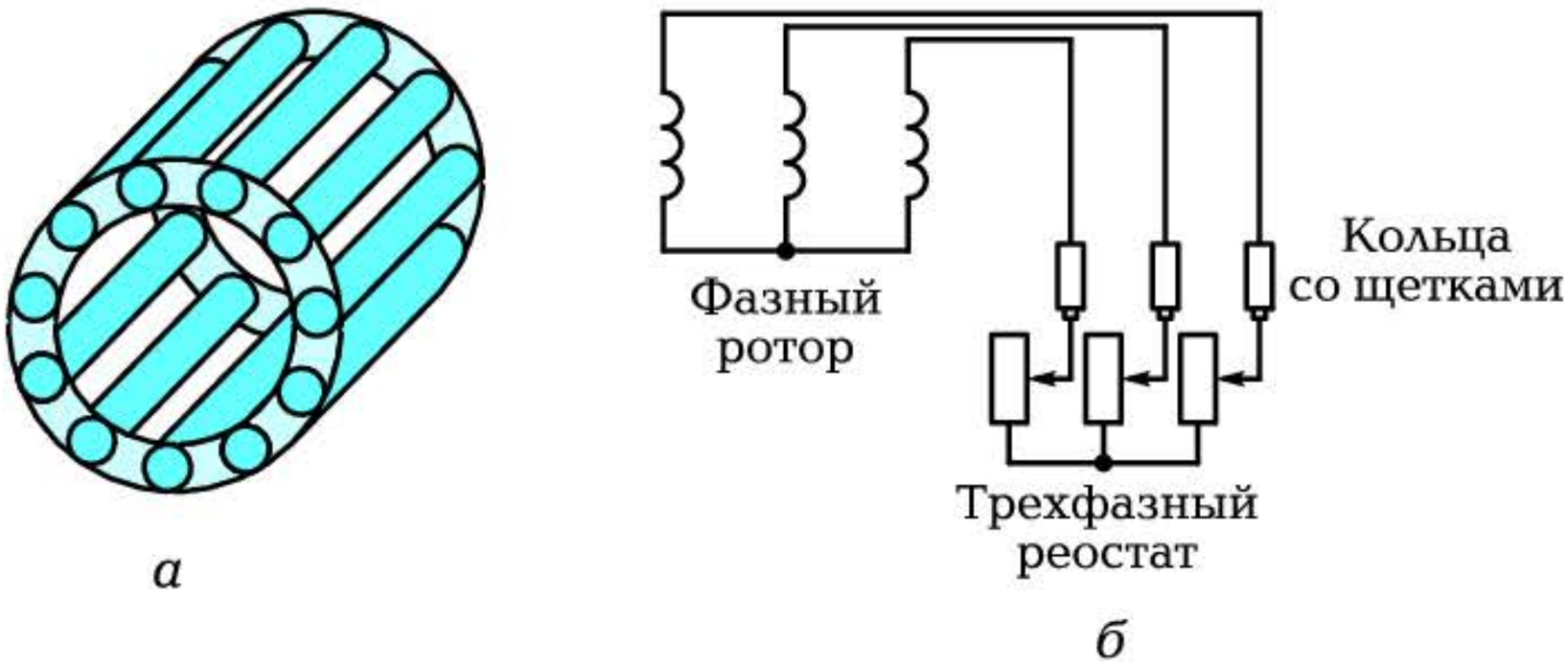


Рис. 7.14. Обмотки ротора асинхронного двигателя:
а — короткозамкнутая типа беличьего колеса; *б* — фазная с включением трехфазного реостата

7.4.2. Принцип работы трехфазного асинхронного двигателя

В основу работы асинхронного двигателя положено взаимодействие *вращающегося* магнитного поля статора с токами, наводимыми этим полем в обмотке ротора.

Вращающееся поле создается системой трехфазного тока, подводимого от сети к обмотке статора (первым использовал этот принцип М. О. Доливо-Добровольский в 1888 г.).

Если к трем обмоткам статора, сдвинутым в пространстве на 120°, подвести три напряжения, сдвинутые по фазе так же на 120°, то на статоре создается вращающееся магнитное поле.

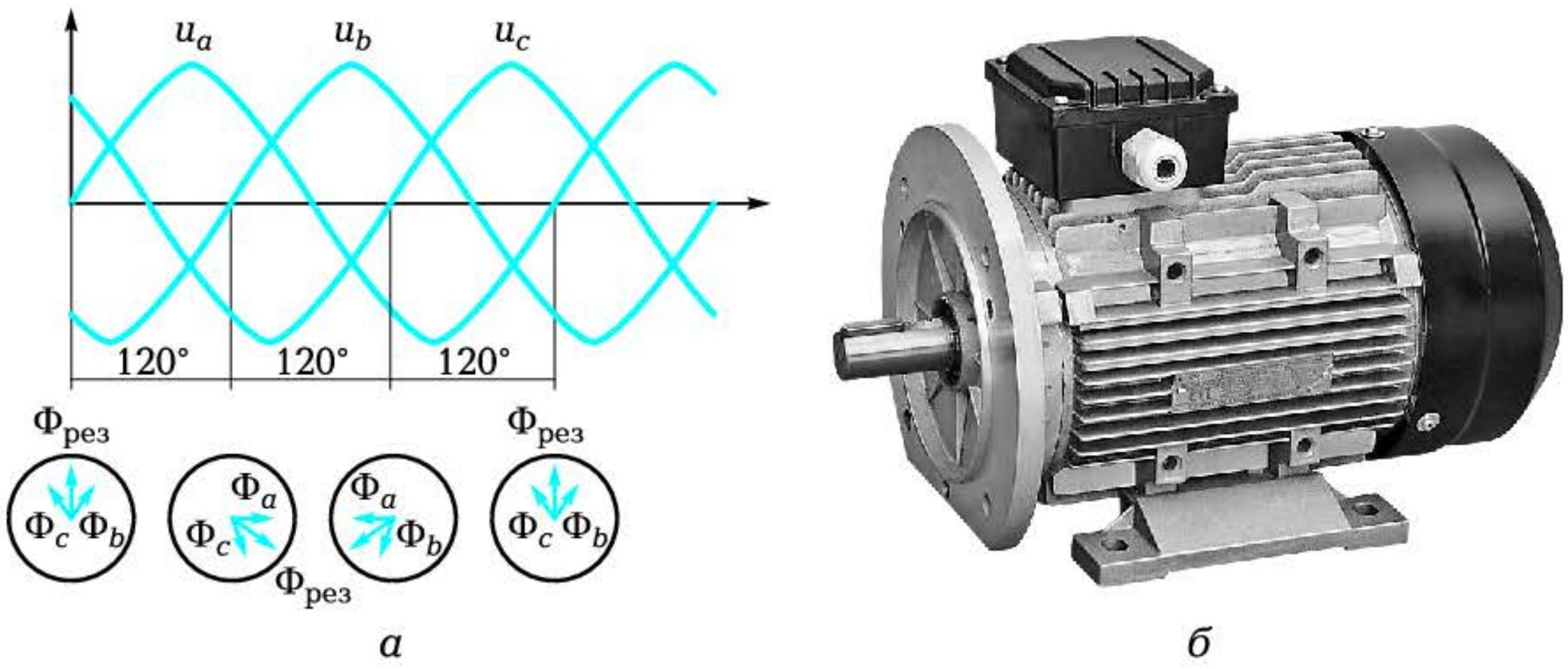
Действительно, за время, равное $^1/_3$ периода (120°), результирующий магнитный поток $\Phi_{рез}$ поворачивается также на 120° (рис. 7.15, *а*).

Частота вращения поля n_1 называется *синхронной* и определяется выражением

$$n_1 = 60\, f_1 / p,$$

где f_1 — частота переменного напряжения, подводимого к обмотке статора; p — число пар полюсов на статоре.

При промышленной частоте $f = 50$ Гц и одной паре полюсов ($p = 1$) максимальная синхронная частота вращения n_1 равна 3 000 об/мин. Вращающееся магнитное поле статора, пересекая обмотки *неподвижного* ротора, наводит в них ЭДС (в соответствии с



а *б*

Рис. 7.15. Диаграммы, поясняющие принцип создания вращающегося магнитного поля (*а*), и внешний вид трехфазного асинхронного двигателя мощностью 400 Вт (*б*)

законом электромагнитной индукции). Действующее значение ЭДС по аналогии с трансформатором определяется выражением

$$E_2 = E_{2m} / \sqrt{2} = 2\pi f_2 w_2 \Phi_m / \sqrt{2} = 4{,}44\, \kappa_2 f_2 w_2 \Phi_m,$$

где E_2 — ЭДС в фазе неподвижного ротора; f_2 — частота переменной ЭДС в неподвижном роторе (равная f_1); w_2 — число витков в фазе ротора; Φ_m — амплитуда магнитного потока; κ_2 — обмоточный коэффициент.

Поскольку в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором стержни обмотки закорочены по торцам кольцами, в стержнях под действием ЭДС E_2 появляется ток ротора I_2. По закону электромагнитных сил (формула Ампера) вращающееся магнитное поле начинает действовать на проводник с током, создавая вращающий момент

$$M_{\text{вр}} = c_{\text{м}} \Phi I_2,$$

где $c_{\text{м}}$ — конструктивный коэффициент; Φ — 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. 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 вращающего момента. Следовательно, ротор всегда вращается с частотой, несколько меньшей синхронной. Отсюда и название — асинхронный (*несинхронный*) двигатель.

Таким образом, АМ по принципу действия похожа на трансформатор. Ее первичная обмотка — статор, а вторичная — ротор. Но работа АМ возможна, только если обмотка ротора пересекает вращающееся магнитное поле, т. е. если частота вращения ротора n меньше или больше частоты вращения поля n_1.

При вращении ротора с частотой $n < n_1$ он «скользит» относительно поля с частотой $(n_1 - n) = 60\, f_{2s}/p$. Отсюда следует, что частота ЭДС f_{2s} во вращающемся роторе

$$f_{2s} = (n_1 - n)\, p / 60 = (n_1 - n)\, f_1 / n_1 = f_1 S,$$

где $S = (n_1 - n)/n_1$ — *скольжение* ротора.

Для неподвижного ротора $S = 1$ и $f_2 = f_1$. При $S = 0$ (ротор вращается с частотой поля) $f_{2s} = 0$, т. е. в роторе переменная ЭДС не индуцируется.

Во вращающемся роторе возникает ЭДС

$$E_{2s} = 4{,}44\,\kappa_2 f_{2s} w_2 \Phi_m = 4{,}44\,\kappa_2 f_1 S\, w_2 \Phi_m = E_2 S.$$

Величина скольжения для АД обычно небольшая — в пределах от 1 до 5 %. Следовательно, даже в худшем случае частота вращения ротора

$$n = 60 f_1 (1 - S) \,/\, p = 3\,000 \cdot 0{,}95 = 2\,850 \text{ об/мин},$$

т. е. она достаточно близка к синхронной.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова конструктивная схема асинхронного двигателя?
2. Поясните принцип работы асинхронного двигателя.
3. Почему ротор не может догнать вращающееся поле?
4. Чем определяется частота вращения магнитного поля?
5. Где нашли основное применение асинхронные (трехфазные, однофазные) двигатели?

7.5. ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

7.5.1. Механические и рабочие характеристики двигателя

Механической характеристикой двигателя называется зависимость частоты вращения его ротора от нагрузки на его валу $n = f(M_н)$.

При увеличении нагрузки на валу ротора его частота вращения падает, скольжение растет, увеличиваются ЭДС и ток ротора, растет развиваемый электромагнитный момент, который и компенсирует увеличение нагрузки.

АД с короткозамкнутым ротором при неизменном напряжении питания имеет достаточно жесткую (малоизменяющуюся) механическую характеристику $n = f(M_н)$, что и обусловливает его широкое применение в качестве приводного двигателя металлорежущих станков и подъемных механизмов.

На рис. 7.16, *а* приведены механические характеристики двух АД с короткозамкнутым ротором, отличающиеся тем, что у одно-

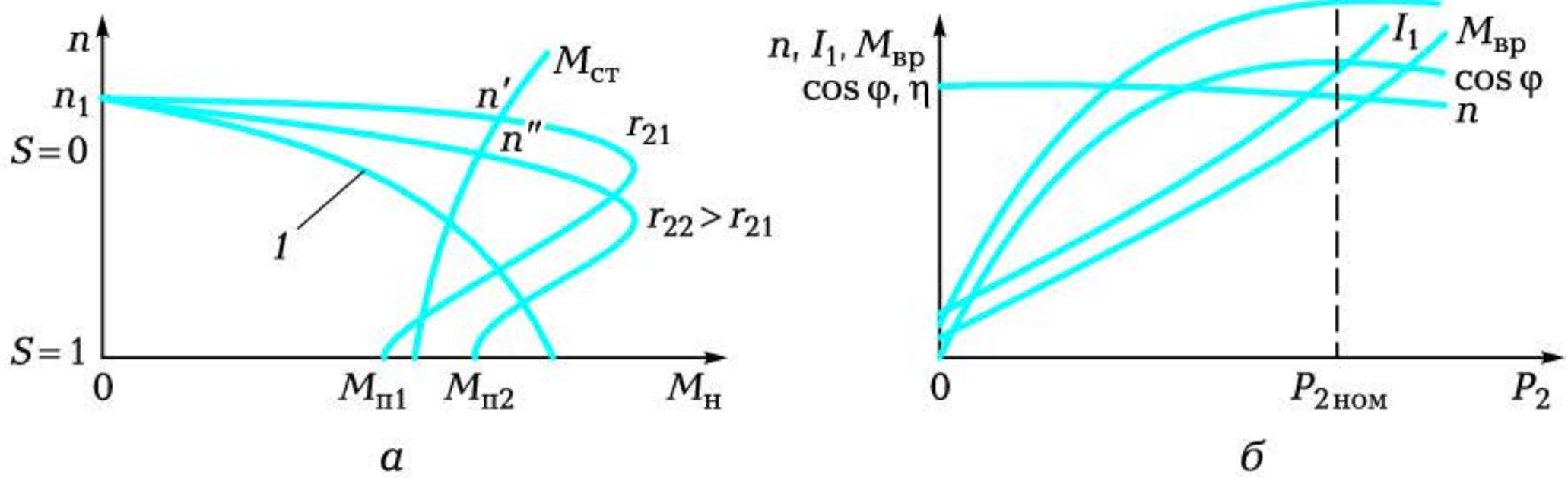


Рис. 7.16. Характеристики асинхронного двигателя:

а — механические; *б* — рабочие; *1* — характеристика двигателя с полым немагнитным ротором

го 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 бóльшим сопротивлением имеет больший пусковой момент ($M_{п2} > M_{п1}$).

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 $M_{ст}$ на валу ротора. Для $r_{22} > r_{21}$ частота вращения $n'' < n'$.

Кривая *1* на рис. 7.16, *а* соответствует двигателю с полым немагнитным ротором (см. подразд. 7.7), активное сопротивление которого значительное.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют собой зависимости частоты вращения ротора n, вращающего электромагнитного момента $M_{вр}$, тока статора I_1, КПД и коэффициента мощности cos φ от полезной механической мощности P_2. Их примерный вид приведен на рис. 7.16, *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:

$$M_{вр} = P_2/(0{,}105n);\ I_1 = P_2/(\sqrt{3}\,U\cos\varphi).$$

Незначительная нелинейность $M_{вр}$ вызвана небольшим падением частоты вращения n.

КПД и cos φ быстро растут при увеличении полезной мощности и достигают максимальных значений при нагрузке, близкой к номинальной.

7.5.2. 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.

На рис. 7.17 приведена энергетическая диаграмма, отражающая преобразование подводимой к статору электрической мощности P_1 в полезную механическую мощность P_2 и потери мощности в процессе ее преобразования.

Часть подводимой к статору электрической мощности 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 $P_м$. Электромагнитная мощность $P_{эм}$ передается через воздушный зазор со статора на ротор.

Под действием $P_{эм}$ в роторе текут токи i_2 и появляются 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 $P_{доп}$, вызванные 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 можно выразить в виде

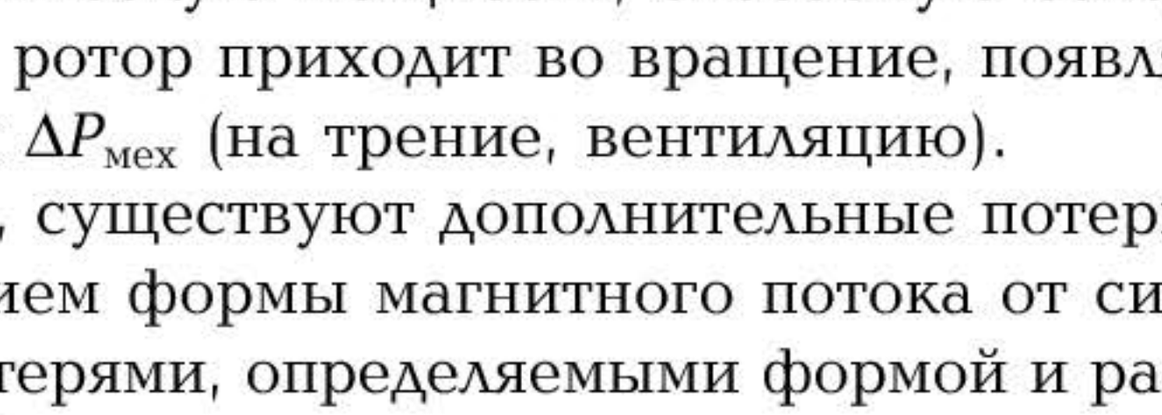


Рис. 7.17. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

$$\sum P = P_{эл1} + P_{м} + P_{эл2} + \Delta P_{мех} + P_{доп}.$$

В этом случае КПД

$$\eta = 1 - \sum P / P_1.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой механическая характеристика асинхронного двигателя?
2. Какие характеристики двигателя называются рабочими?
3. Назовите основные потери в асинхронной машине.
4. Почему КПД асинхронного двигателя ниже, чем у трансформатора?

7.6. ПУСК И РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

7.6.1. Реверс и схемы пуска

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 (реверса) необходимо изменить 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, для 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.

- АД с короткозамкнутым ротором обычно пускается в ход непосредственным подключением к источнику переменного напряжения номинальной величины, т. е. для него характерен прямой пуск (рис. 7.18, *а*).

- АД с фазным ротором позволяет снизить пусковые токи за счет включения в обмотки ротора через контактные кольца трехфазного реостата (см. рис. 7.14, *б*).

Это снижает токи ротора, а значит, и токи статора до заданного значения. Однако при одновременном включении большого числа АД (например, утром в цехе), может «подсаживаться» сеть, что плохо влияет на работу других потребителей.

- *Автотрансформаторный пуск* (рис. 7.18, *б*) позволяет запустить двигатель при пониженном напряжении, а после его разгона подать номинальное напряжение.

С этой же целью используется пуск с переключением обмоток статора со звезды на треугольник.

При одном и том же линейном напряжении питания обмоток, соединенных звездой и треугольником, токи в линии различаются в 3 раза. Действительно:

$$I_{л.зв} = I_{ф.зв} = U_ф / Z_ф = U_л / (\sqrt{3}\, Z_ф);$$

$$I_{л.тр} = \sqrt{3}\, I_{ф.тр} = \sqrt{3}\, U_ф / Z_ф = \sqrt{3}\, U_л / Z_ф,$$

откуда

$$I_{л.тр} / I_{л.зв} = 3.$$

Поэтому пуск низковольтных маломощных АД осуществляется выключателем *В1* при соединении обмоток звездой, а далее в ра-

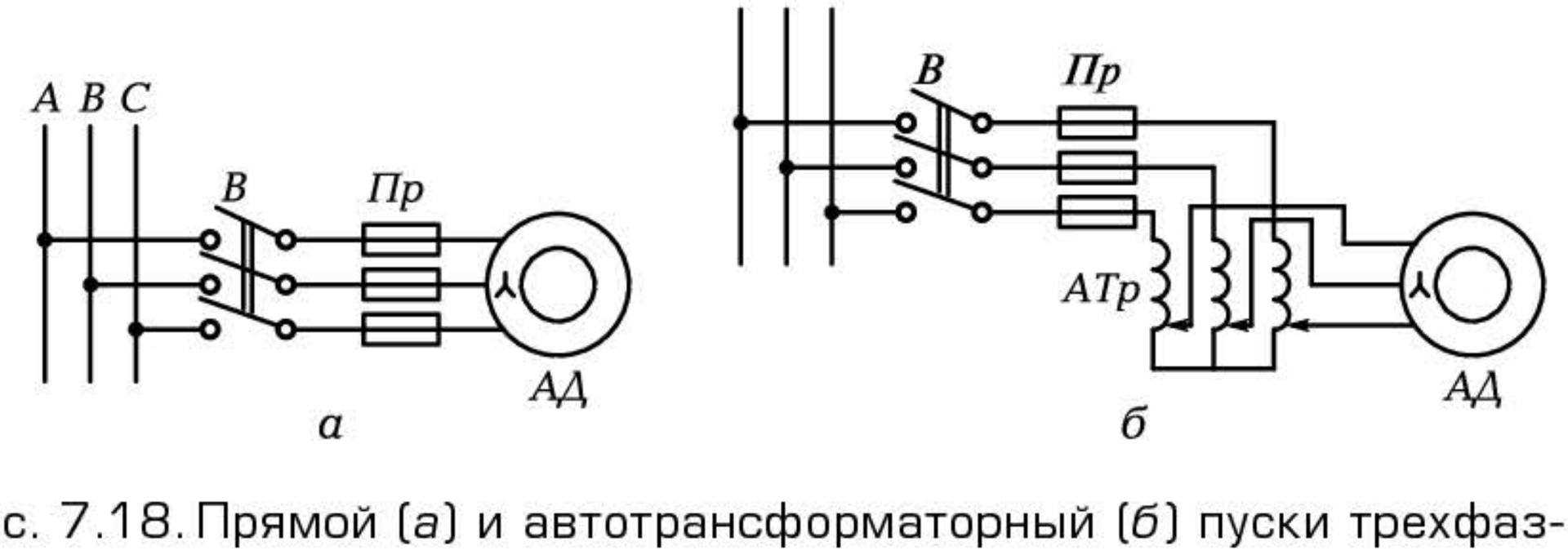


Рис. 7.18. Прямой (*а*) и автотрансформаторный (*б*) пуски трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

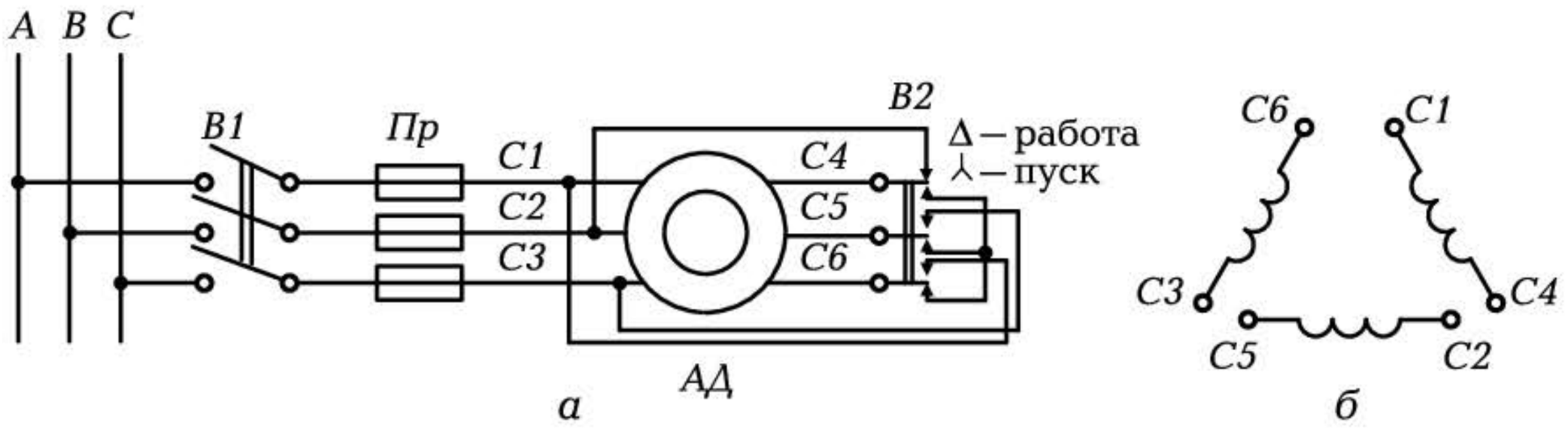


Рис. 7.19. Схема пуска асинхронного двигателя с переключением обмоток со звезды на треугольник (*а*) и схема соединения обмоток статора треугольником (*б*)

бочем режиме обмотки переводятся переключателем *B2* в соединение треугольником (рис. 7.19).

7.6.2. Регулирование частоты вращения

Частота вращения АД определяется выражением

$$n = n_1(1 - S) = f_1\,(1 - S)/p.$$

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 *переключения 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 об/мин.

В последнее время получило применение *частотное* регулирование частоты вращения асинхронного двигателя.

Оно осуществляется за счет изменения частоты f_1 с помощью мощных полупроводниковых преобразователей частоты (инверторов), построенных на управляемых вентилях (тиристорах) (рис. 7.20). Маломощный генератор управляет работой вентилей,

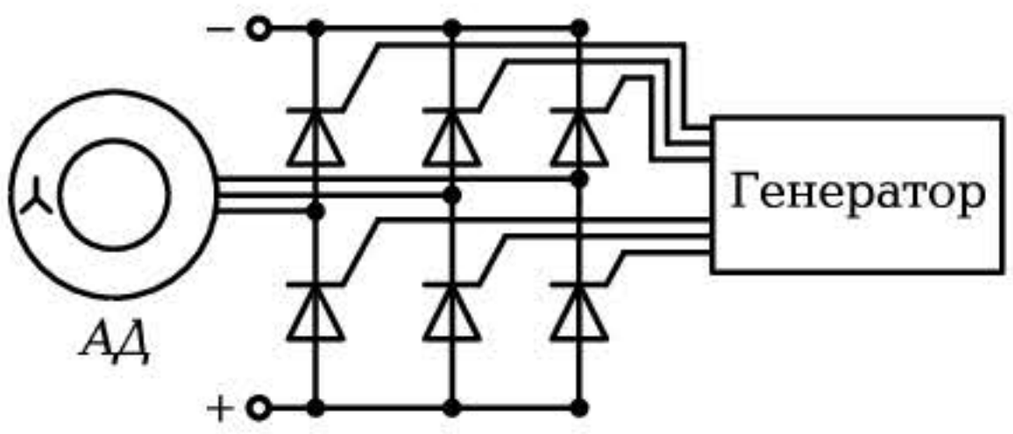


Рис. 7.20. Схема частотного регулирования частоты вращения ротора трехфазного асинхронного двигателя

заставляя их переключаться с частотой, обеспечивающей необходимую частоту вращения ротора. Постоянное напряжение преобразуется в переменное любой частоты.

Регулирование частоты вращения за счет *скольжения* S возможно при работе под нагрузкой путем изменения напряжения питания U_1.

При этом уменьшение U_1 ведет к уменьшению развиваемого момента пропорционально U_1^2, скольжение растет, частота вращения двигателя падает, поскольку $n = n_1(1 - S)$. Однако при таком регулировании частота вращения n изменяется в небольших пределах.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как осуществить реверс асинхронного двигателя?
2. Перечислите и охарактеризуйте способы пуска асинхронных двигателей.
3. От каких параметров зависит частота вращения двигателя?
4. Перечислите способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей.

7.7. ОДНОФАЗНЫЕ И УНИВЕРСАЛЬНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

7.7.1. Однофазные асинхронные двигатели

В быту, где потребление электрической энергии небольшое, а сеть однофазная, широко используются однофазные АД (для холодильников, стиральных машин, вентиляторов 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° (а не три, сдвинутые на 120°) и питаемые токами, сдвинутыми по фазе на 90° (а не на 120°).

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. 7.13, *в*). Он позволяет сдвинуть токи в обмотках, а значит, и магнитные потоки практически на 90°, что приводит к созданию вращающегося магнитного поля. Такие машины получили название конденсаторные двигатели. Они применяются, как правило, в быту.

Ротор однофазных машин чаще выполняется в двух вариантах:

- короткозамкнутым, аналогичным ротору трехфазной машины (рис. 7.21);
- в виде полого алюминиевого стаканчика (АД с полым ротором — рис. 7.22).

Двигатель *с полым ротором* имеет внутренний *5* и внешний *2* статоры из наборного железа, располагаемые на корпусе *1*. На внешнем статоре *2* размещаются две обмотки *3*, сдвинутые в пространстве на 90°. Внутренний статор *5* служит для уменьшения сопротивления магнитному потоку. Между статорами на оси *4* вращается ротор *6* — алюминиевый тонкостенный стаканчик (толщина стенок $h = 0{,}1 \ldots 1$ мм)

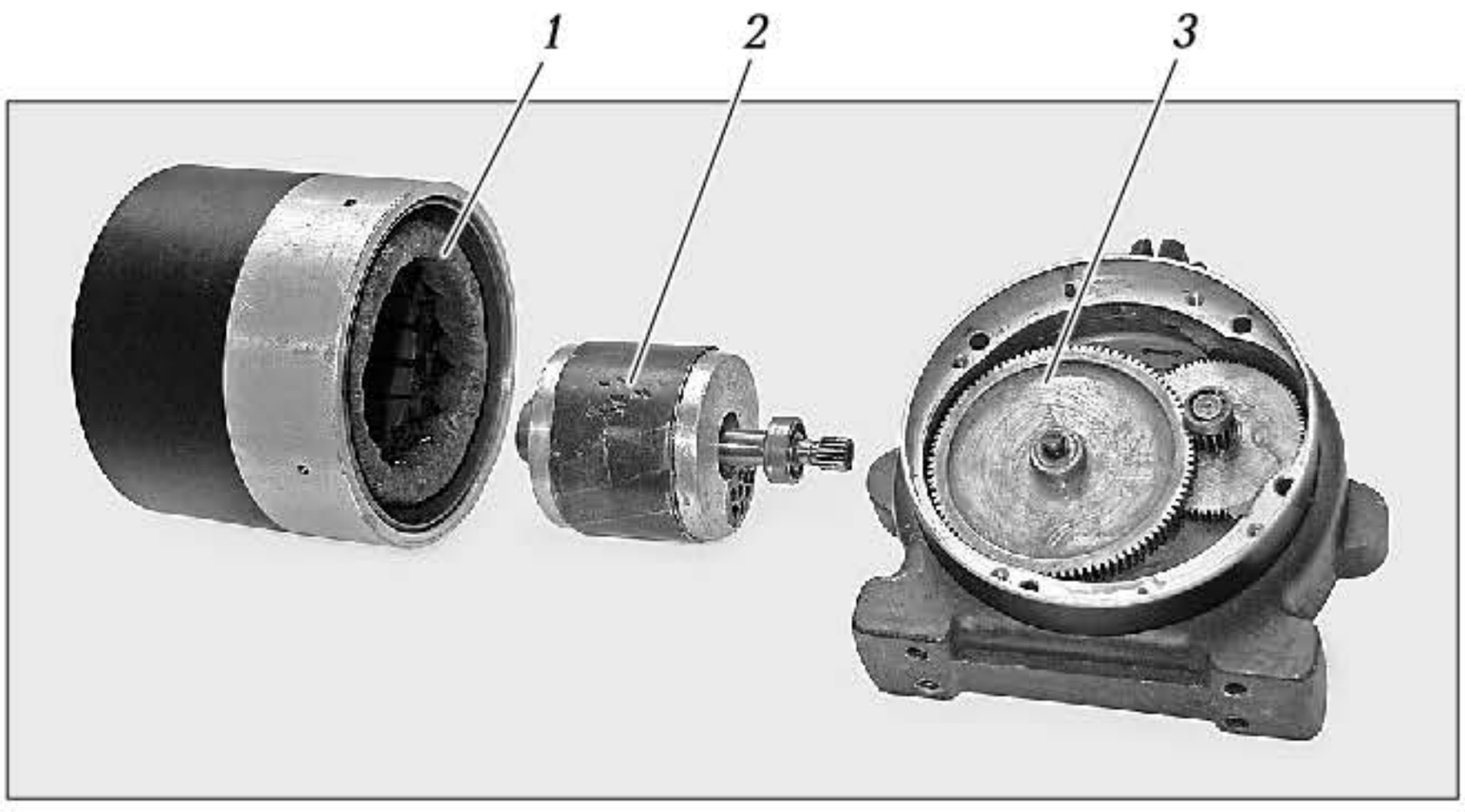
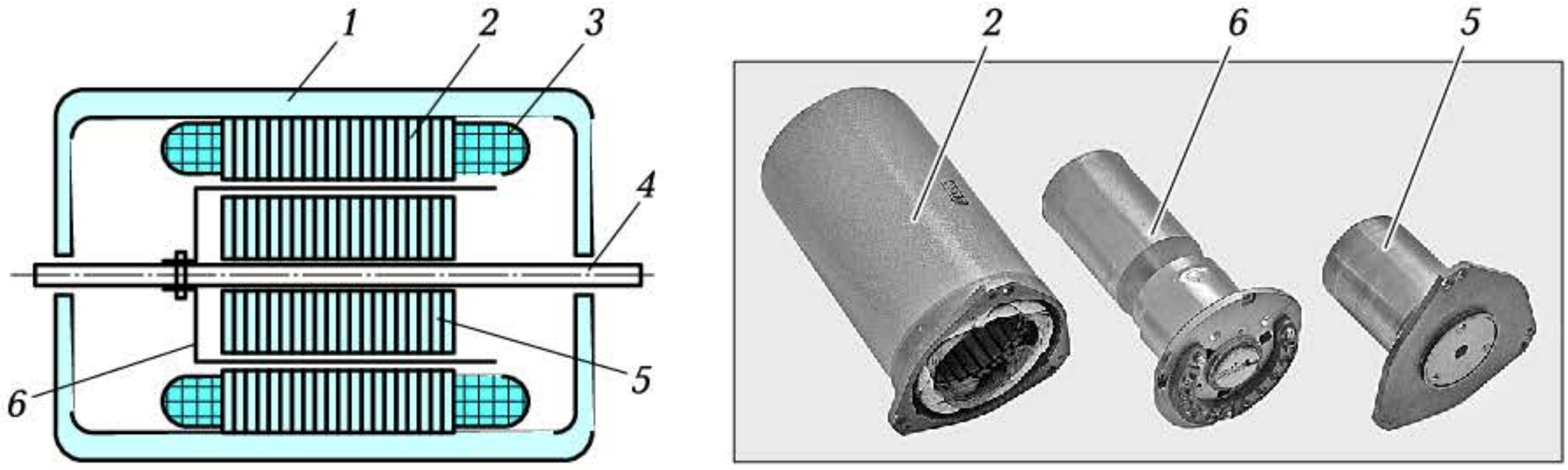


Рис. 7.21. Составные части однофазного АД с короткозамкнутым ротором и редуктором:
1 — обмотка статора; *2* — ротор; *3* — редуктор



а *б*

Рис. 7.22. 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

В основу работы такого двигателя положено взаимодействие вращающегося магнитного поля, создаваемого обмотками статора, с вихревыми токами, наводимыми этим полем в алюминиевом стаканчике.

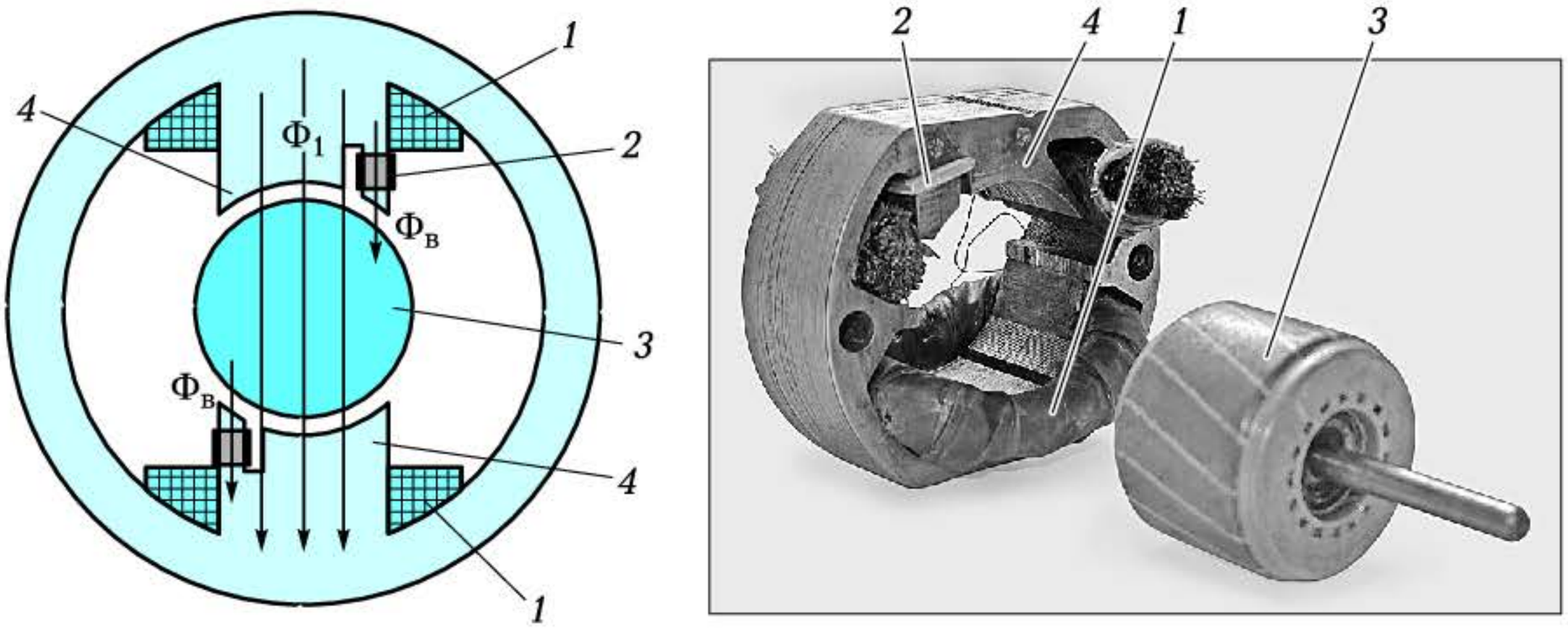
Момент инерции ротора мал, и быстродействие двигателя велико.

Толщина стенок стаканчика мала, поэтому его активное сопротивление r_2 большое, пусковой момент $M_п$ также большой, а механическая характеристика $n = f(M_н)$ достаточно крутая (см. кривую *1* на рис. 7.16, *а*). Это позволяет за счет изменения подводимого напряжения U_1 изменять частоту вращения ротора от максимальной (синхронной) до нуля.

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. 7.23), на котором расположена однофазная обмотка *1*, охватывается короткозамкнутым (КЗ) витком *2*. Как правило, это медное или алюминиевое кольцо. Переменный магнитный поток Φ_1 индуцирует в КЗ витке ЭДС и ток $I_к$, который создает переменный магнитный поток $\Phi_к$. Таким образом, в расщепленной части полюса действует результирующий поток $\Phi_в = \Phi_1 + \Phi_к$, сдвинутый по фазе относительно Φ_1. Два сдвинутых по фазе магнитных потока способны создавать магнитное поле, приближающееся по своему действию к вращающемуся полю. Возникает момент, увлекающий ротор *3* в направлении вращения поля.

Мощность таких двигателей небольшая (до 25 Вт), небольшой и пусковой момент. Основное применение эти двигатели нашли в



а *б*

Рис. 7.23. Конструктивная схема двигателя с расщепленными полюсами (*а*) и внешний вид составных частей двигателя (*б*):

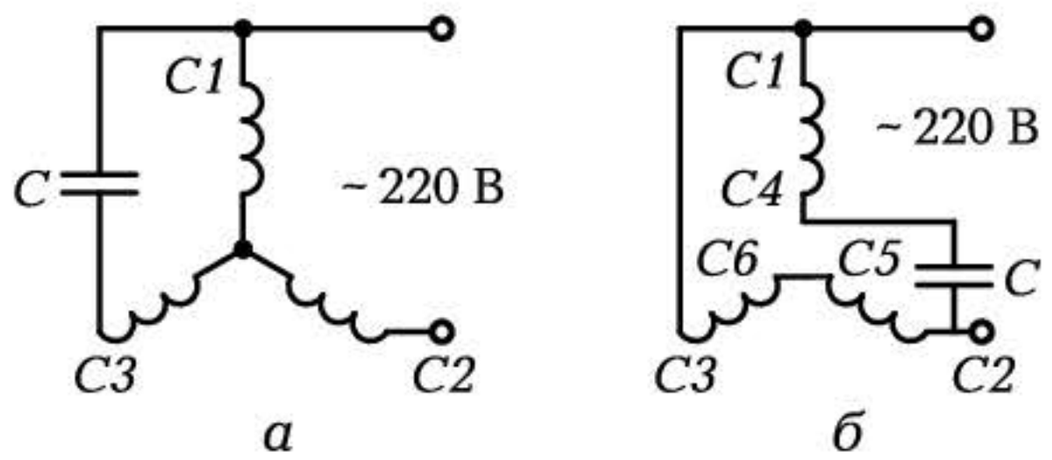
1 — обмотка; *2* — короткозамкнутый виток; *3* — ротор; *4* — расщепленные полюсы

небольших вентиляторах, электропроигрывателях, лентопротяжных механизмах.

7.7.2. Универсальные асинхронные двигатели

Универсальными асинхронными двигателями (УАД) 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,



а *б*

Рис. 7.24. Возможные схемы (*а*, *б*) включения обмоток универсального асинхронного двигателя в однофазную сеть

либо в трехфазную. Рабочие характеристики двигателя в однофазном режиме несколько хуже, чем в трехфазном режиме. Например, для УАД-72 в трехфазном режиме развиваемая мощность $P = 70$ Вт, а КПД $\eta = 65\,\%$. В однофазном режиме $P = 50$ Вт, а $\eta = 60\,\%$.

Схемы включения УАД в *трехфазную* сеть — типовые: звезда и треугольник. Возможные схемы включения УАД в *однофазную* сеть приведены на рис. 7.24.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличается однофазный двигатель от трехфазного и где он нашел основное применение?
2. В чем состоит принцип работы асинхронного двигателя с расщепленными полюсами?
3. Что характерно для универсального асинхронного двигателя?
4. Где нашли основное применение трехфазные асинхронные двигатели?

7.8. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИНХРОННЫХ МАШИНАХ

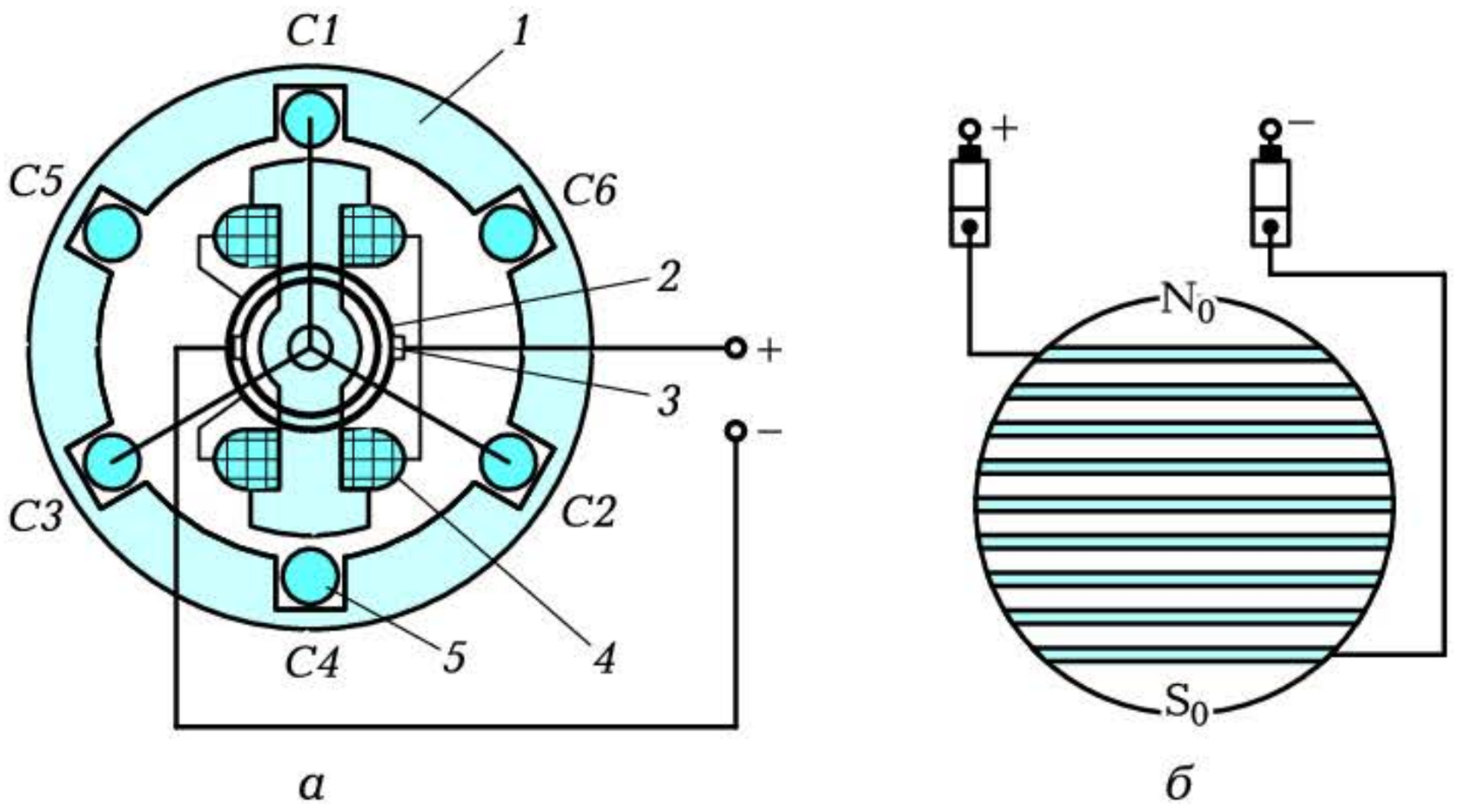
7.8.1. Конструкция

Синхронная машина — это электрическая машина, у которой частота вращения ротора равна частоте вращения магнитного поля, создаваемого обмотками статора.

Основное применение в промышленности нашли *трехфазные* синхронные машины (СМ). Они могут работать как в режиме двигателя, так и в режиме генератора. Трехфазные синхронные генераторы являются основными источниками электрической энергии, производимой на гидроэлектростанциях, тепловых, атомных электростанциях и др.

На рис. 7.25, *а* приведена конструктивная схема синхронной машины.

Статор *1* трехфазного синхронного двигателя ничем не отличается от статора асинхронного, имеет три обмотки *5* и служит для создания вращающегося магнитного поля.



а *б*

Рис. 7.25. Конструктивная схема синхронной машины с явнополюсным ротором (*а*) и неявнополюсный ротор (*б*)

1 — статор; *2* — контактные кольца; *3* — щетка; *4* — обмотка ротора; *5* — обмотка статора

В режиме генератора обмотки статора служат для получения трехфазной системы ЭДС.

Ротор *6* имеет обмотку *4*, выполняемую изолированным проводом и питаемую *постоянным током* через контактные кольца *2* и щетки *3*. Ротор может быть явнополюсным (см. рис. 7.25, *а*) или неявнополюсным (рис. 7.25, *б*).

Основное назначение обмоток ротора — создание *постоянного магнитного поля*.

Обмотка ротора питается постоянным током, поэтому потери на вихревые токи в установившемся режиме отсутствуют и ротор может быть выполнен из цельного куска железа. На поверхности неявнополюсного ротора фрезеруются пазы, в которые укладывается обмотка возбуждения.

7.8.2. Принцип действия синхронной машины при работе в режиме двигателя

Работа СМ в режиме двигателя может быть проанализирована на примере магнитной муфты, состоящей из двух магнитов (рис. 7.26).

Ведущим является внешний магнит *1*, создающий магнитное поле N — S, аналогичное вращающемуся магнитному полю статора. Внутренний магнит *2*, создающий поле $S_0 — N_0$, аналогичен ротору

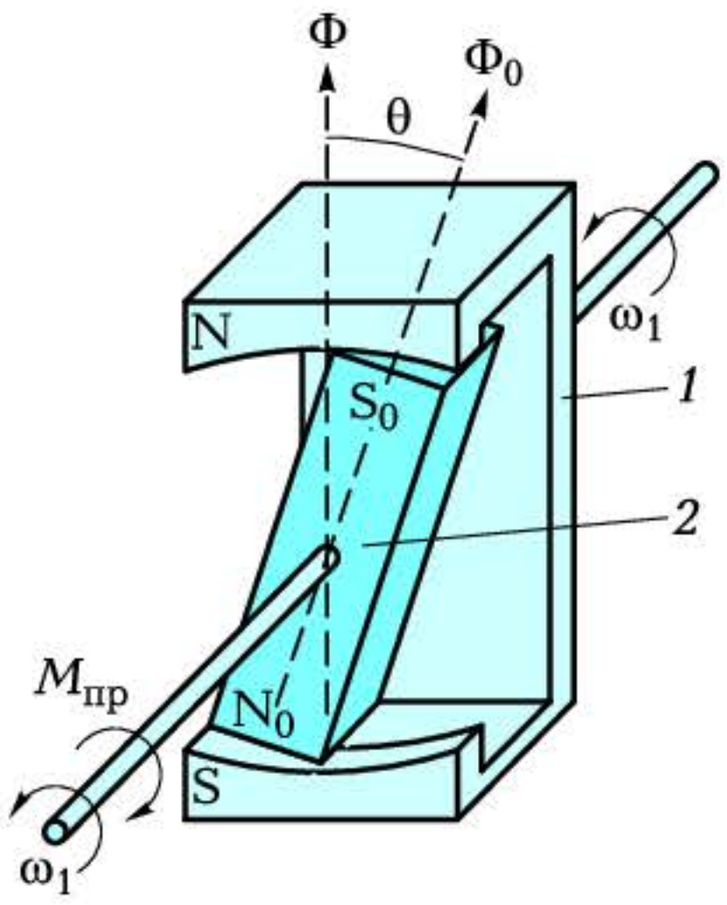


Рис. 7.26. Магнитная муфта:

1 — внешний магнит; *2* — внутренний магнит

СМ с постоянным магнитным потоком Φ_0, создаваемым обмоткой на роторе.

При работе магнитной муфты происходит взаимодействие магнитных полей внешнего и внутреннего магнита. Вращающийся с помощью первичного двигателя с угловой частотой ω_1 внешний магнит за счет «сцепления» магнитных потоков увлекает за собой внутренний магнит. При этом установившиеся условия частоты вращения внутреннего и внешнего магнитов одинаковы (*синхронны*) и равны ω_1.

Тот же принцип положен в основу работы *синхронного двигателя* (*СД*).

Вращающий момент создается за счет взаимодействия вращающего магнитного поля статора с постоянным магнитным полем, создаваемым обмоткой ротора.

При $M_{пр} = 0$ угол θ — угол между осью вращающегося поля (Φ) и направлением намагниченности ротора (Φ_0) — равен нулю. Если к оси внутреннего магнита (или ротора синхронного двигателя) приложить противодействующий момент $M_{пр}$ (нагрузку), то внутренний магнит отстанет на угол θ от внешнего магнита, но будет продолжать вращаться с той же угловой частотой ω_1. Увеличение нагрузки ведет к увеличению угла θ, и в предельном случае при $\theta > \theta_{крит}$ полюса внутреннего магнита выходят из-под полюсов внешнего магнита, сопротивление магнитному потоку резко возрастает, развиваемый момент снижается и двигатель «выпадает из синхронизма» (ротор останавливается).

7.8.3. Принцип действия синхронной машины при работе в режиме генератора

Если вращать извне с помощью турбины внутренний магнит (или ротор СМ), а к оси внешнего магнита приложить момент $M_{пр}$ (или включить обмотку статора СМ на нагрузку), — *режим генератора* — то магнитный поток Φ_0 будет опережать поток Φ на угол θ. Но внешний магнит будет так же следовать за внутренним с угловой частотой ω_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 двухполюсные машины с неявно выраженными полюсами.

Гидрогенераторы — тихоходные многополюсные (до 100 полюсов) машины с явно выраженными полюсами. При $f = 50$ Гц и $p = 1$ турбогенератор имеет частоту вращения $n_1 = 60\ f/p = 3\,000$ об/мин, а, например, у гидрогенератора Днепровской ГЭС при $p = 36$ $n_1 = 83$ об/мин. Именно такая частота вращения обеспечивает на зажимах генератора напряжение частотой 50 Гц.

В *синхронном генераторе* (СГ) используется явление электромагнитной индукции: при пересечении проводника магнитным полем в нем наводится ЭДС: $E = c_e \Phi_0 n$, где c_e — конструктивный коэффициент; Φ_0 — магнитный поток; n — частота вращения.

В данном случае постоянное поле, создаваемое обмоткой возбуждения и вращающееся с помощью внешней силы (турбины), наводит ЭДС в неподвижных обмотках статора. Если машина трехфазная, то наводятся три одинаковые ЭДС, сдвинутые на угол 120° друг относительно друга — трехфазная система ЭДС.

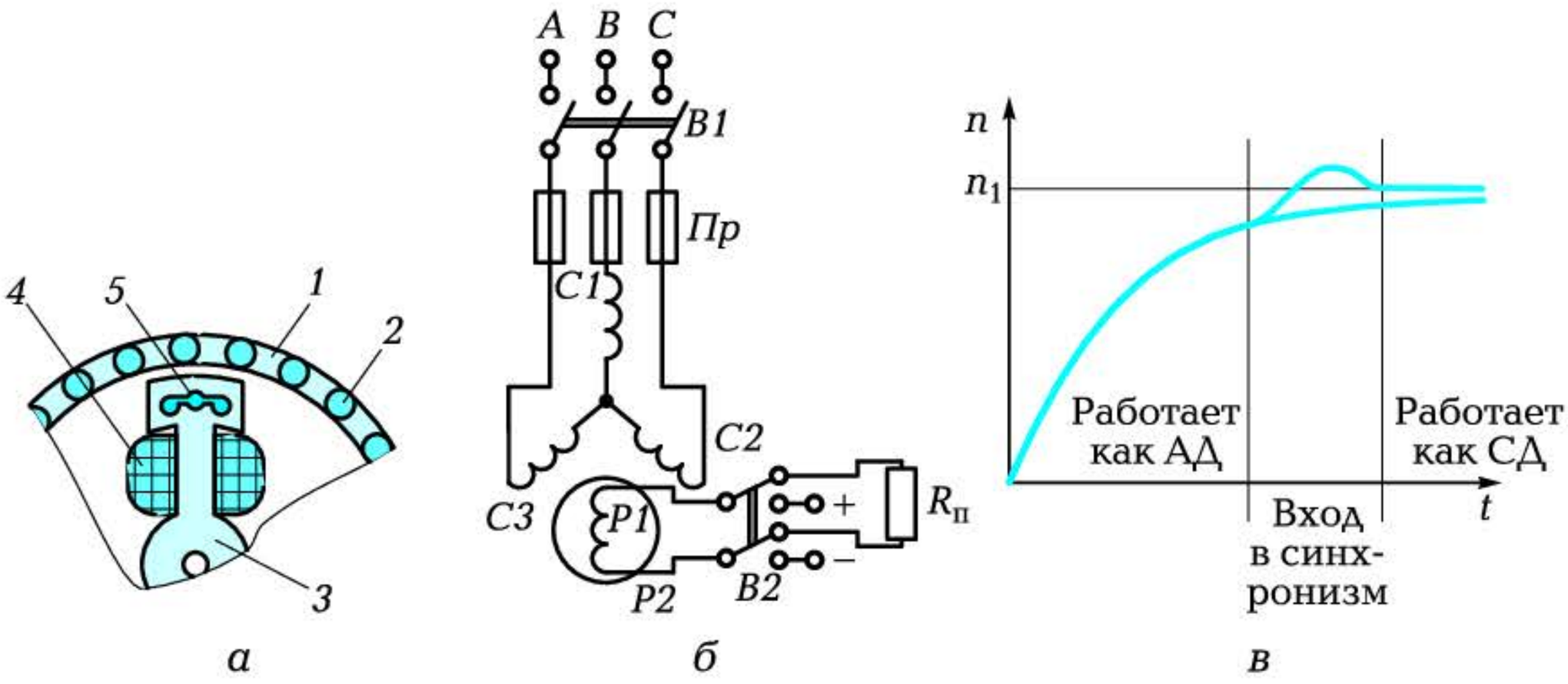
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие элементы входят в состав синхронной машины?
2. Чем статор синхронной машины отличается от статора асинхронной?
3. Поясните принцип действия синхронной машины.
4. Где нашла основное применение трехфазная синхронная машина?

7.9. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ В РЕЖИМЕ ДВИГАТЕЛЯ

7.9.1. Особенности пуска синхронного двигателя

При включении обмоток *2* (рис. 7.27, *а*), располагаемых на статоре *1* синхронного двигателя, в трехфазную сеть и подключении обмотки возбуждения *4*, располагаемой на роторе *3*, к источнику



а *б* *в*

Рис. 7.27. Синхронный двигатель:

а — конструктивная схема с асинхронной обмоткой; *б* — схема пуска; *в* — временна́я диаграмма разгона ротора; *1* — статор; *2* — обмотки статора; *3* — ротор; *4* — обмотка возбуждения ротора; *5* — пусковая обмотка

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 *3* остается неподвижным, поскольку поле слишком быстро проскакивает мимо полюсов ротора.

Для разгона СД его ротор снабжают специальной пусковой обмоткой *5*, аналогичной беличьему колесу в АД.

Стержни пусковой обмотки закладывают в полюсы ротора и соединяют по торцам замыкающими шинами. При этом СД пускают прямым включением в сеть, как АД (рис. 7.27, *б*). Предварительно переключатель *B2* устанавливают в положение, при котором обмотка ротора *P1*—*P2* закорачивается на пусковой резистор $R_п$. Это необходимо сделать, поскольку при разгоне ротора в его обмотке индуцируется значительная ЭДС, которая может вывести из строя источник постоянного напряжения, питающий обмотку ротора. Затем включают выключатель *B1* и после достижения ротором частоты, близкой к синхронной частоте вращения, переключателем *B2* подключают обмотку ротора к источнику постоянного напряжения.

Пусковой момент создается аналогично пусковому моменту АД, и вначале СМ работает, как АМ. Когда частота вращения n приближается к синхронной частоте n_1 (рис. 7.27, *в*), ротор «втягивается» в синхронное вращение и продолжает далее совершать

обороты с частотой n_1. Пусковая обмотка на роторе прекращает действовать, так как она теперь не пересекается вращающимся полем статора.

7.9.2. Синхронные машины малой мощности

Питание обмотки ротора в СМ постоянным током создает два недостатка:

- нужен источник постоянного напряжения;
- контактное устройство (кольца со щетками) снижает надежность работы машины.

Для 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. 7.28, *а*). Алюминий играет роль пусковой обмотки, в которой под действием вращающегося магнитного поля наводятся вихревые токи. Под действием этих токов ротор приходит во вращение аналогично короткозамкнутому ротору АД.

Широкое применение из машин малой мощности нашли также *реактивные двигатели*. У них постоянное поле на роторе отсутствует. Вращение ротора обеспечивается его особой формой (рис.

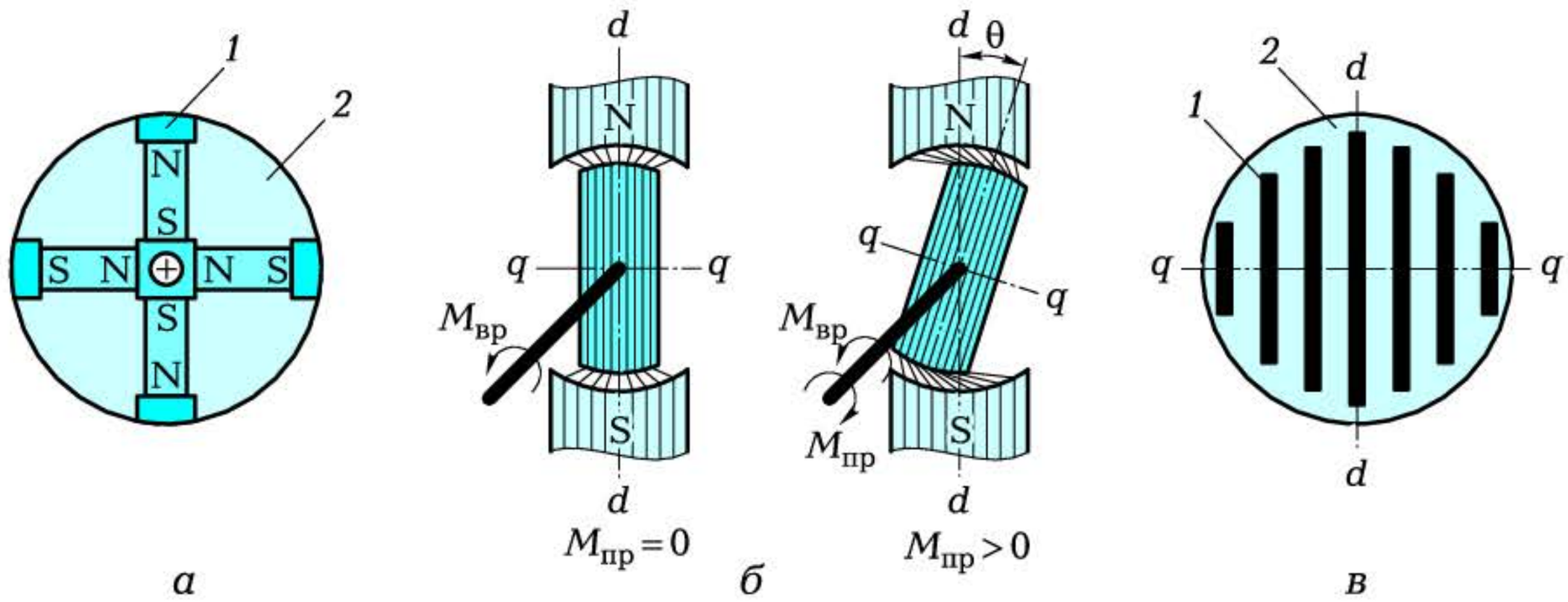


Рис. 7.28. Конструктивная схема роторов синхронных машин малой мощности:

а — гистерезисных; *б*, *в* — реактивных; *1* — стальные полосы; *2* — алюминий

7.28, *б*, *в*) и «упругостью» магнитных силовых линий, которая заставляет ротор при отсутствии нагрузки ($M_{пр} = 0$) располагаться по оси полюса статора и вращаться синхронно с полем статора. При наличии нагрузки ($M_{пр} > 0$) ротор отстает от оси полюса на угол θ, но продолжает вращаться с синхронной частотой.

Ротор, показанный на рис. 7.28, *б*, выполнен в виде скошенного по бокам цилиндра из ферромагнитного материала, а у ротора на рис. 7.28, *в* стальные полосы *1* залиты алюминием *2*. В обоих случаях намагниченность по оси $d-d$ обеспечивается существенно легче, чем по оси $q-q$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем особенности пуска СД и как осуществляется его пуск?
2. Каковы особенности конструкции СМ малой мощности?
3. Что такое гистерезисный двигатель?

7.10. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

7.10.1. Принцип получения постоянной ЭДС

Как в любой ЭМ, в основу действия машины постоянной тока (МПТ) положено взаимодействие магнитного поля и проводников с током.

Если поместить рамку в постоянное магнитное поле и вращать ее с постоянной угловой частотой ω, то в ней будет наводиться переменная ЭДС $e(t)$. С помощью контактных колец эта ЭДС может быть подведена к нагрузке. По такому принципу устроен генератор переменного тока (рис. 7.29, *а*).

Если же кольца заменить на два полукольца (рис. 7.29, *б*), изолированных друг от друга и связанных каждое со своим проводником, то при вращении на щетках будет наводиться пульсирующая ЭДС одного знака (рис. 7.29, *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. 7.29, *г*).

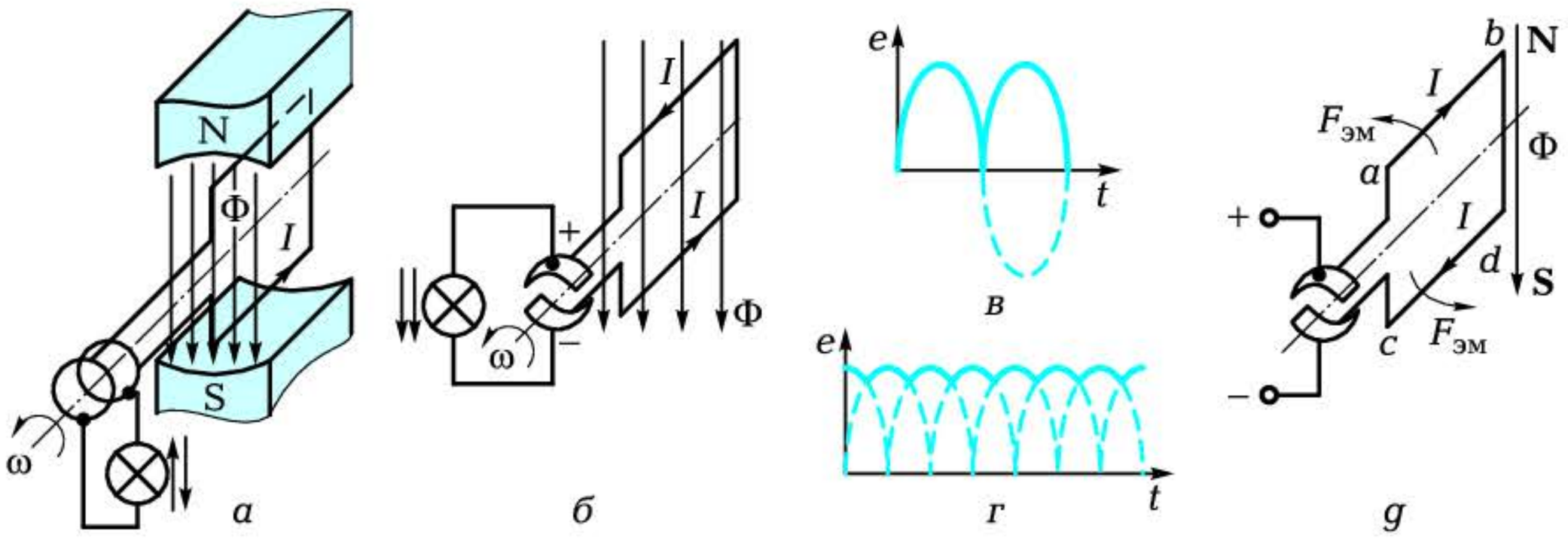


Рис. 7.29. Схемы и графики (*а—д*), поясняющие принцип получения пульсирующей ЭДС

Если же имеются n рамок и $2n$ полуколец, то ток становится практически постоянным (при $n > 16$ коэффициент пульсаций $p < 1\,\%$).

7.10.2. Конструкция и принцип действия

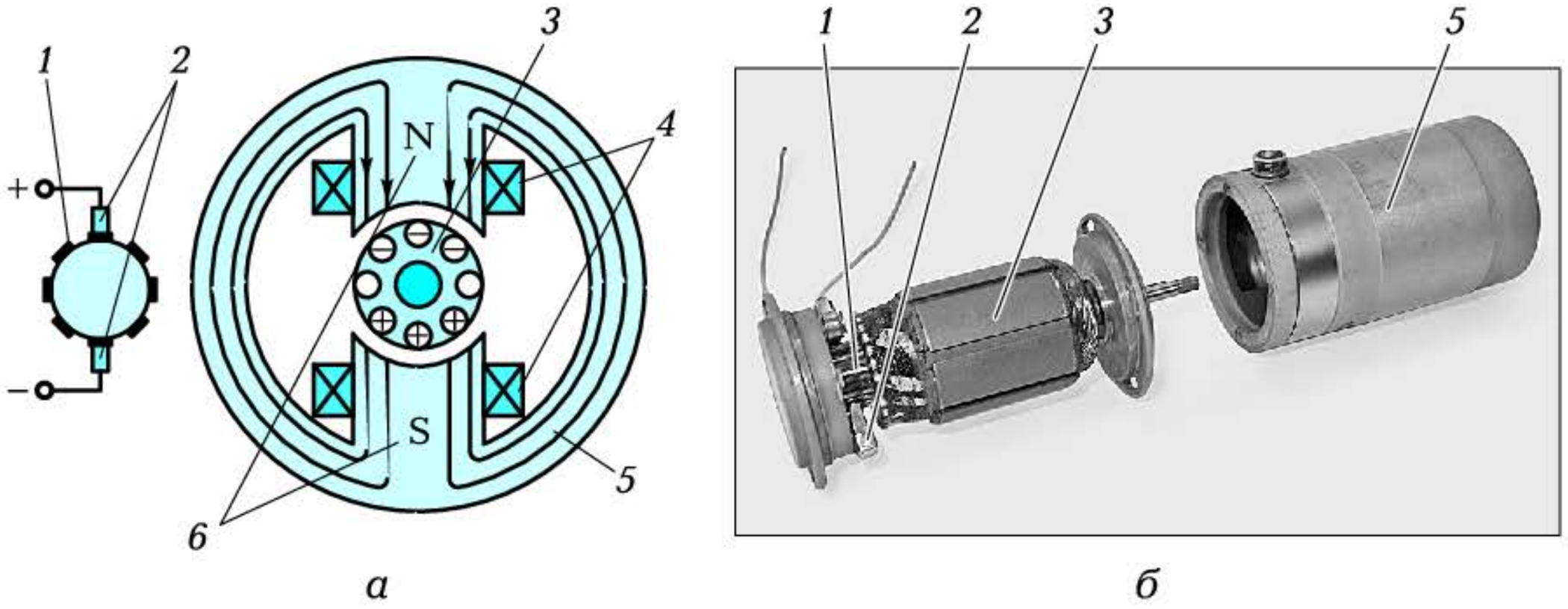
Характерной частью МПТ является коллектор — устройство, преобразующее наводимую в обмотке ротора (рамке) ЭДС переменного тока в пульсирующее напряжение на щетках при работе МПТ в режиме *генератора*.

В силу обратимости МПТ может работать в режиме *двигателя*. Для этого к щеткам необходимо подвести постоянное напряжение. В этом случае коллектор преобразует постоянный ток, подводимый к щеткам, в переменный ток в обмотке ротора. Это позволяет сохранить направление электромагнитной силы $F_{эм}$ неизменным (рис. 7.29, *g*), так как при переходе обмотки ротора из зоны полюса одной полярности (N) в зону полюса другой полярности (S) ток в проводнике также изменяет направление,

Та часть машины, в которой индуцируется ЭДС, называется *якорем*. В рассматриваемом случае роль якоря играет ротор, поэтому в МПТ ротор называют якорем.

Конструктивно МПТ (рис. 7.30, *а*) включает в себя:

- статор *5* с полюсами *6*, на которых размещена обмотка возбуждения *4*, питаемая постоянным током и создающая постоянное магнитное поле N—S;
- якорь *3* с обмоткой;
- коллектор *1* со щетками *2*.



а *б*

Рис. 7.30. Машина постоянного тока:

а — конструктивная схема; *б* — внешний вид составных частей двигателя с возбуждением от постоянных магнитов; *1* — коллектор; *2* — щетки; *3* — ротор (якорь) с обмоткой; *4* — обмотки возбуждения; *5* — статор; *6* — полюсы

Концы обмоток МПТ выводят на колодку зажимов и обозначают так:

Я1—Я2 — обмотка якоря;

Ш1—Ш2 — обмотка параллельного возбуждения (шунтовая);

С1—С2 — обмотка последовательного возбуждения (сериесная), где *1* — начала, *2* — концы обмоток.

7.10.3. ЭДС и электромагнитный момент

В соответствии с законом электромагнитной индукции в обмотках якоря при вращении наводится ЭДС $E_я = c_e \Phi n$, где c_e — конструктивный коэффициент; Φ — магнитный поток, n — частота вращения.

В генераторе эта ЭДС является первопричиной появления напряжения на щетках, которое может быть подано на нагрузку.

В двигателе ЭДС действует встречно приложенному напряжению U, уменьшая ток в обмотке якоря во время работы:

$$I_я = (U - E_я)/R_я,$$

где $R_я$ — сопротивление якоря.

Выражение для электромагнитного момента может быть получено на основе формулы Ампера. Если проводник длиной *l* с то-

ком I поместить в магнитное поле с индукцией B, то на него будет действовать сила $F_{эм} = lIB$. Отсюда

$$M_{вр} = c_м I_я \Phi_в,$$

где $c_м$ — конструктивный коэффициент; $I_я$ — ток якоря; $\Phi_в$ — магнитный поток возбуждения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нарисуйте кривые изменения ЭДС в обмотке якоря и на щетках генератора постоянного тока.
2. Какую роль играет коллектор в машине постоянного тока?
3. Запишите выражение для ЭДС и электромагнитного момента в МПТ.

7.11. ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА

7.11.1. Работа машины постоянного тока в режиме генератора

Различают следующие способы возбуждения:

- электромагнитное возбуждение;
- возбуждение от постоянных магнитов.

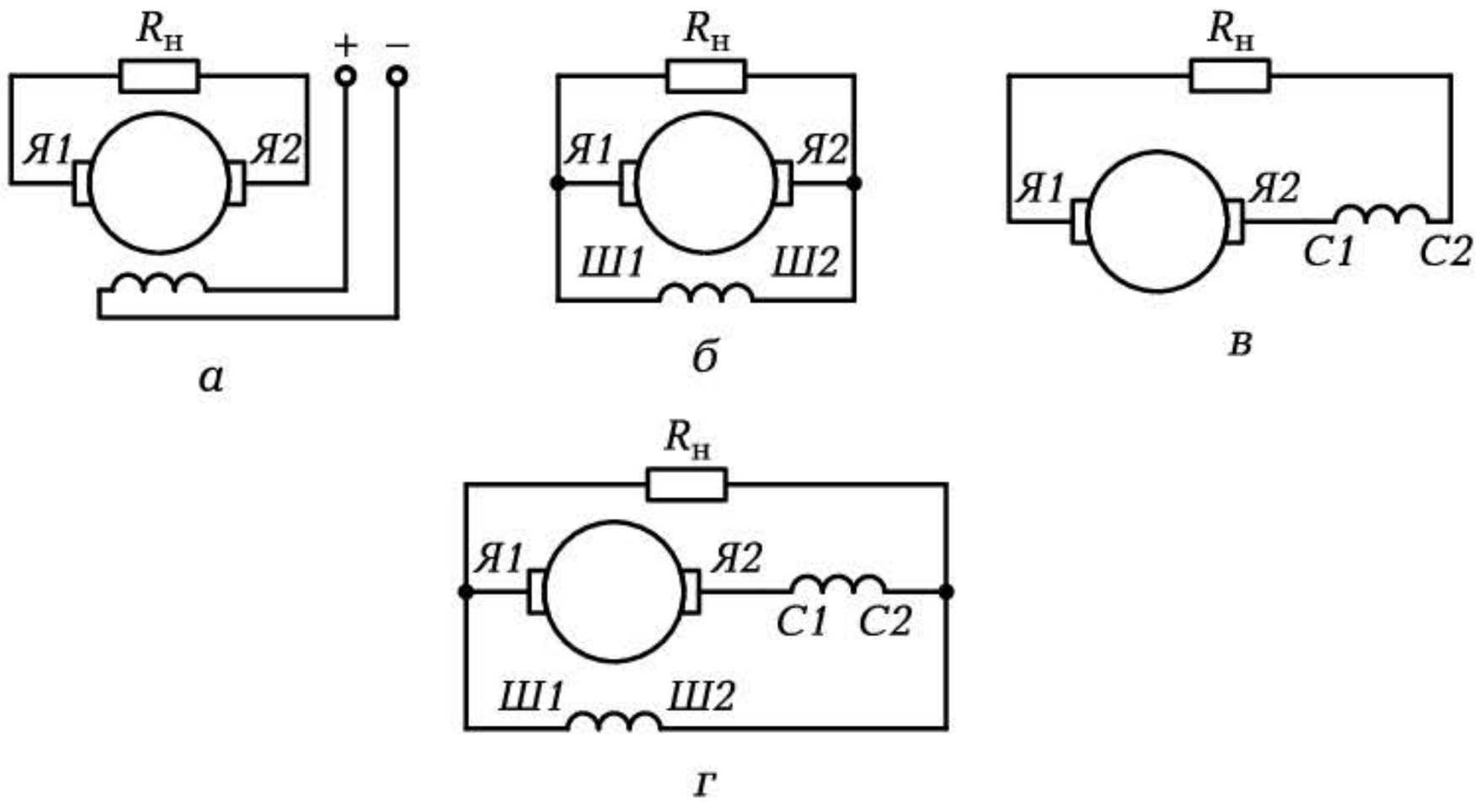


Рис. 7.31. Машины постоянного тока с возбуждением:

а — независимым; *б* — параллельным; *в* — последовательным; *г* — смешанным

В зависимости от схемы включения обмоток возбуждения МПТ могут быть (рис. 7.31):

- с независимым возбуждением;
- параллельным возбуждением (шунтовые машины);
- последовательным возбуждением (сериесные машины);
- смешанным возбуждением (компаундные машины).

Последние три машины получили название МПТ с самовозбуждением.

При подключении к зажимам генератора нагрузки $R_н$ в цепи якоря устанавливается ток $I_я$, а на выходных зажимам напряжение

$$U_я = E_я - \sum R_я I_я,$$

где $\sum R_я$ — сопротивление всех участков цепи якоря (сопротивление обмотки якоря, обмотки дополнительных полюсов, обмотки последовательного возбуждения, коллектора и щеток).

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. Величина остаточного магнитного потока $Ф_{ост}$ небольшая — около 3 % максимальной величины потока $Ф_м$.

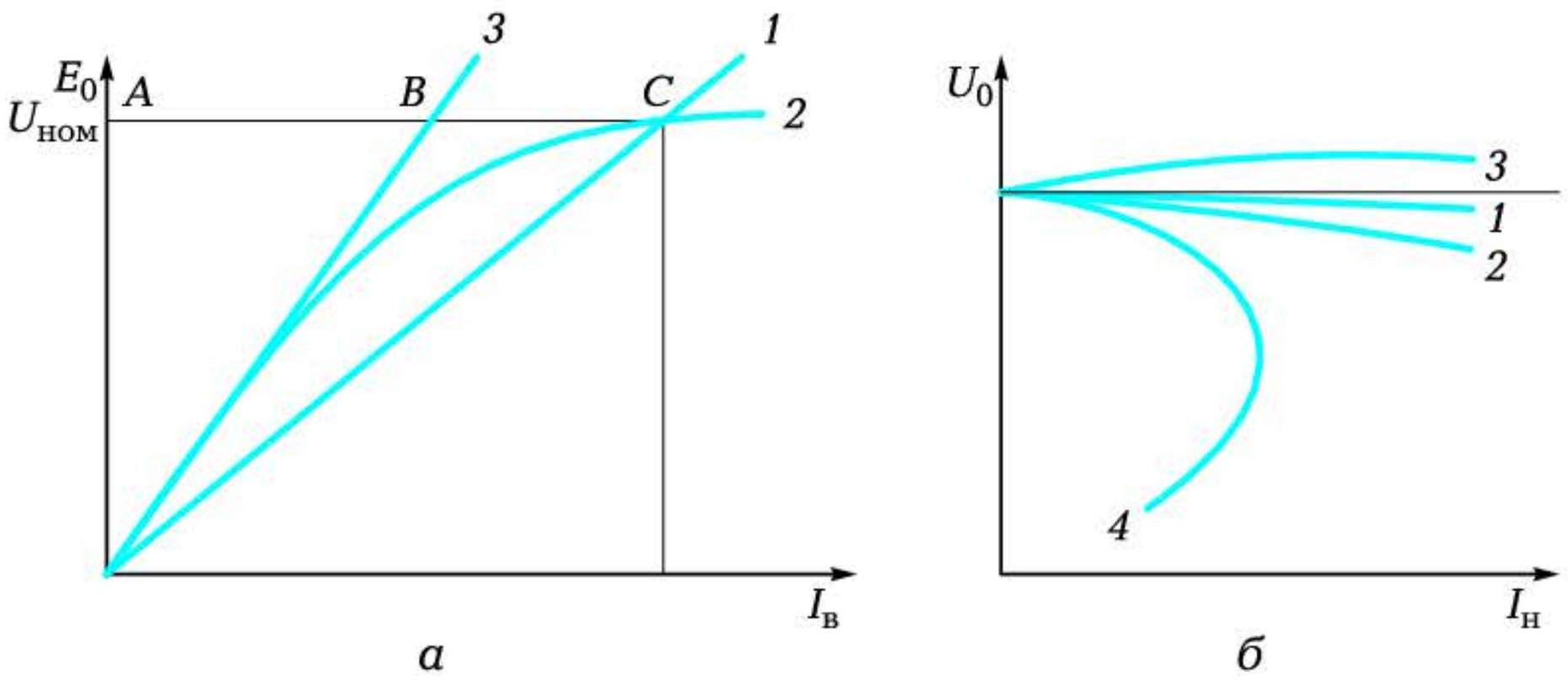


Рис. 7.32. Характеристики генератора постоянного тока:
а — холостого хода; *б* — внешние

При вращении якоря остаточный магнитный поток $\Phi_{ост}$ индуцирует в якорной обмотке ЭДС $E_{ост}$, под действием которой течет ток в обмотке возбуждения $I_{в.ост}$ и возникает намагничивающая сила $I_{в.ост}w_в$. Если эта намагничивающая сила совпадает по направлению с потоком $\Phi_{ост}$, то поток увеличивается на $\Delta\Phi$, т.е. становится равным $\Phi_{ост} + \Delta\Phi$. Это в свою очередь увеличивает ЭДС $(E_{ост} + \Delta E)$, ток $(I_{ост} + \Delta I_в)$ и т.д.

Процесс продолжается до тех пор, пока напряжение в цепи возбуждения $U_в = I_в R_в$ (прямая *1* на рис. 7.32, *а*) не уравновесит напряжение в цепи генератора U_0. Этому равновесию соответствует точка *C* на характеристике холостого хода (кривая *2* на рис. 7.32, *а*).

7.11.2. Характеристика холостого хода

Характеристика ХХ представляет собой зависимость ЭДС E_0 от тока возбуждения $I_в$: $E_0 = f(I_в)$. Она позволяет судить о магнитных свойствах генератора. По сути ее можно рассматривать как магнитную характеристику машины $\Phi_0 = f(I_в)$. Увеличение тока возбуждения ведет к увеличению магнитного потока, а следовательно, и ЭДС. Причем в начальной части, пока магнитная цепь машины не насыщена, характеристика $E_0 = f(I_в)$ близка к прямой линии (прямая *3* на рис. 7.32, *а*). Намагничивающая сила обмотки возбуждения практически равна падению магнитного потенциала в воздушном зазоре, так как магнитная индукция в ферромагнитном материале небольшая и он не насыщен. По мере роста тока возбуждения магнитная индукция на ферромагнитных участках растет, что ведет к насыщению этих участков. При этом линейный характер зависимости $E_0 = f(I_в)$ нарушается (кривая *2* на рис. 7.32, *а*).

По характеристике холостого хода можно судить о степени насыщения магнитной системы генератора. Коэффициент насыщения K_s определяется отношением AC/AB ($K_s = AC/AB$), так как отрезок AB характеризует ненасыщенную машину, у которой вся намагничивающая сила расходуется в воздушном зазоре, а отрезок BC — падение намагничивающей силы в ферромагнитной части магнитопровода.

При $K_s < 1{,}25$ машина насыщена слабо, при $K_s = 1{,}25 \ldots 1{,}75$ насыщение машины среднее, при $K_s > 1{,}75$ машина насыщена сильно.

7.11.3. Внешняя характеристика

Другой важной характеристикой генератора является его внешняя характеристика $U = f(I_н)$ при $n = \text{const}$.

Она представляет собой зависимость выходного напряжения генератора от тока нагрузки и снимается при неизменной частоте вращения n.

В зависимости от способа включения обмоток возбуждения внешняя характеристика принимает различный вид (рис. 7.32, *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.

Процентное уменьшение напряжения при переходе от холостого хода к номинальному току нагрузки определяется выражением

$$\Delta U = ((U_{\text{ном}} - E_0)/U_{\text{ном}}) \cdot 100.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные способы возбуждения генераторов постоянного тока.
2. Поясните на примере генератора суть самовозбуждения.
3. Назовите основные характеристики генератора и поясните их вид.

7.12. ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

7.12.1. 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 обмотках течет электрический ток.

Если к обмотке якоря приложить напряжение U, то в ней потечет ток. Взаимодействие тока и магнитного потока создаст электромагнитный момент, который заставит якорь вращаться. Как только он начнет вращаться (пересекать магнитное поле), в его обмотках наведется ЭДС, создающая ток, направленный навстречу току от приложенного напряжения (рис. 7.33).

Суммарный ток в якоре

$$I_{\text{я}} = (U - E_{\text{я}})/\sum R_{\text{я}}.$$

Учитывая, что $E_{\text{я}} = c_e \Phi n$, можно записать выражение для частоты вращения двигателя в виде $n = E_{\text{я}}/(c_e\Phi) = (U - I_{\text{я}}R_{\text{я}})/(c_e\Phi)$. В то же время в соответствии с формулой Ампера $M_{\text{вр}} = c_{\text{м}} I_{\text{я}} \Phi$, т. е. $I_{\text{я}} = M_{\text{вр}}/(c_{\text{м}}\Phi_{\text{в}})$. Отсюда

$$n = (U - I_{\text{я}}R_{\text{я}})/(c_e\Phi) = U/(c_e\Phi) - (R_{\text{я}}/(c_e c_{\text{м}}\Phi^2))M_{\text{вр}}.$$

Поскольку в установившемся режиме вращающий момент должен уравновешивать момент нагрузки, можно записать

$$n = U/(c_e\Phi) - (R_{\text{я}}/(c_e c_{\text{м}}\Phi^2))M_{\text{н}} = n_0 - \Delta n.$$

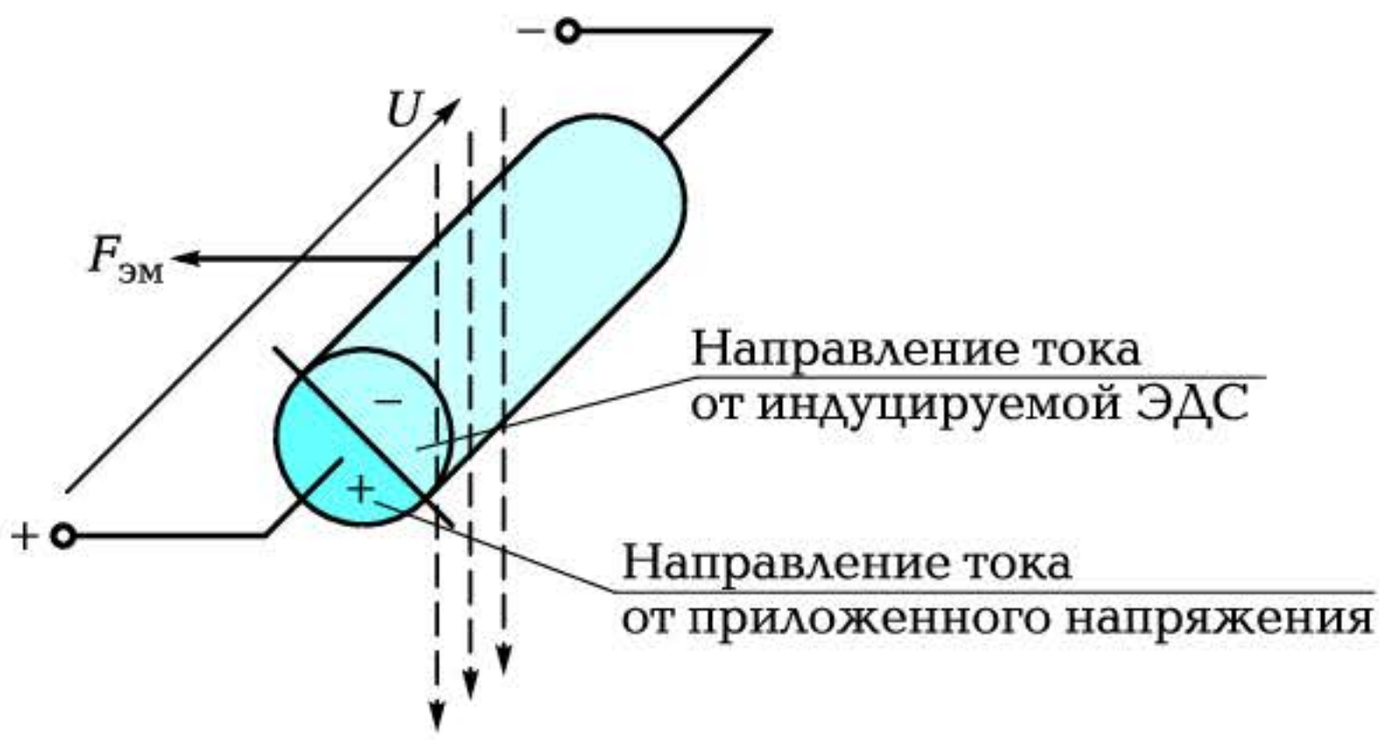


Рис. 7.33. Токи в проводнике якоря двигателя постоянного тока

Полученное выражение описывает механическую характеристику двигателя постоянного тока $n = f(M_н)$, которая отражает зависимость частоты вращения ротора от момента нагрузки на его валу.

Из нее следует, что при увеличении нагрузки частота вращения ротора падает незначительно. Действительно, сопротивление $R_я$ невелико, поэтому второе слагаемое Δn выражения составляет (3...7) % от $n_0 = U/(c_e\Phi)$.

Двигатель постоянного тока (ДПТ) обладает сравнительно жесткой естественной механической характеристикой.

7.12.2. Регулирование частоты вращения

Механическая характеристика двигателя постоянного тока показывает, что регулирование частоты его вращения возможно за счет:

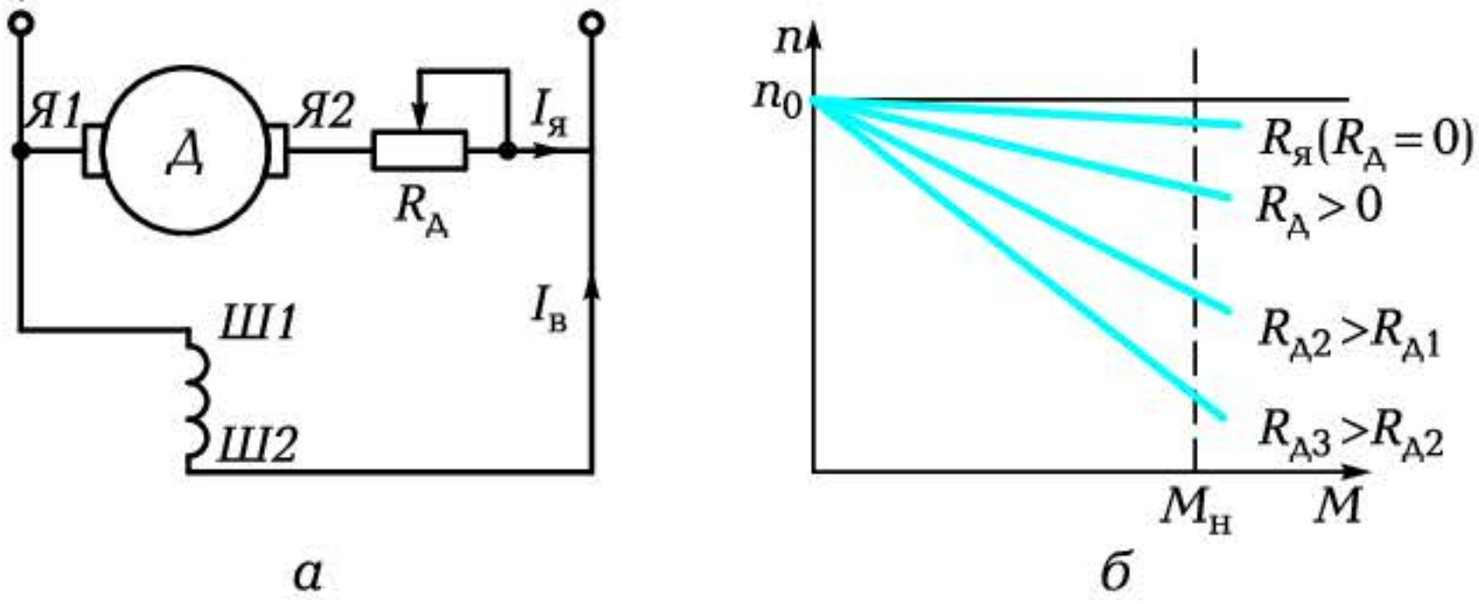


Рис. 7.34. Реостатное регулирование частоты вращения:
а — схема регулирования; *б* — механические характеристики

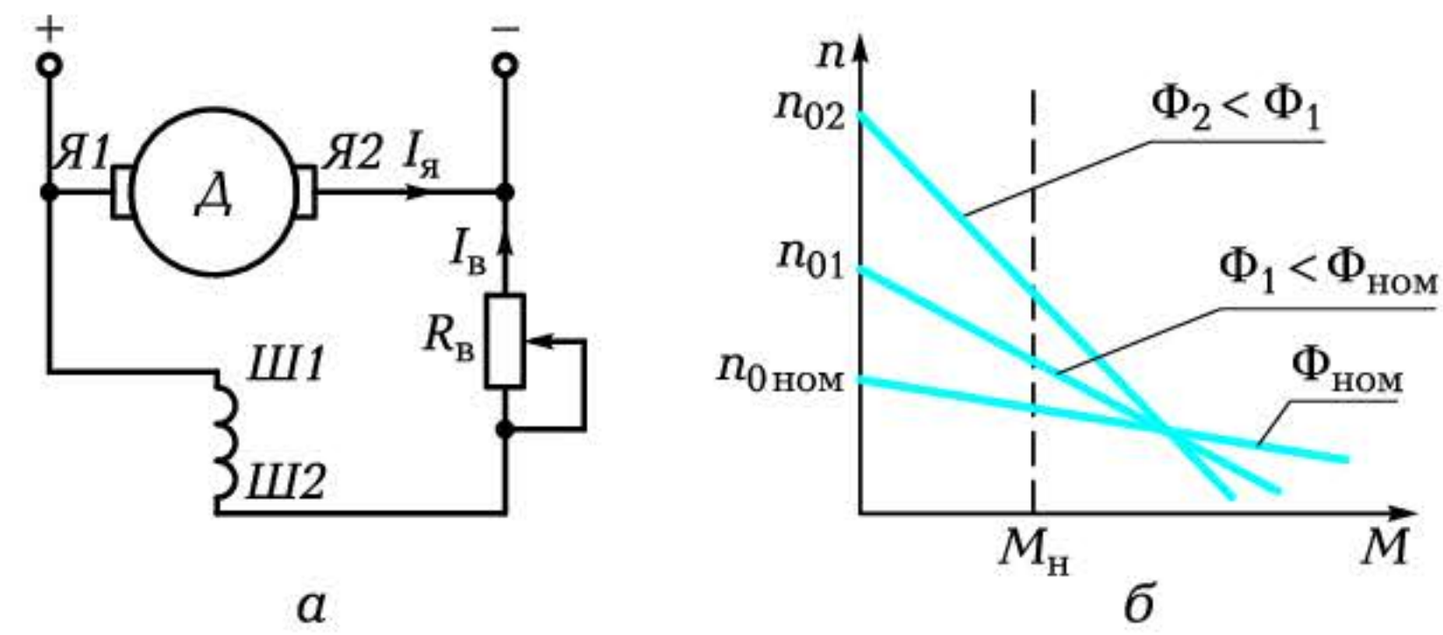


Рис. 7.35. Полюсное регулирование частоты вращения:
а — схема регулирования; *б* — механические характеристики

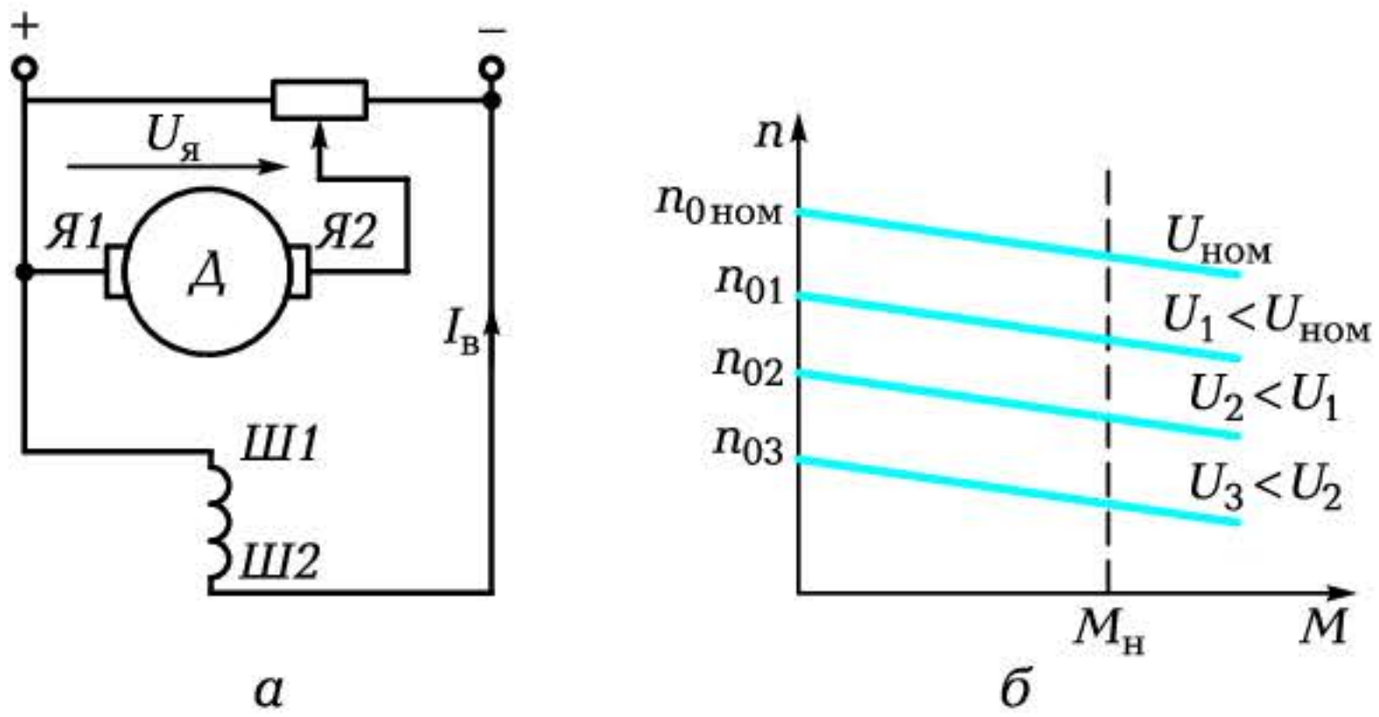


Рис. 7.36. Якорное регулирование частоты вращения:
а — схема регулирования; *б* — механические характеристики

- изменения сопротивления в цепи якоря ($R_я + R_д$) — *реостатное регулирование* (рис. 7.34, *а*). При этом слагаемое n_0 остается неизменным, а Δn изменяется в широких пределах (рис. 7.34, *б*);
- изменения потока возбуждения Ф — *полюсное регулирование* (рис. 7.35, *а*). При этом изменяется как n_0, так и Δn (рис. 7.35, *б*). Полюсное регулирование является достаточно экономичным, поскольку управление магнитным потоком возбуждения Ф осуществляется за счет изменения тока возбуждения $I_в$, значение которого невелико;
- изменения напряжения питания якорной обмотки — *якорное регулирование* (рис. 7.36, *а*). При этом поток возбуждения должен оставаться неизменным, т. е. двигатель должен быть с независимым или параллельным возбуждением. Частота вращения двигателя практически линейно зависит от напряжения питания якорной обмотки $U_я$ (рис. 7.36, *б*).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит принцип работы двигателя постоянного тока?
2. Какую роль играет коллектор в двигателе постоянного тока?
3. Перечислите основные способы возбуждения ДПТ.
4. Что собой представляет механическая характеристика двигателя?
5. Назовите способы регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока.

7.13. ОСОБЕННОСТИ ПУСКА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ДВИГАТЕЛЬ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ И УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

7.13.1. Пуск двигателя и роль пускового реостата

Поскольку ток якоря определяется выражением

$$I_я = (U - E_я)/R_я = (U - c_e\Phi n)/R_я,$$

то в момент пуска при $n = 0$ пусковой ток $I_{я.п}$ равен

$$I_{я.п} = U/R_я.$$

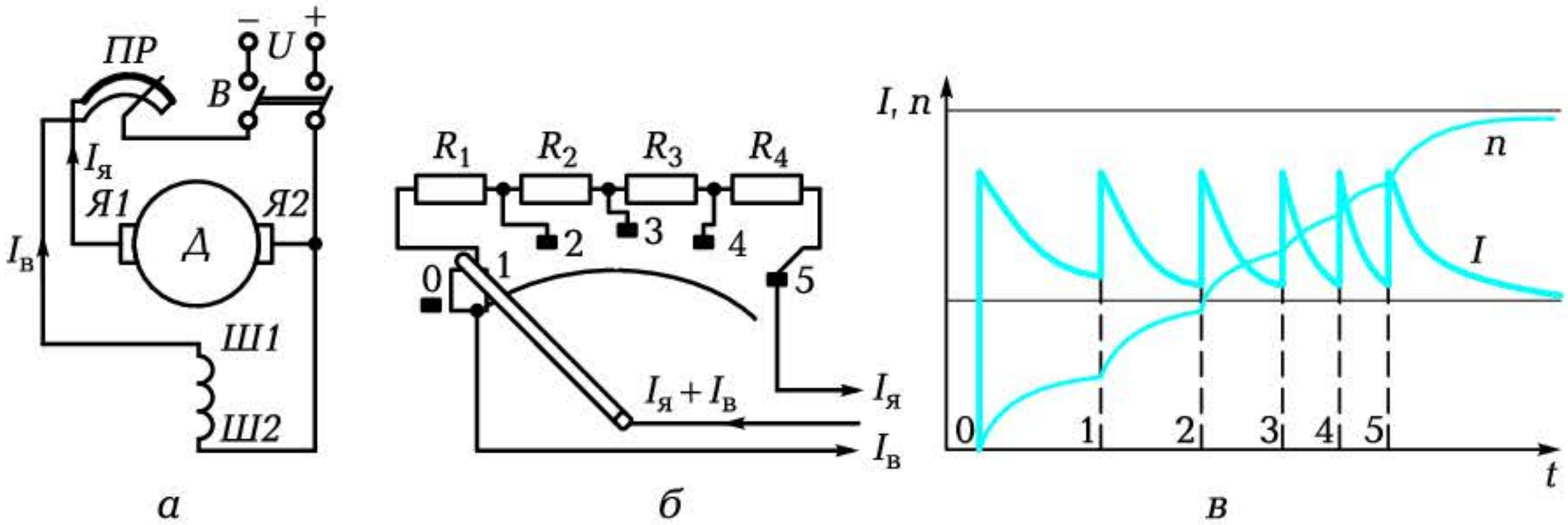
Сопротивление обмотки якоря небольшое, поэтому пусковой ток может превышать номинальный в 20...50 раз. Это снижает надежность работы двигателя, в первую очередь коллекторно-щеточного устройства. Огромные токи приводят и к перегреву якорной обмотки, а также ведут к резкому возрастанию вращающего момента, оказывающего ударное действие на вращающиеся части.

Для ограничения пускового тока на время пуска в якорную цепь вводят реостат. В этом случае

$$I_{я.п} = U/(R_я + R_{п.р}).$$

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 до номинальной частоты вращения ток якоря вновь определяется выражением $I_я = (U - E_я)/R_я$.

На рис. 7.37, *а* приведена схема включения двигателя с пусковым реостатом *ПР*, а на рис. 7.37, *б* — схема пускового реостата. Перед включением двигателя в сеть пусковой реостат устанавливают в положение «0». При этом в цепь якоря включаются дополнительно резисторы с общим сопротивлением $R_1 + R_2 + R_3 + R_4$. По мере разгона двигателя и уменьшения тока пусковой реостат последовательно переводят в положения 1, 2, 3, 4 и, наконец, в поло-



а б в

Рис. 7.37. Пуск двигателя постоянного тока:

а — схема включения пускового реостата; *б* — схема пускового реостата; *в* — временна́я диаграмма изменения тока якоря и частоты вращения при пуске

жение 5. Значение сопротивления дискретно уменьшается вплоть до нуля. Ток и частота вращения достигают номинального значения.

На рис. 7.37, *в* приведены кривые изменения тока якоря I и частоты вращения n при пуске.

7.13.2. 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. 7.38).

Следовательно, поток возбуждения пропорционален току якоря $\Phi_в = кI_я$. В этом случае вращающий момент пропорционален току якоря в квадрате:

$$M_{вр} = c_м \Phi_в I_я = к_1 I_я^2,$$

т.е. плавное увеличение тока якоря ведет к довольно резкому увеличению вращающего момента. В то же время

$$n = E_я / c_e \Phi_в = к_2 / I_я,$$

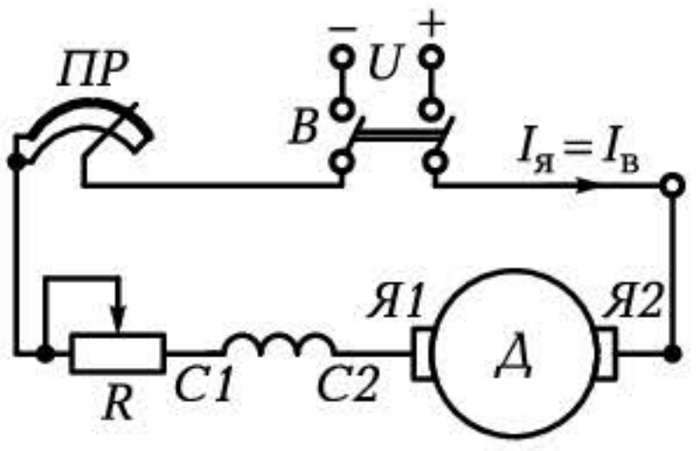


Рис. 7.38. Схема включения двигателя с последовательным возбуждением

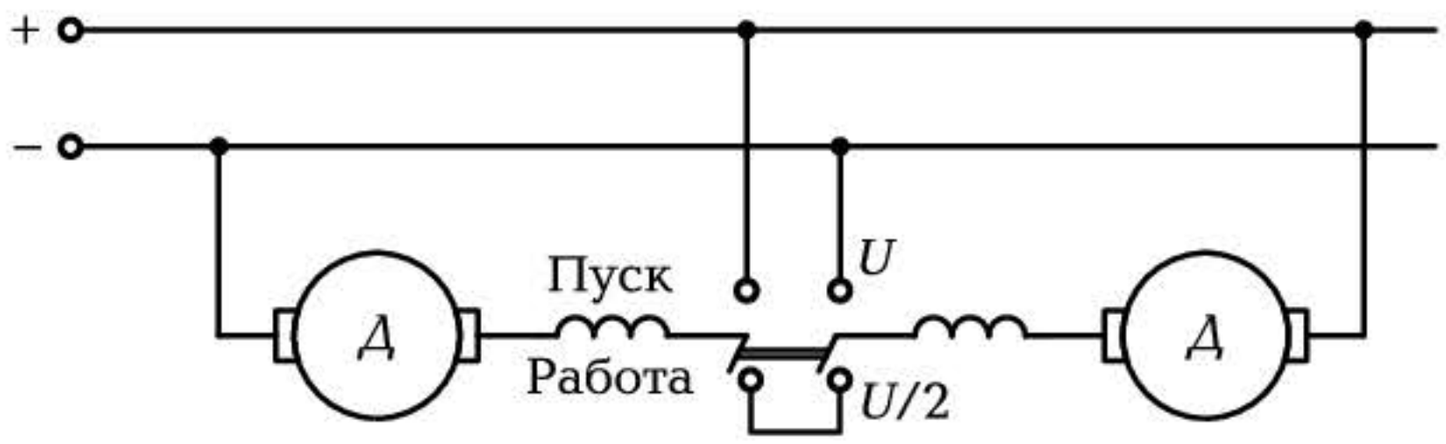


Рис. 7.39. Схема включения двигателей в моторном вагоне трамвая

т. е. частота вращения ротора обратно пропорциональна току якоря.

Таким образом, чем больше нагрузка, тем больше должен быть вращающий момент $M_{вр}$, а следовательно, больше ток якоря $I_я$ и меньше частота вращения ротора n. Если нагрузка отсутствует, то момент $M_{вр}$ небольшой, ток $I_я$ маленький, а частота n стремится к бесконечности (двигатель может идти в «разнос»). Таким образом, при небольшом моменте нагрузки ток якоря мал, а частота вращения значительна.

Поэтому именно ДПТ с последовательным возбуждением является основным приводным двигателем транспортных устройств. При трогании с места момент нагрузки велик, ток должен быть большим, а частота вращения мала. После разгона транспортного устройства момент нагрузки мал, ток якоря невелик, а частота вращения значительна.

Обычно в моторном вагоне трамвая устанавливаются два двигателя с последовательным возбуждением (рис. 7.39). При пуске их включают параллельно под полное напряжение U (*момент пусковой большой*), а после разгона — последовательно под половинное напряжение $U/2$ (*момент во время движения невелик*).

7.13.3. 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 вращающий момент $M_{вр}$ сохраняет свое направление, так как одновременно изменяются направления магнитного потока $\Phi_в$ и тока якоря $I_я$:

$$M_{вр} = c_м \Phi_в I_я = c_м (-\Phi_в)(-I_я).$$

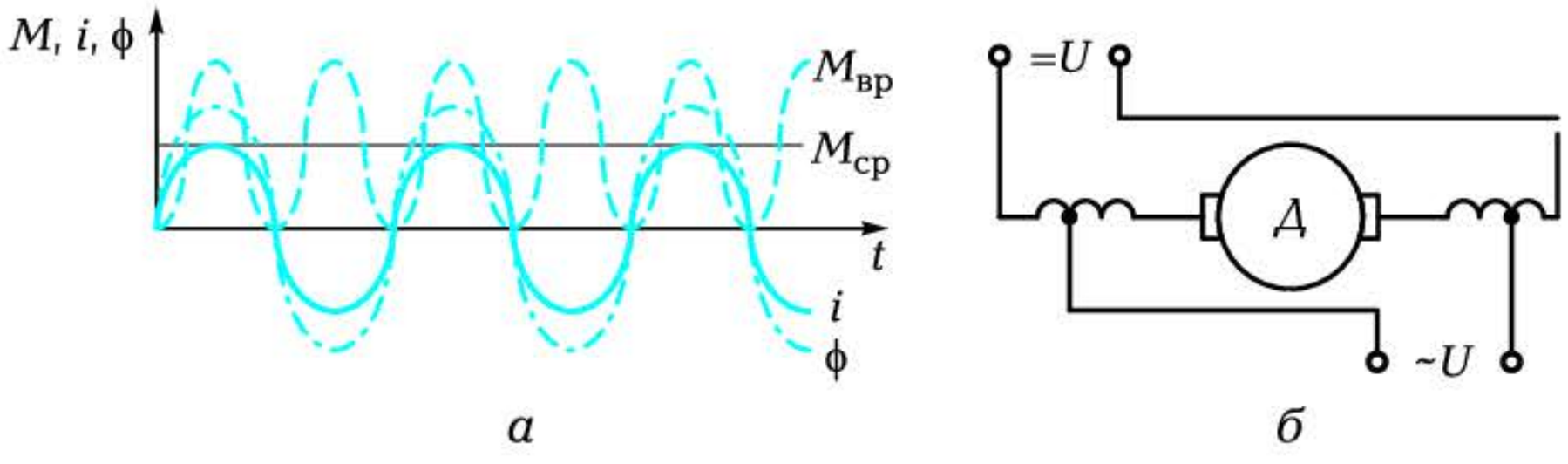


Рис. 7.40. Универсальный коллекторный двигатель:
а — временна́я диаграмма; *б* — схема включения в сети постоянного и переменного тока

При этом момент на валу равен среднему моменту $M_{ср}$ за период (рис. 7.40, *а*), поскольку из-за своей инерционности ротор не в состоянии реагировать на мгновенное значение $M_{вр}$, изменяющееся с частотой 100 Гц.

Таким образом, двигатель, аналогичный двигателю постоянного тока, 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 такого двигателя приведена на рис. 7.40, *б*. При работе на переменном токе под напряжение включается часть обмотки возбуждения, а на постоянном — вся обмотка. Это делается для сближения характеристик на постоянном и переменном токе. Недостаток универсальных коллекторных двигателей — повышенный износ коллекторного устройства со щетками.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем особенности пуска двигателя постоянного тока?
2. Какова роль пускового реостата?
3. В чем особенности двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением и где он нашел основное применение?
4. Что характерно для универсальных коллекторных двигателей?

Глава 8

ПРОИЗВОДСТВО И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

8.1. ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

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 электропередач* и *потребители* электрической энергии (нагрузка).

Таким образом, для подвода электроэнергии к нагрузке необходимо ее произвести, передать и распределить между отдельными потребителями.

Бóльшая часть производимой электрической энергии вырабатывается с помощью электромашинных генераторов, первичным (приводным) двигателем которых может быть:

- паровая турбина — тепловые и атомные электростанции;
- гидравлическая турбина — гидравлические электростанции.

В качестве электромашинного генератора в этом случае используется синхронная машина, ротор которой связан с валом турбины. В зависимости от приводного двигателя конструктивная схема синхронного генератора может быть различной. Если для паровой турбины частота вращения достигает 3 000 об/мин, то для гидравлической турбины она не превышает 100 об/мин. Поэтому для получения напряжения промышленной частоты 50 Гц *турбогенератор* должен быть быстроходной двухполюсной машиной с неявно выраженными полюсами. *Гидрогенератор* — это тихоходная многополюсная (до 100 полюсов) машина с явно

выраженными полюсами. Об этом мы уже говорили в подразд. 7.8.3.

Соответствующим образом выполняется и конструкция ротора. Если у турбогенератора диаметр ротора около 1 м при длине до 10 м, то у гидрогенератора диаметр ротора может достигать 20 м при длине до 5 м. Поэтому турбогенератор устанавливается горизонтально, а гидрогенератор устанавливается вертикально.

В *автономных электростанциях* в качестве приводного двигателя может использоваться двигатель внутреннего сгорания. Эти электростанции используются в отдаленных труднодоступных местах или там, где отсутствует электричество: в геологоразведочных экспедициях, на стоянках оленеводов, на дачах и т. д.

Кроме того, 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 две большие группы:

- возобновляемые;
- невозобновляемые.

К невозобновляемым относится 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 невозобновляемых видов энергии расточительно с точки зрения будущих поколений, но именно тепловые электростанции обеспечивают сегодня производство большей части электроэнергии в мире — около 63 %. Это обусловлено тем, что помимо производства электрической энергии они способны снабжать города и поселки теплом и горячей водой. Такие электростанции получили название *теплоэлектроцентралей* (ТЭЦ). Их коэффициент полезного действия может достигать 70 %. Располагаются они в непосредственной близости от населенных пунктов.

Мощные тепловые электростанции, рассчитанные на производство лишь электрической энергии, строятся, как правило, вблизи значительных залежей природных ресурсов, обеспечивающих их работу в течение десятилетий (например, Экибастузская тепловая электростанция). Их коэффициент полезного действия обычно не превышает 30 %.

Атомные электростанции (АЭС) также относятся к тепловым электростанциям. Они тоже преобразуют энергию водяного

пара в механическую энергию паровой турбины, которая вращает ротор генератора, вырабатывающего электрическую энергию. Разница заключается лишь в характере топлива. В АЭС топливом служит радиоактивный уран 235, обеспечивающий управляемую цепную реакцию в атомном реакторе. В процессе деления ядер урана выделяется огромное количества 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 на лопасти турбины. Чем больше напор и объем воды через турбину, тем больше мощность электростанции. Поэтому чаще ГЭС строятся на реках с большим перепадом уровней (Чуйская, Туруханская, Саяно-Шушенская). 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 последующее производство электроэнергии обходится значительно дешевле, так как не требует расходов на доставку 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 производства электроэнергии на ГЭС 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 *нетрадиционные 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 Германии сегодня около 100 тыс. солнечных крыш, а в США — более 1,5 млн.

Ветряные электростанции используют энергию ветра, преобразуя ее в электрическую с помощью специальных ветряных лопастей. Их применение 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. 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 более 4 м. Первая приливная электростанция была построена во Франции в устье реки Рона в 1966 г. Ее мощность состав-

ляет 240 МВт. В России первая опытная приливная электростанция мощностью 800 кВт была построена в 1968 г. в Баренцевом море в губе Кислая. 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 других странах. В будущем ПЭС могут обеспечить до 15 % всей потребляемой электроэнергии.

Электростанции, использующие энергию морских волн, уже многие десятки лет эксплуатируются во многих странах. Схемы их различны. Основу наиболее совершенной составляет «кивающая утка» — платформа, настроенная на длину морской волны. Волны обладают большей удельной мощностью, чем ветер и солнце. Гольфстрим, например, способен отдать мощность порядка 50 ГВт.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие электростанции сегодня в основном используются для получения электрической энергии?
2. Чем отличаются тепловые электростанции от теплоэлектроцентралей?
3. Какие преимущества и недостатки присущи гидравлическим электростанциям?
4. Перечислите возможные нетрадиционные возобновляемые источники энергии.

8.2. ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

8.2.1. Передача электрической энергии

После того как электрическая энергия произведена, ее необходимо передать потребителям.

Поскольку от источника к потребителю передается не просто напряжение или ток, а мощность, то выгодно с экономической точки зрения передавать ее при максимально возможном напряжении. При этом передаваемый ток будет минимален, а следовательно, будут минимальными электрические потери в проводах, вызывающие их нагрев. Поскольку электрические потери пропорциональны квадрату тока, то повышение напряжения, например вдвое, уменьшает ток вдвое, а потери в проводах сокращаются

при этом в 4 раза. Сегодня передача электроэнергии большой мощности от удаленных источников осуществляется при напряжениях до 1 150 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 (свыше 330 кВ).

В зависимости от способа передачи электроэнергии линии передач подразделяются на линии:

- воздушные;
- кабельные.

Опоры воздушных линий могут быть деревянными, железобетонными или металлическими. Чем выше передаваемое напряжение, тем большее расстояние должно быть между опорами. Провода на опорах крепятся либо на штыревых изоляторах (сеть НН), либо на подвесных, собранных в гирлянды (СН, ВН, СВН). В линиях передачи используются алюминиевые многожильные неизолированные провода, а также провода, имеющие стальную сердцевину, вокруг которой навивается алюминиевая проволока — сталеалюминиевые 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 линию электропередачи (ЛЭП) от атмосферного электричества, являясь одновременно нулевым проводом.

На рис. 8.1 приведен вид опор высоковольтной ЛЭП.

Высоковольтная ЛЭП является источником мощных электромагнитных излучений, поэтому строительство зданий, дач, сельскохозяйственных комплексов вблизи таких линий передач должно быть запрещено.

Кабельные линии передач являются более трудоемкими и в изготовлении, и в обслуживании. Они допускают прокладку кабелей напряжением не свыше 220 кВ. При напряжении до 35 кВ прокладка выполняется трехжильным кабелем соответствующего сечения.



Рис. 8.1. Опоры высоковольтной ЛЭП

Жилы надежно изолированы друг от друга и имеют защитные оболочки и стальную броню для защиты от механических повреждений. При напряжении свыше 35 кВ используются одножильные кабели 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, сельское хозяйство, военно-промышленный комплекс, 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 и 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 и просто обеспечивается перераспределение энергии между потребителями, а также суточное, сезонное и аварийное регулирование. Ныне действующая ЕЭЭС включает в себя около 1 000 электростанций общей мощностью около 300 ГВт, расположенных на территории 16 европейских стран.

Если в промышленности, на транспорте, в строительных организациях, как правило, используется энергия переменного тока напряжением в несколько киловольт, то в быту требуется напряжение 220 или 380 В. Следовательно, должны существовать распределительные подстанции, обеспечивающие потребителей необходимым по величине напряжением. В цепочке источник — потребитель таких распределительных подстанций может быть несколько.

Существующие генераторы имеют на выходе напряжение всего лишь в несколько киловольт (обычно 6 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 подстан-

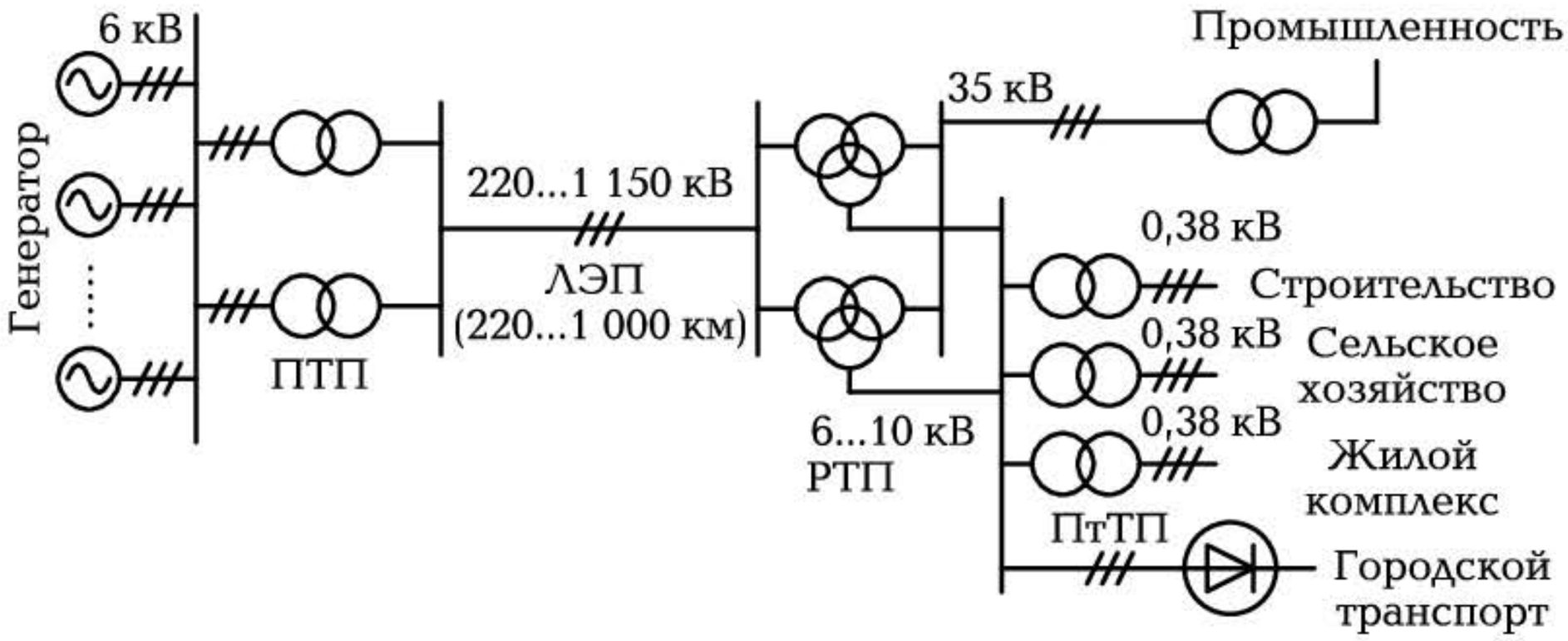


Рис. 8.2. Схема передачи электроэнергии от производителей к потребителям:

ПТП — повышающие трансформаторные подстанции; ЛЭП — линия электропередачи; РТП — районные трансформаторные подстанции; ПтТП — потребительские трансформаторные подстанции

ций (ПтТП), размещаемых вблизи потребителей. От районных до потребительских ТП передача энергии осуществляется, как правило, по электрическим кабелям, проложенным в земле. Городской транспорт в большинстве случаев использует энергию постоянного тока, поэтому в цепи передачи электроэнергии стоят мощные выпрямительные устройства (рис. 8.2).

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 народнохозяйственной задачей. В последнее время, когда число потребителей электроэнергии в промышленности и в быту растет, а производство электроэнергии развивается более медленными темпами, вопросы экономии электроэнергии становятся особенно важными.

В промышленности главное внимание уделяется повышению коэффициента мощности $\cos\varphi$, что сводит к минимуму потребляемую предприятиями реактивную мощность, 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

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. Опыт внедрения подобной системы в нашей стране в 1980-х гг. (Протвино Московской области) дал существенные результаты по экономии электроэнергии. Установка в домах современных еврокон также направлена на экономию электричества, используемого в холодное время на обогрев жилья.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как делятся электрические сети по величине напряжения?
2. Почему запрещено строительство домов, дачных участков, сельскохозяйственных комплексов вблизи высоковольтных ЛЭП?
3. Дайте понятие единой электроэнергетической системы.
4. Назовите основные преимущества, связанные с экономией электроэнергии в промышленности и в быту.

Приложения

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Основные электрические единицы

Измеряемая величина		Базовое выражение	Единица измерения	
Наименование	Обозначение		Наименование	Обозначение
Заряд электрический	q	—	кулон	Кл
Сила тока: постоянного	I	q/t	ампер	А
переменного	i	$i = \Delta q/\Delta t$		
Плотность тока	j	$j = I/s$	ампер на квадратный метр	$А/м^2$
Потенциал	φ	—	вольт	В
Напряжение электрическое: постоянного тока переменного тока:	U	$U = \varphi_1 - \varphi_2$	вольт	В
мгновенное	u	$u = U_m \sin \omega t$		
максимальное	U_m			
действующее	U	$0{,}707 U_m$		

Электродвижущая сила	e, E_m, E	$e = -\Delta\Phi/\Delta t$	вольт	В
Сопротивление электрическое:				
активное	R	$R = \rho l/s$	ом	Ом
реактивное	X	$X_L - X_C$		
полное	Z	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$		
Проводимость:				
активная	g	$g = R/Z^2$	сименс	См
реактивная	b	$b = X/Z^2$		
полная	y	$y = \sqrt{g^2 + b^2}$		
Сопротивление электрическое удельное	ρ	—	ом-метр	Ом · м
Мощность:				
активная	P	$P = UI\cos\varphi$	ватт	Вт
реактивная	Q	$Q = UI\sin\varphi$	вар	вар
полная	S	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	вольт-ампер	В · А
Угол сдвига фаз между напряжением и током	φ	—	градус	°
Коэффициент мощности	$\cos\varphi$	$\cos\varphi = P/S$	—	—

Окончание прил. 1

Измеряемая величина		Базовое выражение	Единица измерения	
Наименование	Обозначение		Наименование	Обозначение
Емкость	C	$C = q/U = \varepsilon_a s/d$	фарад	Ф
Электрическая постоянная	ε_0	$\varepsilon_0 = 8{,}86 \cdot 10^{-12}$	фарад на метр	Ф/м
Диэлектрическая проницаемость:				
абсолютная	ε_a	$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon$	фарад на метр	Ф/м
относительная	ε	—	—	—
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	μ_0	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	генри на метр	Гн /м
Магнитная проницаемость:				
абсолютная	μ_a	$\mu_a = \mu_0 \mu$	генри на метр	Гн /м
относительная	μ	—	—	—
Индуктивное сопротивление	X_L	$X_L = \omega L$	ом	Ом
Индукция магнитная	B	$B = \Phi/S$	тесла	Тл
Напряженность магнитная	H	$H = B/\mu_a$	ампер на метр	А/м
Намагничивающая (магнитодвижущая) сила	$F_м$	$F_м = Iw$	ампер	А

Число витков	w	—	—	—
Магнитный поток	Φ	$Iw/R_м$	вебер	Вб
Потокосцепление	ψ	Φw	вебер	Вб
Напряжение магнитное	$U_м$	$U_м = Hl$	ампер	А
Сопротивление магнитное	$R_м$	$R_м = l/(\mu_a s)$	генри в минус первой степени	$Гн^{-1}$
Коэффициент трансформации	κ_{21}	$\kappa_{21} = w_2/w_1$	—	—
Сила электромагнитная	$F_{эм}$	$F_{эм} = c_м Bl$	ньютон	Н
Частота колебаний:				
угловая	ω	$\omega = 2\pi f$	радиан в секунду	1/с
циклическая	f	$1/T$	герц	Гц
Период	T	—	секунда	с
Число пар полюсов	p	—	—	—
Синхронная скорость	n_1	$60f/p$	обороты в минуту	об/мин
Скольжение	S	$(n_1 - n)/n_1$	—	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Обозначение кратных и дольных единиц измерения

Множитель	Приставка	Обозначения		Множитель	Приставка	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}	милли	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 3

Удельное электрическое сопротивление и температурный коэффициент сопротивления основных электротехнических материалов

Материал проводника	Удельное электрическое сопротивление ρ, Ом · мм^2/м	Температурный коэффициент сопротивления α, 1/°С	Материал проводника	Удельное электрическое сопротивление ρ, Ом · мм^2/м	Температурный коэффициент сопротивления α, 1/°С
Серебро	0,016	0,004	Сталь	0,12	0,006
Медь	0,0175	0,004	Манганин	0,42	0,000006
Алюминий	0,029	0,004	Константан	0,48	0,00004
Вольфрам	0,056	0,005	Нихром	1,1	0,0001
Платина	0,1	0,004	Фехраль	1,4	0,0002

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Среднее значение относительной диэлектрической проницаемости ε основных электротехнических материалов

Материал	ε	Материал	ε
Воздух	1	Текстолит	7
Масло трансформа-торное	2,2	Стекло	8
Бумага	3,5	Шифер	10
Слюда	5	Спирт	33
Фарфор	6	Вода	81

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Простая неразветвленная электрическая цепь

Пример расчета

Пусть дана электрическая цепь с перечнем необходимых параметров (рис. П1):

$$R_1 = R_2 = R_8 = 20 \text{ Ом};\ R_3 = R_4 = R_5 = R_{12} = 30 \text{ Ом};\ R_6 = R_9 = R_{13} = 40 \text{ Ом};$$
$$R_7 = 10 \text{ Ом};\ E = 2 \text{ В};\ r_0 = 1 \text{ Ом}.$$

Найти ток через резистор *R4* и мощность, рассеиваемую резистором *R4*.

Расчеты выполняем в соответствии с алгоритмом, приведенным в подразд. 1.1.3.

Р е ш е н и е.

1. Эквивалентное сопротивление нагрузки ЭЦ

$$R_э = 1/(1/R_1 + 1/R_2) + R_9 + 1/(1/R_7 + 1/R_8) + R_{12} + R_{13} + 1/(1/R_3 + 1/R_4 + 1/R_5) + R_6 = 10 + 40 + 6{,}66 + 30 + 40 + 10 + 40 = 176{,}66 \text{ Ом}.$$

2. Эквивалентная ЭДС источника питания

$$E_э = E = 2 \text{ В}.$$

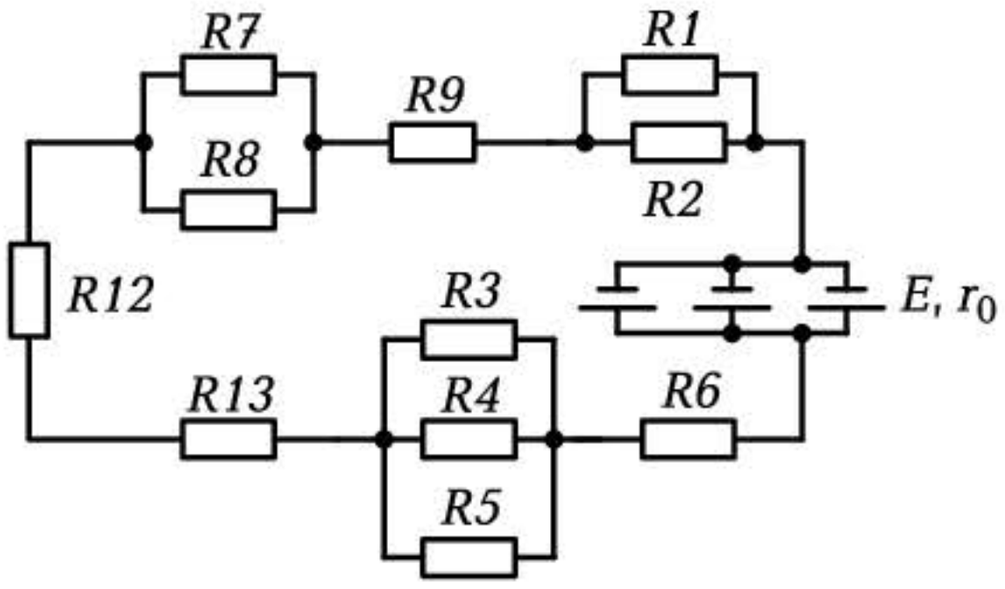


Рис. П1. Схема простой электрической цепи

3. Эквивалентное внутреннее сопротивление источника питания

$$r_{0э} = 1/(1/r_0 + 1/\ r_0 + 1/r_0) = 0{,}33 \text{ Ом}.$$

4. Полный ток, потребляемый ЭЦ,

$$I = E_э/(R_э + r_{0э}) = 2/(176{,}66 + 0{,}33) = 0{,}011 \text{ А}.$$

5. Падение напряжения на резисторах *R3*, *R4* и *R5*

$$U_{3\text{-}4\text{-}5} = I\frac{1}{1/R_3 + 1/R_4 + 1/R_5} = 0{,}011 \cdot 10 = 0{,}11 \text{ В}.$$

6. Ток I_4 через резистор *R4*

$$I_4 = U_{3–4–5}/R_4 = 0{,}11/30 = 0{,}0037 \text{ А}.$$

7. Мощность рассеяния P_4 на резисторе *R4*

$$P_4 = I_4^2 R_4 = 0{,}0037^2 \cdot 30 = 0{,}0004 \text{ Вт}.$$

О т в е т

Ток через резистор *R4* равен 3,7 мА; мощность рассеяния — 0,4 мВт.

На этом расчет ЭЦ завершается, однако по предложению преподавателя или при желании учащиеся могут выполнить остальные пункты алгоритма, например проверить правильность расчетов, используя закон сохранения энергии $P_{ист} = P_{потр} + P_{вн.ист}$:

$$E_э I = I^2(R_{1–2} + R_9 + R_{7–8} + R_{12} + R_{13} + R_{3–4–5} + R_6) + I^2 r_{0э} = I^2 R_э + I^2 r_{0э};$$
$$2 \cdot 0{,}011 = 0{,}011^2(176{,}66 + 0{,}33); \quad 0{,}022 \text{ Вт} = 0{,}0214 \text{ Вт}.$$

Таким образом, погрешность расчета составляет

$$(P_{ист} - (P_{потр} + P_{вн.ист})) \cdot 100/P_{ист} = (0{,}022 - 0{,}0214) \cdot 100/0{,}022 = 2{,}7\ \%,$$

что вполне допустимо.

Разветвленная электрическая цепь

Пример расчета

Для ЭЦ, приведенной на рис. П2, известны номиналы сопротивлений и ЭДС источников питания.

Найти токи в ветвях, используя метод контурных токов.

Расчеты выполняем в последовательности, приведенной в подразд. 1.5.3:

1) чертим схему ЭЦ;

2) наносим на схеме условно-положительные направления контурных токов (I_{I}, I_{II}) и токов в ветвях (I_1, I_2, I_3);

3) используя метод контурных токов, записываем для контурных токов уравнения согласно второму закону Кирхгофа. Решая уравнения, находим значения контурных токов;

4) находим токи в ветвях в соответствии с первым законом Кирхгофа.

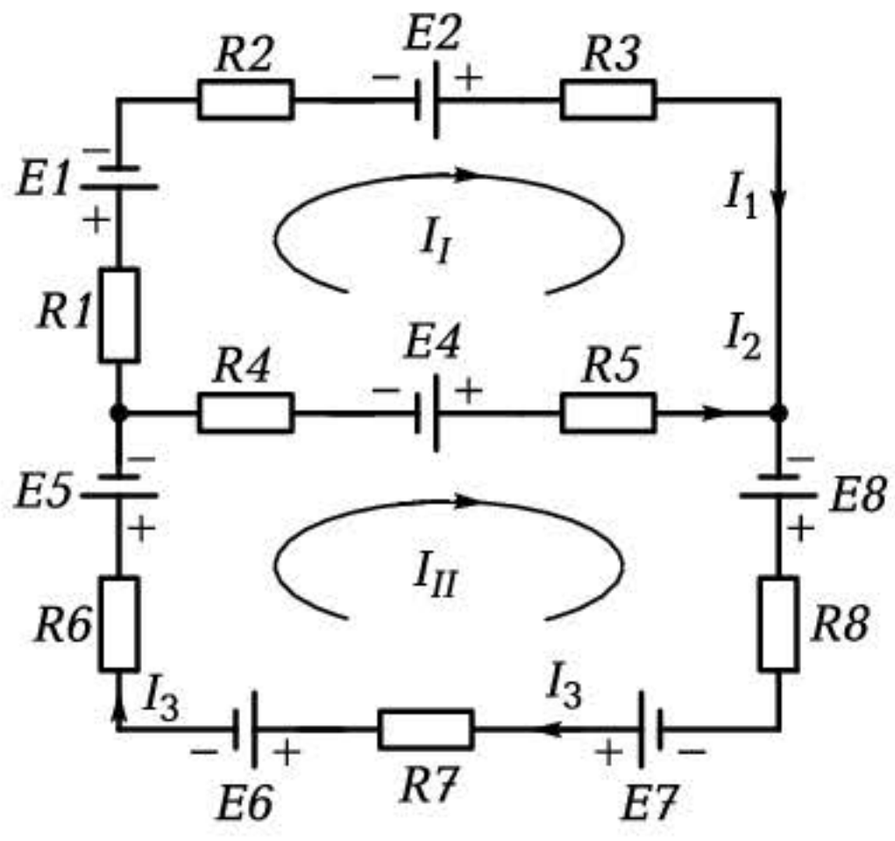
Решение

1. Электрическая цепь состоит из трех контуров. Поэтому для ее расчета по методу контурных токов составляем два уравнения согласно второму закону Кирхгофа для контурных токов I_{I} и I_{II}:

$$-E_1 + E_2 - E_4 = I_{\text{I}}\,(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5) - I_{\text{II}}\,(R_4 + R_5);$$

$$E_4 + E_8 + E_7 - E_6 - E_5 = I_{\text{II}}\,(R_4 + R_5 + R_8 + R_7 + R_6) - I_{\text{I}}\,(R_4 + R_5).$$

2. Подставляем в уравнения известные значения ЭДС и сопротивлений:



Дано:

$R_1 = 120$ Ом	$E_1 = 10$ В
$R_2 = 100$ Ом	$E_2 = 12$ В
$R_3 = 80$ Ом	
$R_4 = 50$ Ом	$E_4 = 20$ В
$R_5 = 30$ Ом	$E_5 = 16$ В
$R_6 = 150$ Ом	$E_6 = 8$ В
$R_7 = 90$ Ом	$E_7 = 24$ В
$R_8 = 40$ Ом	$E_8 = 27$ В

Рис. П2. Схема разветвленной электрической цепи

$$-10 + 12 - 20 = I_{\text{I}}\,(120 + 100 + 80 + 50 + 30) - I_{\text{II}}\,(50 + 30);$$

$$-18 = 380\,I_{\text{I}} - 80\,I_{\text{II}};$$

$$20 + 27 + 24 - 8 - 16 = I_{\text{II}}\,(50 + 30 + 40 + 90 + 150) - I_{\text{I}}\,(50 + 30);$$

$$47 = 360\,I_{\text{II}} - 80\,I_{\text{I}}.$$

3. Решаем уравнения, выражая первый контурный ток через второй:

$$I_{\text{I}} = (80\,I_{\text{II}} - 18)/380;\ 47 = 360\,I_{\text{II}} - (80\,I_{\text{II}} - 18)\cdot 80/380;$$

$$47 = 360\,I_{\text{II}} - 16{,}8\,I_{\text{II}} + 3{,}8;\ I_{\text{II}} = 0{,}126\ \text{А};\ I_{\text{I}} = -0{,}02\ \text{А}.$$

4. Вычисляем токи в ветвях в соответствии с первым законом Кирхгофа:

$$I_1 = I_{\text{I}} = -0{,}02\ \text{А};\ I_2 = I_{\text{II}} - I_{\text{I}} = 0{,}146\ \text{А};\ I_3 = I_{\text{II}} = 0{,}126\ \text{А}.$$

Ответ

Ток $I_1 = 0{,}02$ А течет в направлении, обратном условно принятому, токи $I_2 = 0{,}146$ А, $I_3 = 0{,}126$ А совпадают по направлению с условно принятыми.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Нелинейная электрическая цепь

Пример расчета

На рис. П3 изображена схема усилителя на биполярном транзисторе КТ3107Б p—n—p-типа с резистором в цепи коллектора $R_{\text{к}} = 70$ Ом и источником питания $E_{\text{к}} = 9$ В.

При $u_{\text{с}} = 0$ за счет базового делителя $R_{\text{б1}}$—$R_{\text{б2}}$ в цепи базы течет ток $I_{\text{б}} = 0{,}8$ мА. В рабочем режиме входной сигнал $u_{\text{с}}$ изменяет базовый ток от 0,2 до 1,6 мА.

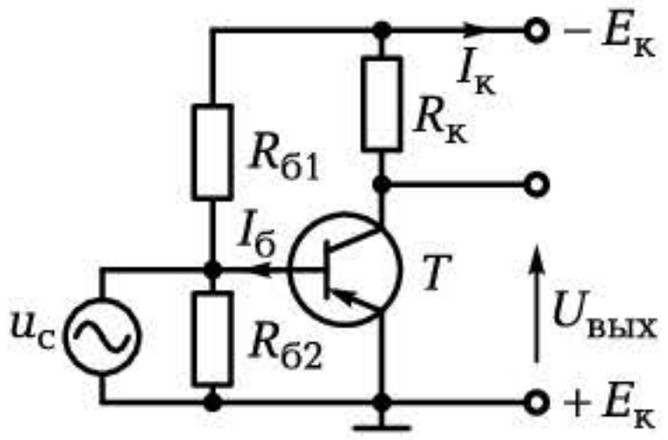
Определить значение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ и коллекторный ток $I_{\text{к}}$ при $u_{\text{с}} = 0$, а также диапазон изменения напряжения и тока в рабочем режиме.

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

Решение

1. Изображаем нелинейные управляемые ВАХ транзистора, взятые из справочника, и опрокинутую линейную ВАХ коллектор-

Рис. П3. Схема усилителя



ного резистора (рис. П4). Последняя строится по двум точкам: холостого хода $E_к = 9$ В и короткого замыкания $I_{КЗ} = E_к/R_к = 9/70 = 0{,}129$ А. Точки пересечения ВАХ транзистора и опрокинутой ВАХ резистора позволяют определить значение тока коллектора и выходного напряжения.

2. Для $I_б = 0{,}8$ мА находим точку пересечения P, проекция которой на ось токов дает значение коллекторного тока $I_{к0} = 72$ мА, а на ось напряжений — выходного напряжения $U_{вых\,0} = 4{,}1$ В.

3. При поступлении *минимального* значения сигнала $u_с$ на вход транзистора, соответствующего $I_б = 0{,}2$ мА, ВАХ пересекаются в точке B. Проекция этой точки на оси токов и напряжений позволяет определить $I_{к\,min} = 17$ мА и $U_{вых\,max} = 7{,}9$ В.

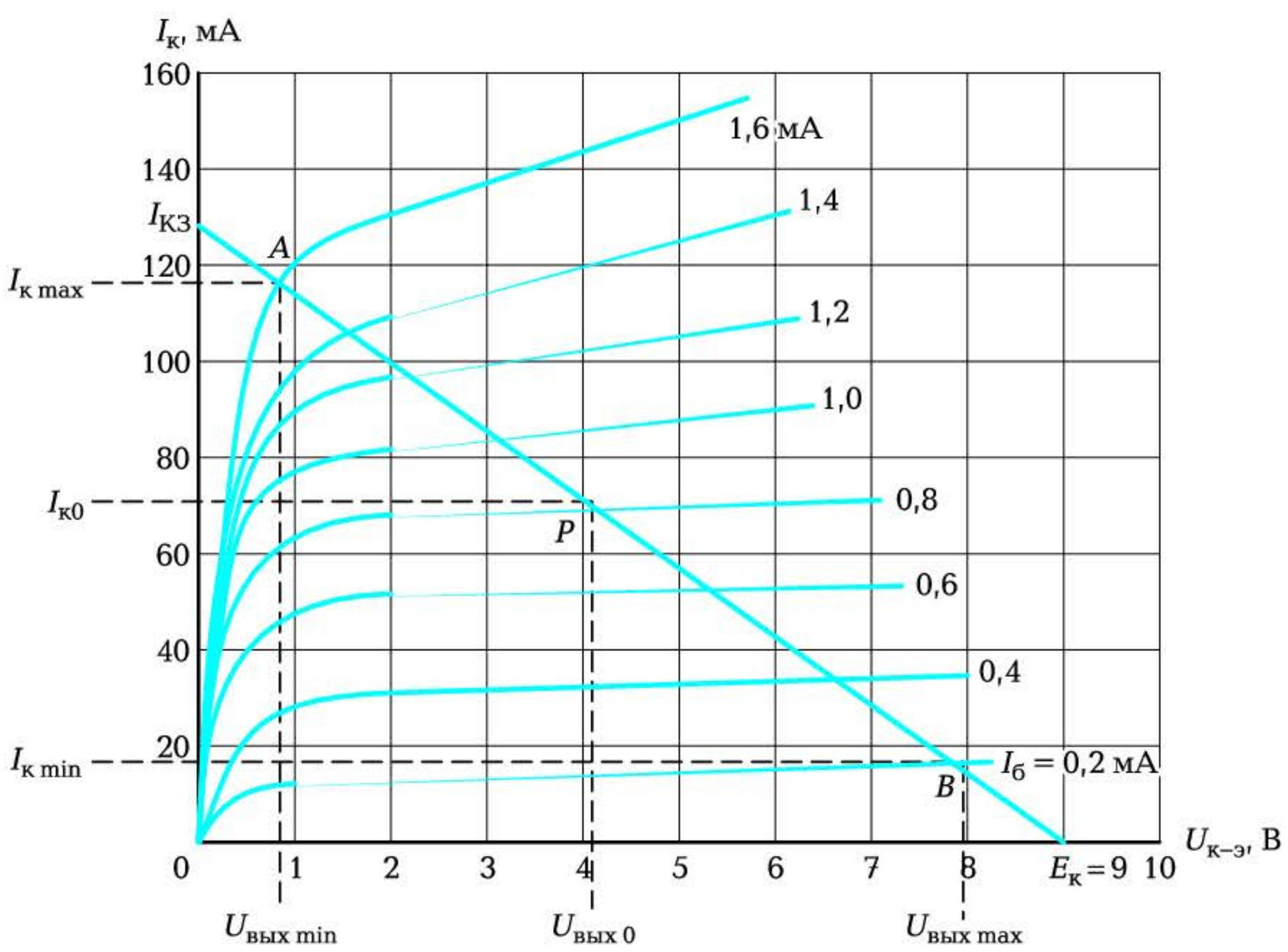


Рис. П4. Вольт-амперные характеристики транзистора и коллекторного резистора

4. При поступлении *максимального* значения сигнала u_c на вход транзистора, соответствующего $I_б$ = 1,6 мА, ВАХ пересекаются в точке *A*. Проекция этой точки на оси токов и напряжений позволяет определить $I_{к\,max}$ = 118 мА и $U_{вых\,min}$ = 0,8 В.

Ответ

При отсутствии входного сигнала ток коллектора равен 72 мА, а выходное напряжение — 4,1 В. При заданном входном сигнале ток коллектора изменяется от 17 до 118 мА, а выходное напряжение — от 7,9 до 0,8 В.

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Электрическая цепь переменного тока

Пример расчета

В узел *a* (рис. П5, *а*) втекают три синусоидальных тока одной частоты и один вытекает. Известны мгновенные значения втекающих токов:

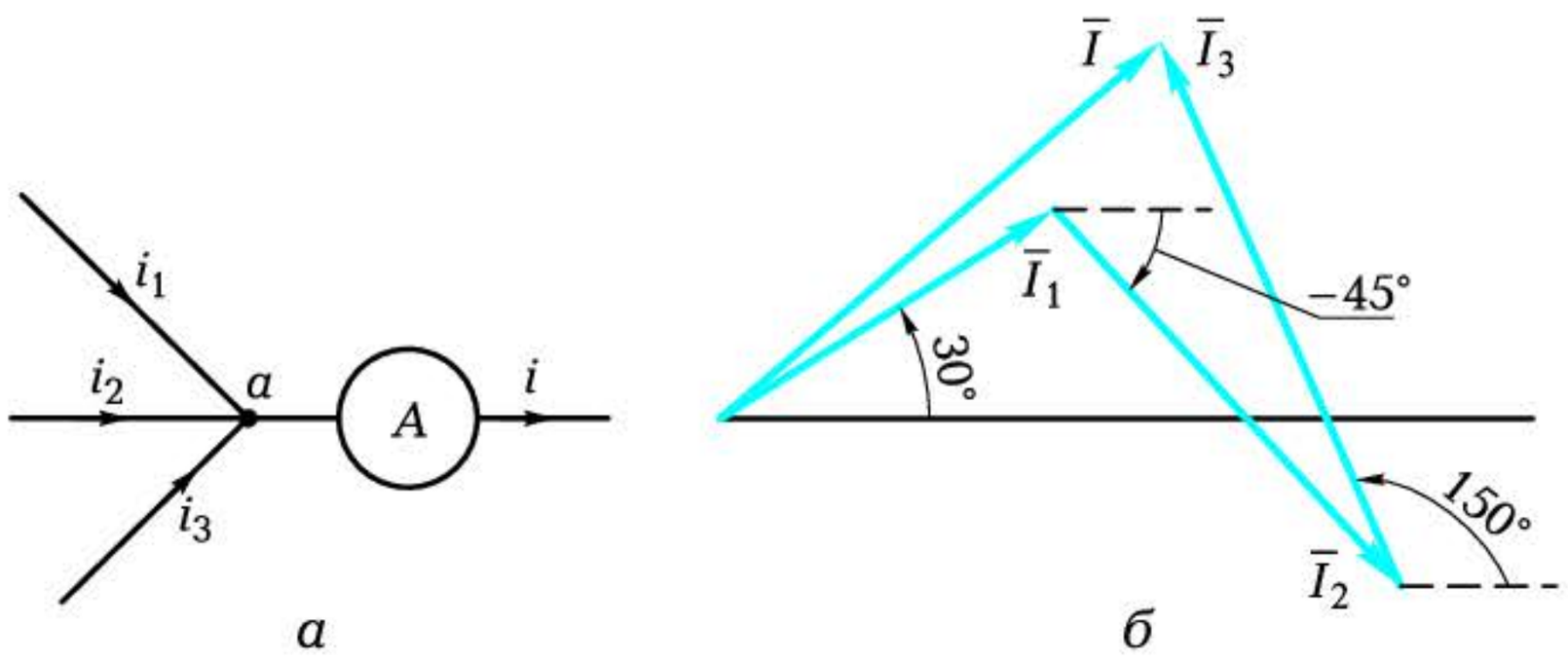
$$i_1 = 3\sin(\omega t + 30°);\ i_2 = 4\sin(\omega t - 45°);\ i_3 = 5\sin(\omega t + 150°).$$

Определить мгновенное значение вытекающего тока i и показания амперметра электромагнитной системы.

Расчет выполняем с помощью векторных диаграмм.

Решение

1. Выбираем масштаб токов m_I = 0,1 А/мм.



а *б*

Рис. П5. Узел электрической цепи (*а*) и векторная диаграмма токов (*б*)

2. Строим топографическую векторную диаграмму токов, откладывая векторы от горизонтальной оси под соответствующими углами (рис. П5, *б*).

3. Соединив начало первого вектора с концом последнего, строим результирующий вектор $\overline{I}$, определяем его длину (42 мм) — *амплитудное значение результирующего тока*, полярный угол (40°) — *угол сдвига фаз между током и напряжением* и записываем выражение для мгновенного значения вытекающего тока:

$$i = m_I \cdot 42 \text{ мм} \cdot \sin(\omega t + 40°) = 0{,}1 \text{ А/мм} \cdot 42 \text{ мм} \cdot \sin(\omega t + 40°) = \\ = 4{,}2 \sin(\omega t + 40°).$$

4. Амперметр, включенный в ветвь с вытекающим током i, покажет действующее значение тока $I = I_m/\sqrt{2} = 2{,}97$ А.

Ответ

Мгновенное значение вытекающего тока $i = 4{,}2 \sin(\omega t + 40°)$, амперметр покажет действующее значение тока $I = 2{,}97$ А.

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Гасящая емкость

Пример расчета

Лампу накаливания с параметрами $U_{раб} = 36$ В и $P = 40$ Вт необходимо включить в сеть напряжением $U = 220$ В частотой 50 Гц. В качестве гасящего сопротивления использовать конденсатор. Определить емкость и рабочее напряжение конденсатора.

Решение

1. Вычисляем рабочий ток, протекающий через лампу, учитывая чисто активный характер нагрузки ($\cos\varphi = 1$): $I = P/U_{раб} = 40/36 = 1{,}1$ А.

2. Вычисляем полное сопротивление ЭЦ, состоящей из последовательно включенного конденсатора и лампы: $Z = U/I = 220/1{,}1 = 200$ Ом.

3. Вычисляем сопротивление лампы: $R_л = U_{раб}/I = 36/1{,}1 = 32{,}7$ Ом.

4. Из треугольника сопротивлений определяем значение емкостного сопротивления: $X_C = \sqrt{Z^2 - R_л^2} = 197$ Ом.

5. Из выражения $X_C = 1/(\omega C)$ находим емкость конденсатора:

$$C = 1/(\omega X_C) = 16{,}1 \text{ мкФ}.$$

6. Рабочее напряжение конденсатора $U_C = X_C \cdot I = 197 \cdot 1{,}1 = 216{,}7$ В. Выбираем конденсатор с ближайшим бóльшим рабочим напряжением 250 В.

Ответ

Чтобы погасить излишки напряжения, необходимо последовательно с лампой накаливания включить конденсатор емкостью 16 мкФ и рабочим напряжением 250 В.

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

Электрические измерения

Примеры расчета

Измерение значительного тока несколькими амперметрами

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 одной и той же номинальной величиной тока $I_{ном} = 5$ А, но 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

1. Вычисляем ток, потребляемый нагревателем: $I = P/(U\cos\varphi) = 3\,000/(220 \cdot 1) = 13{,}64$ А.

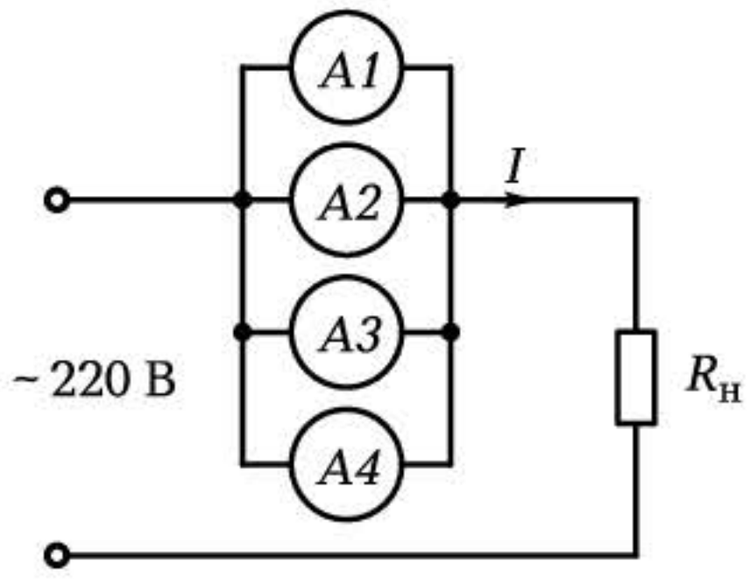
2. Для измерения полученного значения тока требуются по крайней мере три включенных параллельно амперметра. Однако, учитывая значительный разброс их внутренних сопротивлений, включим в цепь все четыре прибора (рис. П6).

3. Вычисляем эквивалентное сопротивление всех включенных параллельно амперметров: $r_э = 1/(1/r_1 + 1/r_2 + 1/r_3 + 1/r_4) = 1/(6{,}67 + 5{,}56 + 6{,}25 + 5) = 0{,}043$ Ом.

4. Вычисляем падение напряжения на амперметрах от тока, протекающего через нагреватель: $U_A = I \cdot r_э = 13{,}64 \cdot 0{,}043 = 0{,}58$ В.

5. Под действием этого напряжения в каждом амперметре протекает ток, обратно пропорциональный его внутреннему сопро-

Рис. П6. Схема измерения тока несколькими амперметрами



тивлению. Поэтому первый амперметр *A1* покажет ток $I_1 = U_A/r_1 = 0{,}58/0{,}15 = 3{,}87$ А, второй *A2* — 3,22 А, третий *A3* — 3,62 А, четвертый *A4* — 2,9 А. В сумме все четыре амперметра покажут 13,62 А, что примерно соответствует расчетному значению тока.

Ответ

Для измерения потребляемого нагревателем тока значением 13,64 А целесообразно включить параллельно четыре амперметра. Все вместе они покажут ток, близкий к расчетному, но каждый из них покажет свое значение, зависящее от внутреннего сопротивления прибора.

Расширение пределов измерения электромеханических измерительных приборов

В лаборатории электротехники на стендах используются многопредельные приборы магнитоэлектрической системы: вольтметр с максимальным током $I_V = 30$ мА внутренним сопротивлением $R_V = 20$ Ом и миллиамперметр с максимальным током $I_A = 20$ мА внутренним сопротивлением $R_A = 15$ Ом.

Рассчитать сопротивления добавочных резисторов для вольтметра, обеспечивающих три диапазона измерения напряжений: $U_1 = 30$ В; $U_2 = 150$ В; $U_3 = 300$ В, а также сопротивления шунтов для миллиамперметра, обеспечивающих три диапазона измерений токов: $I_1 = 100$ мА; $I_2 = 500$ мА; $I_3 = 1\,000$ мА.

Решение

1. Добавочные резисторы включаются последовательно с вольтметром (рис. П7, *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. В этом случае $R_1 = 30/0{,}03 - 20 = 980$ Ом; $R_2 = 4$ кОм; $R_3 = 5$ кОм.

2. Для вычисления сопротивления шунтов к миллиамперметру (рис. П7, *б*) определяем падение напряжения на самом приборе

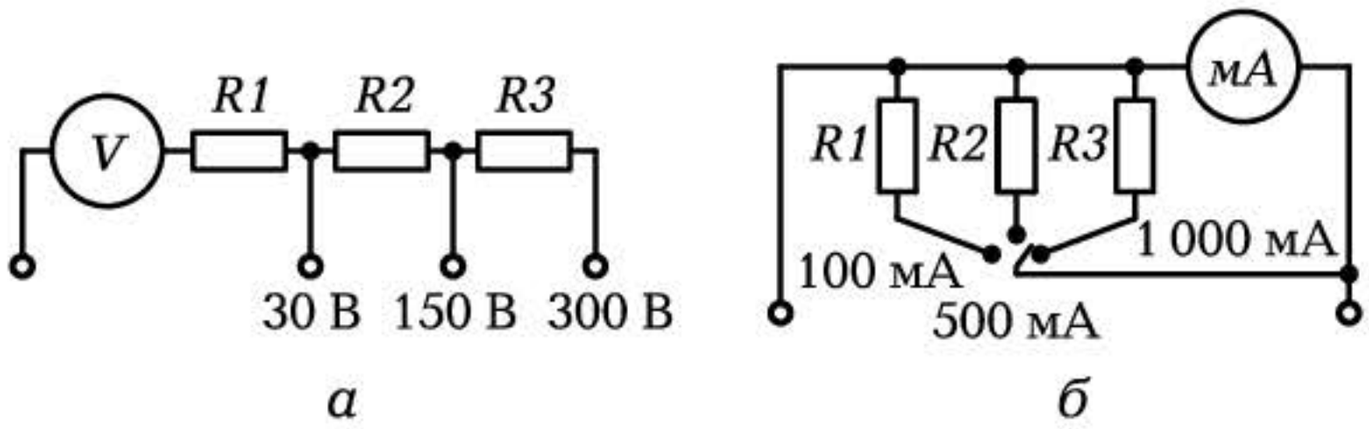


Рис. П7. Схемы включения дополнительных резисторов для вольтметра (*а*) и шунтов для амперметра (*б*)

при максимальном токе, т. е. при максимальном отклонении стрелки прибора: $U_A = I_A R_A = 0{,}02 \cdot 15 = 0{,}3$ В. Поскольку это напряжение должно быть и на шунте, определяем сопротивление шунта для первого диапазона по формуле $R_{ш1} = U_A / I_{ш1} = U_A / (I_1 - I_A) = 0{,}3 / (0{,}1 - 0{,}02) = 3{,}75$ Ом. Аналогичным образом вычисляем $R_{ш2} = 0{,}63$ Ом; $R_{ш3} = 0{,}3$ Ом.

Ответ

Для расширения пределов измерения и создания многопредельных приборов могут использоваться дополнительные резисторы (сопротивлением 0,98 кОм; 4 кОм; 5 кОм), включаемые последовательно с вольтметром, и шунты (сопротивлением 3,75 Ом; 0,63 Ом; 0,3 Ом), включаемые параллельно амперметру.

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

Параллельный колебательный контур

Пример расчета

Люминесцентные лампы включаются в сеть с помощью пускорегулирующей аппаратуры (ПРА). Основу ее составляет дроссель *Др*, включаемый последовательно с лампой *Л* (рис. П8, *а*). Поэтому индуктивная составляющая тока значительна и коэффициент мощности $\cos \varphi$ невелик. Для повышения коэффициента мощности в состав ПРА вводят конденсатор *С*.

Вычислить значение емкости конденсатора, обеспечивающее повышение $\cos \varphi$ до 0,95, если дроссель марки L13.813H для компактных люминесцентных ламп мощностью $P = 40$ Вт имеет $\cos \varphi = 0{,}42$.

Расчет выполняем, используя треугольник мощностей (рис. П8, *б*).

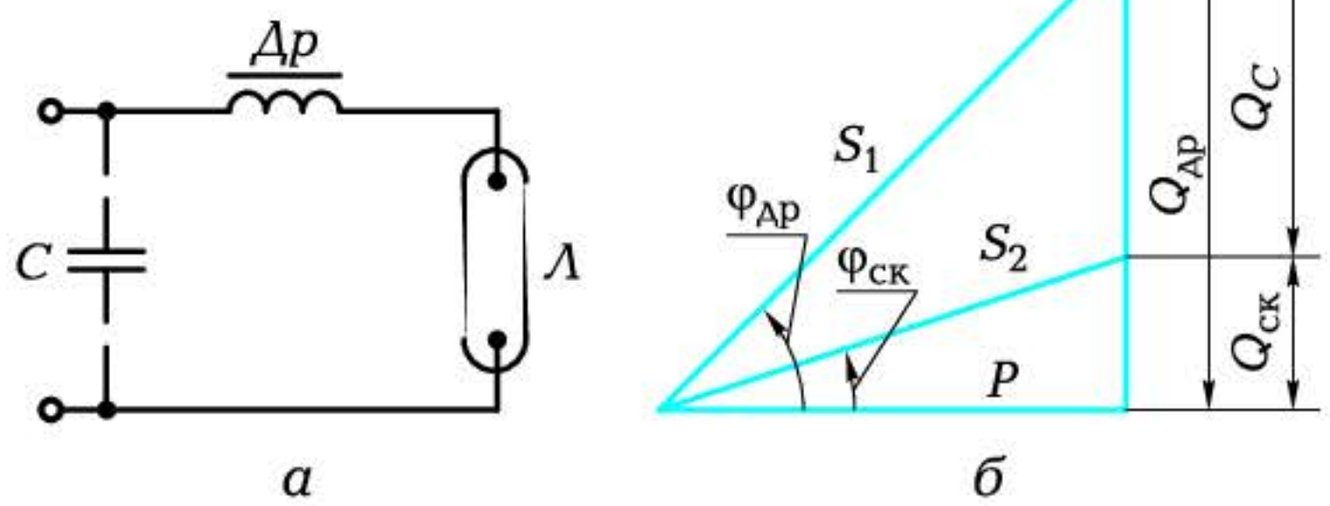


Рис. П8. К расчету коэффициента мощности:
а — схема включения лампы; *б* — треугольник мощностей; *Л* — лампа; *Др* — дроссель; *С* — конденсатор; $Q_{др}$ — реактивная мощность, потребляемая дросселем; Q_C — реактивная мощность, потребляемая конденсатором; $Q_{ск}$ — скомпенсированная реактивная мощность; S_1 и S_2 — полная мощность до и после компенсации; $\varphi_{др}$ и $\varphi_{ск}$ — углы сдвига фаз между током и напряжением до и после компенсации; *P* — активная мощность

Решение

1. Из треугольника следует

$$Q_C = Q_{др} - Q_{ск} = P(\mathrm{tg}\varphi_{др} - \mathrm{tg}\varphi_{ск}) =$$
$$= P((\sin\varphi_{др}/\cos\varphi_{др}) - (\sin\varphi_{ск}/\cos\varphi_{ск})) =$$
$$= P((\sqrt{1-\cos^2\varphi_{др}}/\cos\varphi_{др}) - (\sqrt{1-\cos^2\varphi_{ск}}/\cos\varphi_{ск})) =$$
$$= 40(2{,}16 - 0{,}33) = 73{,}2 \text{ вар.}$$

Таким образом, конденсатор должен отдавать реактивную мощность $Q_C = 73{,}2$ вар.

2. Вычисляем емкость конденсатора при рабочем напряжении $U = 220$ В, пользуясь выражением

$$Q_C = U^2/X_C = U^2/(1/(\omega C)) = U^2\omega C.$$

Из него следует, что $C = Q_C/U^2\omega = 73{,}2/(220^2 \cdot 314) = 0{,}0000048$ Ф = = 4,8 мкФ.

Ответ

Для увеличения коэффициента мощности пускорегулирующей аппаратуры параллельно источнику питания необходимо включить конденсатор емкостью 4,8 мкФ.

Трехфазная электрическая цепь

Пример расчета

Трехэтажный загородный дом питается от трехфазного трансформатора с линейным напряжением $U_л = 380$ В. При этом всю нагрузку (осветительные приборы, электроплиты, нагревательные приборы, видео- и радиоаппаратура, другая электроаппаратура «умного дома») можно считать чисто активной.

Первый этаж подключен к фазе A и потребляет мощность $P_a = 8{,}8$ кВт.

Второй этаж подключен к фазе B и потребляет мощность $P_b = 4{,}4$ кВт;

Третий этаж подключен к фазе C и потребляет мощность $P_c = 2{,}2$ кВт.

Определить ток в нейтральном проводе I_{nN} и оценить, что произойдет при обрыве нейтрального провода.

Решение

1. Вычисляем фазные напряжения: $U_ф = U_л/\sqrt{3} = 220$ В.

2. Вычисляем фазные токи, учитывая чисто активный характер нагрузки:

$$I_a = P_a/U_ф = 8\,800/220 = 40 \text{ А};$$

$$I_b = P_b/U_ф = 4\,400/220 = 20 \text{ А};$$

$$I_c = P_c/U_ф = 2\,200/220 = 10 \text{ А}.$$

3. Строим векторную диаграмму фазных напряжений и токов, приняв масштаб токов $m_I = 0{,}7$ А/мм (рис. П9).

4. В соответствии с первым законом Кирхгофа для точки n строим топографическую диаграмму токов и определяем ток в нейтральном проводе: $I_n = m_I \cdot 40$ мм $= 0{,}7 \cdot 40 = 28$ А.

Ответ

В нейтральном проводе течет ток $I_n = 28$ А. При обрыве нейтрального провода произойдет «перекос» фаз и нейтральная точка приемника сместится 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.

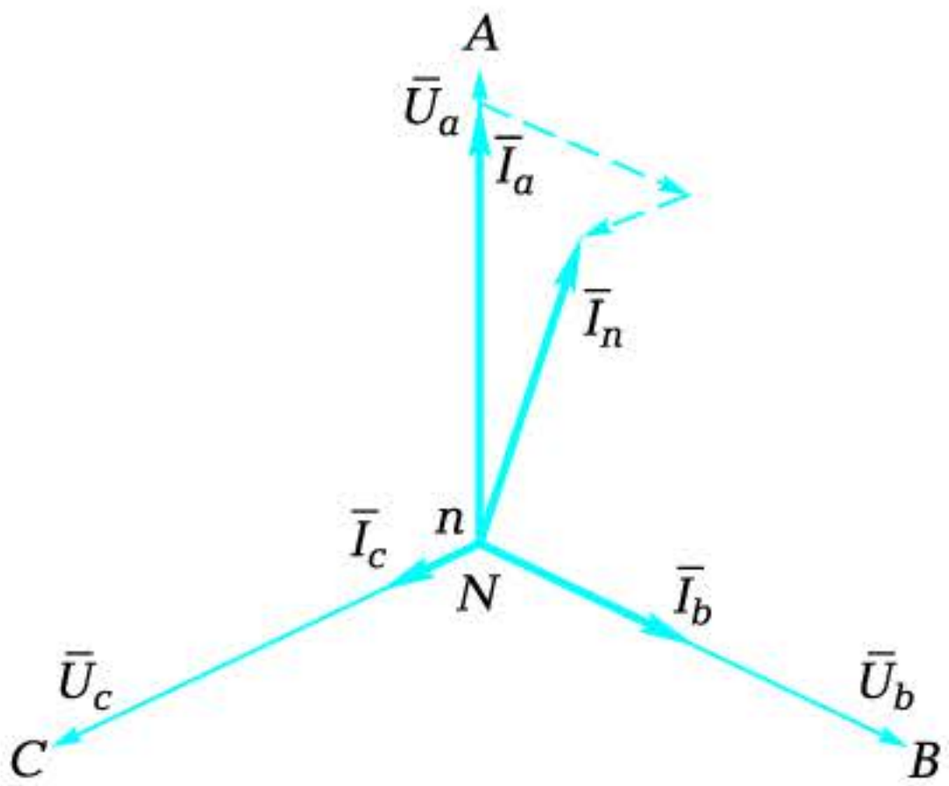


Рис. П9. Векторная диаграмма напряжений и токов

ПРИЛОЖЕНИЕ 13

Алгоритм расчета трехфазной трехпроводной ЭЦ с несимметричной нагрузкой, включенной звездой

1. По *заданным* линейному напряжению $U_л$ 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 $\bar{I}_n = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = 0$) можно определить напряжение смещения нейтрали U_{nN} и ожидаемые фазные напряжения на нагрузке U_a, U_b, U_c.

При этом полезно учитывать, что нейтральная точка n смещается в область, ограниченную векторами фазных напряжений с наименьшими сопротивлениями.

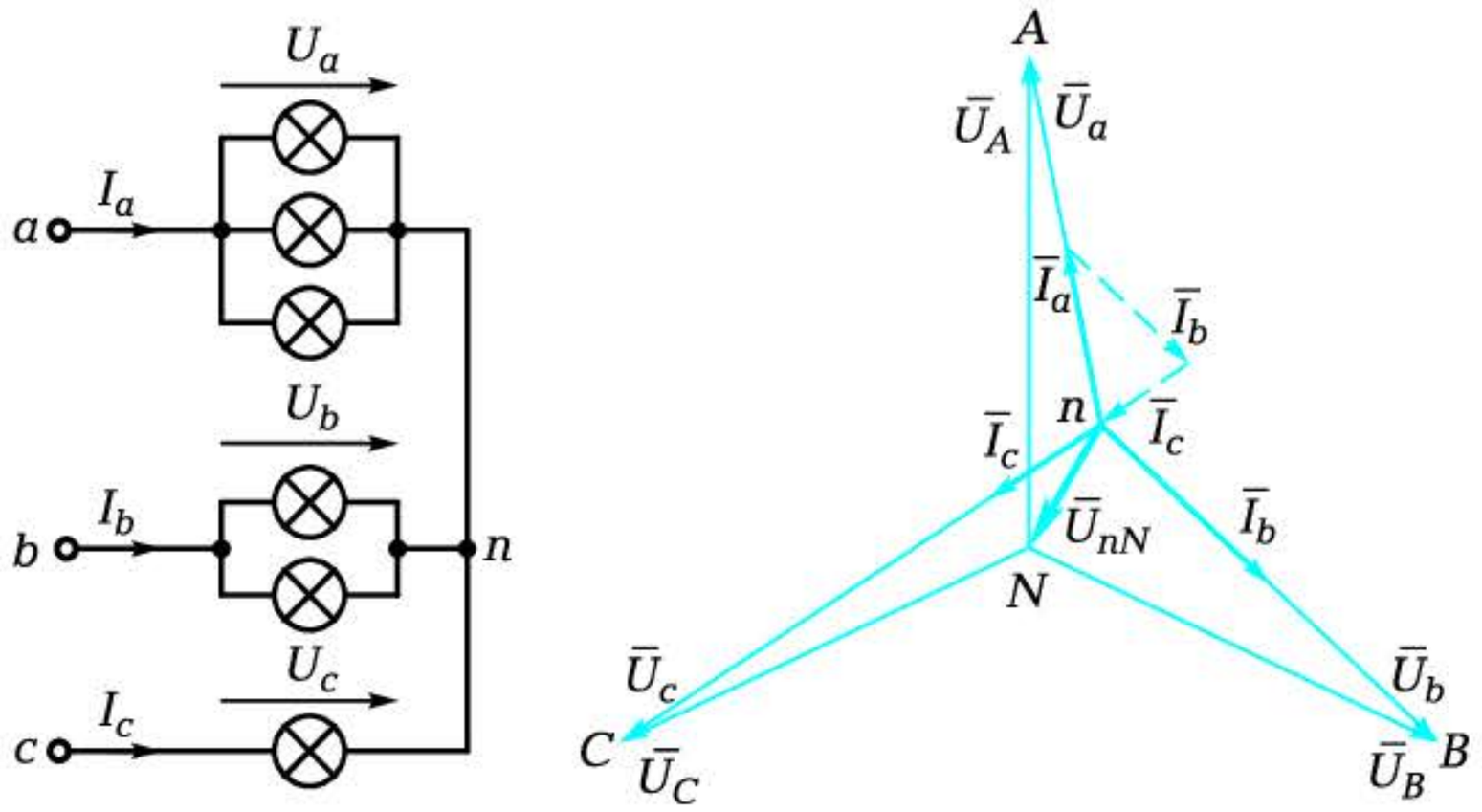
Пусть дана трехпроводная ЭЦ с различной ламповой нагрузкой в фазах (рис. П10, *а*). Необходимо определить фазные напряжения на нагрузке.

Расчеты выполняем в такой последовательности:

1) строим в масштабе m_U звезду фазных напряжений генератора $U_A = U_B = U_C = U_л/\sqrt{3}$ (рис. П10, *б*);

2) выбираем положение точки n и, соединив ее с точками A, B, C, находим предварительные значения фазных напряжений на нагрузке U_a, U_b, U_c;

3) 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;



а *б*

Рис. П10. Трехпроводная трехфазная ЭЦ с несимметричной нагрузкой:

а — схема ЭЦ; *б* — векторная диаграмма напряжений и токов

4) проверяем, выполняется ли равенство $I_a + I_b + I_c = 0$. Если оно не выполняется, переносим точку n в другое место и вновь повторяем описанные действия. Когда равенство выполнено, соединяем точку n с N и определяем напряжение смещения нейтрали U_{nN} и фазные напряжения на нагрузке U_a, U_b, U_c.

2. По *полученным экспериментально* фазным напряжениям U_a, U_b, U_c, фазным токам I_a, I_b, I_c и линейному напряжению $U_л$ векторные диаграммы для несимметричной активной нагрузки в фазах могут быть построены в такой последовательности:

1) из точки N в масштабе m_U строим звезду фазных напряжений генератора U_A, U_B, U_C;

2) *для трехроводной* линии из точек A, B, C в том же масштабе засечками с помощью циркуля откладываем значения фазных напряжений приемника U_a, U_b, U_c и находим нейтральную точку приемника n. Соединив точки n и N, получаем вектор напряжения смещения нейтрали $\bar{U}_{nN}$;

3) 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; (Для активной нагрузки вектор фазного тока совпадает по направлению с вектором фазного напряжения.)

4) *для четырехпроводной* линии $\bar{U}_{nN} = 0$, 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 величину тока в нейтральном проводе I_n. При симмет-

ричной нагрузке эта сумма равна нулю, а при несимметричной ток в нейтральном проводе не равен нулю и может быть найден по векторной диаграмме.

ПРИЛОЖЕНИЕ 14

Расчет магнитной цепи электромагнита

Пример расчета

Рассчитаем электромагнит, конструктивная схема которого приведена на рис. П11, *а*. На рис. П11, *б* показана зависимость магнитной индукции B от напряженности магнитного поля H для двух материалов, используемых в конструкции электромагнита.

Даны площади сечения, длины и материал трех ферромагнитных участков:

$$S_1 = 2 \cdot 10^{-5}\ \text{м}^2,\ l_1 = 3 \cdot 10^{-2}\ \text{м} \text{ — материал Э42;}$$

$$S_2 = 10^{-5}\ \text{м}^2,\ l_2 = 2 \cdot 10^{-2}\ \text{м} \text{ — материал Э310;}$$

$$S_3 = 6 \cdot 10^{-5}\ \text{м}^2,\ l_3 = 10^{-2}\ \text{м} \text{ — материал Э42}$$

и двух воздушных:

$$\text{рабочего } S_{\text{в.р}} = 2 \cdot 10^{-5}\ \text{м}^2,\ \delta_{\text{в.р}} = 10^{-3}\ \text{м;}$$

$$\text{технологического } S_{\text{в.т}} = 6 \cdot 10^{-5}\ \text{м}^2,\ \delta_{\text{в.т}} = 10^{-4}\ \text{м.}$$

Задан магнитный поток $\Phi = 1{,}6 \cdot 10^{-5}$ Вб.

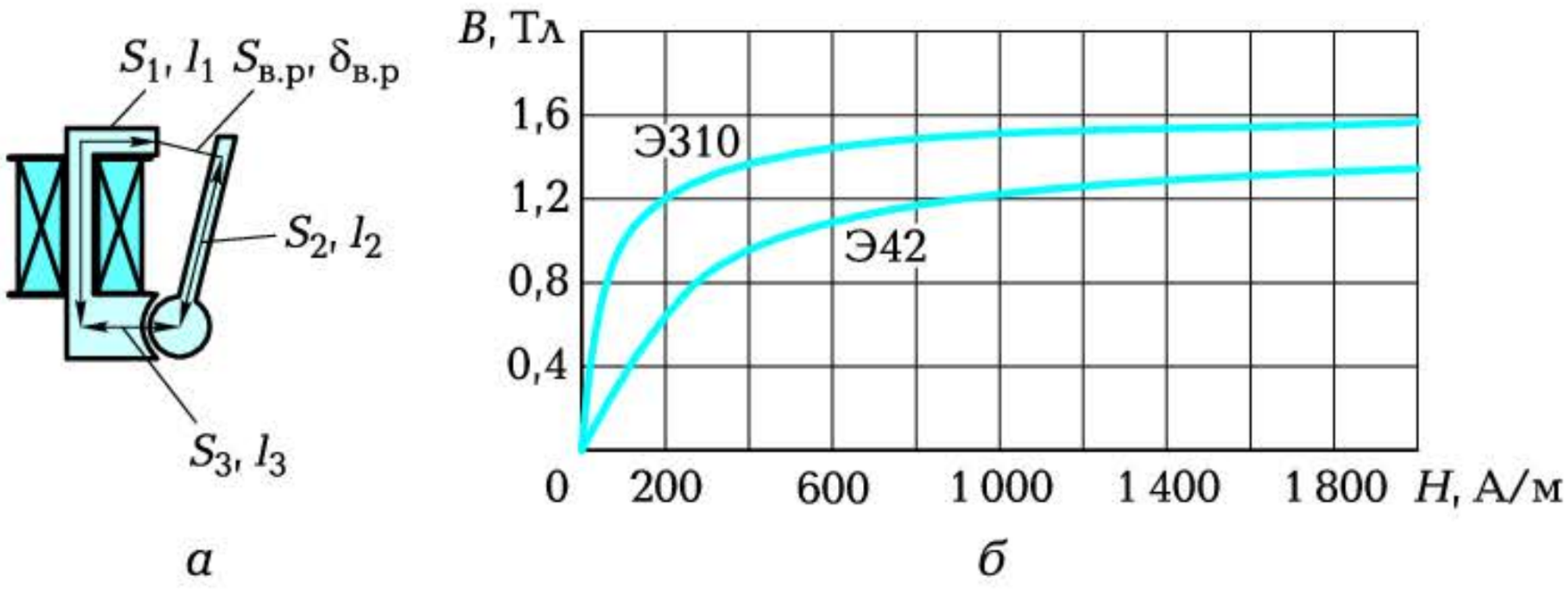


Рис. П11. Конструктивная схема электромагнита (*а*) и кривые намагничивания материалов сердечника (*б*)

Вычислить намагничивающую силу, обеспечивающую заданную величину потока, и электромагнитную силу, действующую на якорь в исходном состоянии.

Решение

1.Вычисляем индукцию на каждом участке магнитопровода:

$$B_1 = \Phi/S_1 = 1{,}6 \cdot 10^{-5}/(2 \cdot 10^{-5}) = 0{,}8 \text{ Тл};\ B_2 = 1{,}6 \text{ Тл};\ B_3 = 0{,}27 \text{ Тл};$$
$$B_{\text{в.р}} = 0{,}8 \text{ Тл};\ B_{\text{в.т}} = 0{,}27 \text{ Тл}.$$

2. Находим по графику (см. рис. П11, *б*) для ферромагнитных участков напряженности:

$$H_1 = 270 \text{ А/м};\ H_2 = 2\,000 \text{ А/м};\ H_3 = 70 \text{ А/м}.$$

Для воздушных участков напряженности

$$H_{\text{в.р}} = 8 \cdot 10^5 B_{\text{в.р}} = 8 \cdot 10^5 \cdot 0{,}8 = 6{,}4 \cdot 10^5 \text{ А/м};\ H_{\text{в.т}} = 2{,}16 \cdot 10^5 \text{ А/м}.$$

3. Вычисляем падения магнитного напряжения на отдельных участках магнитопровода:

$$H_1 l_1 = 270 \cdot 3 \cdot 10^{-2} = 8{,}1 \text{ А};\ H_2 l_2 = 40 \text{ А};\ H_3 l_3 = 0{,}7 \text{ А};\ H_{\text{в.р}}\delta_{\text{в.р}} = 640 \text{ А};$$
$$H_{\text{в.т}}\delta_{\text{в.т}} = 21{,}6 \text{ А}.$$

4. Вычисляем в соответствии с законом полного тока суммарную намагничивающую силу, обеспечивающую заданное значение потока:

$$Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_{\text{в.р}}\delta_{\text{в.р}} + H_{\text{в.т}}\delta_{\text{в.т}} = 710{,}4 \text{ А}.$$

5. Вычисляем электромагнитную силу, действующую на якорь:

$$F_{\text{эм}} = (Iw)^2_{\text{в.р}}\mu_0 S_{\text{в.р}}/(2\delta^2_{\text{в.р}}) = (H_{\text{в.р}}\delta_{\text{в.р}})^2\mu_0 S_{\text{в.р}}/(2\delta^2_{\text{в.р}}) =$$
$$= 640^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^{-5}/(2 \cdot 10^{-6}) = 5{,}14 \text{ Н}.$$

Ответ

Расчеты заданного электромагнита показывают, что конструктивная схема, размеры отдельных участков магнитопровода и их материал выбраны грамотно, так как практически 90 % всей намагничивающей силы сосредоточены в воздушном рабочем зазоре, что позволяет получить высокий КПД и значительную электромагнитную силу.

Выпрямитель

Пример расчета

Для работы двигателя 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: $U_н = 27$ В; $I_н = 0{,}7$ А.

Необходимо выбрать схему выпрямителя и рассчитать основные его элементы.

Р е ш е н и е

В данном случае для питания двигателя достаточно иметь лишь два элемента: трансформатор и вентиль. Это связано с тем, что достаточно высокая частота пульсаций практически не оказывает влияния на рабочие характеристики двигателя, который реагирует лишь на среднее выпрямленное напряжение $U_{н.ср}$.

Исходя из характеристик двигателя, выбираем в качестве вентиля выпрямительный блок серии КЦ402 с мостовой схемой соединения и параметрами $U_{обр.max} = 100$ В, $I_{пр.max} = 1$ А. Сам двигатель может быть включен непосредственно в диагональ моста с пульсирующим напряжением, в то время как вторая диагональ подключается к вторичной обмотке трансформатора (рис. П12).

Поскольку для двухполупериодного однофазного выпрямителя $U_{н.ср} = 0{,}9U_2$, действующее напряжение 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.

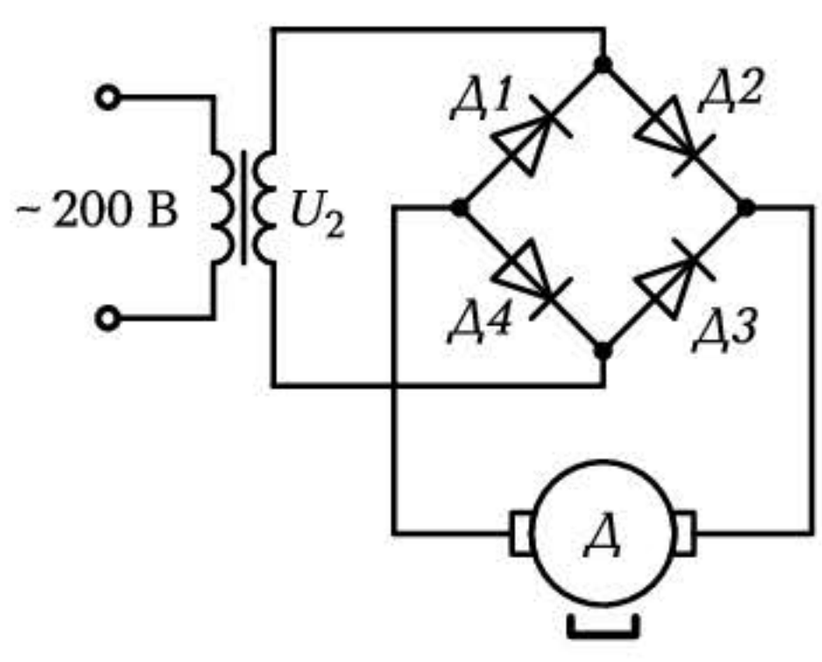


Рис. П12. Схема выпрямителя для двигателя постоянного тока

Номинальная мощность трансформатора $P_{ном} = U_2 I_н = 30 \cdot 0{,}7 = 21$ Вт.

Ответ

Для работы двигателя постоянного тока от источника переменного напряжения 220 В целесообразно использовать однофазный двухполупериодный выпрямитель, состоящий из выпрямительного блока серии КЦ402, работающего в комплексе с трансформатором, вторичное напряжение которого $U_2 = 30$ В.

ПРИЛОЖЕНИЕ 16

Усилитель

Пример расчета

Операционный усилитель с входным резистором сопротивлением $R_1 = 20$ кОм имеет коэффициент усиления $K_U = 100\,000$. Для усиления сигналов с датчика давления достаточно иметь усилитель с коэффициентом усиления 1 000. Можно ли использовать имеющийся операционный усилитель и что для этого необходимо сделать?

Решение

На рис. П13 приведена схема операционного усилителя с обратной связью (ОС) между выходом и инверсным входом. Такая обратная связь всегда отрицательна, а именно отрицательная обратная связь позволяет уменьшить коэффициент усиления усилителя.

Коэффициент усиления усилителя с обратной связью определяется выражением $K_{ОС} = K_U R_2 / R_1$. Таким образом, для требуемого снижения коэффициента усиления K_U достаточно правильно подобрать сопротивления резистора R_2. Для нашего сдучая

$$R_2 = R_1 K_{ОС} / K_U = 20\,000 \cdot 1\,000 / 100\,000 = 200 \text{ Ом}.$$

Ответ

Для получения требуемого коэффициента усиления необходимо в схему имеющегося операционного усилителя ввести отрицательную обратную связь на инверсный вход через резистор *R2* с сопротивлением 200 Ом.

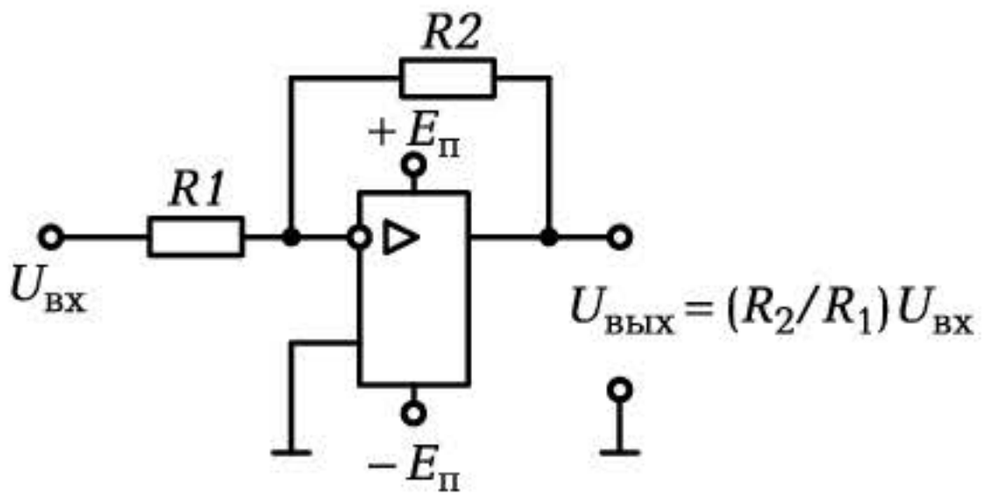


Рис. П13. Операционный усилитель с отрицательной обратной связью

Параметрический стабилизатор

Пример расчета

Расчет стабилизатора сводится к выбору типа стабилитрона *Д* и определению сопротивления и мощности балластного резистора $R_б$ (рис. П14). При этом должны быть заданы:

сопротивление нагрузки $R_н$ — пусть $R_н = 120$ Ом;

диапазон изменения входного напряжения $U_{вх} \pm \Delta U$ — пусть $U_{вх} = 8 \pm 2$ В, т. е. $U_{вх\,min} = 6$ В, $U_{вх\,max} = 10$ В;

выходное напряжение $U_{вых}$ — пусть $U_{вых} = 4$ В.

Решение

1. Вычисляем ток нагрузки:

$$I_н = U_{вых}/R_н = 4/120 = 0{,}033 \text{ А}.$$

2. Вычисляем сопротивление балластного резистора:

$$R_б = (U_{вх\,min} - U_{вых})/I_н = (6 - 4)/0{,}033 = 60 \text{ Ом}.$$

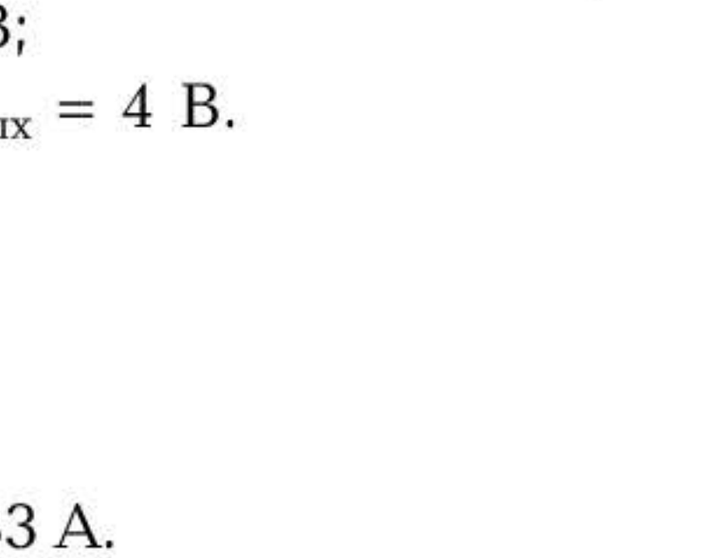


Рис. П14. Схема параметрического стабилизатора

3. Определяем максимальный ток, потребляемый ЭЦ:

$$I_{max} = (U_{вх\,max} - U_{вых})/R_б = (10 - 4)/60 = 0{,}1 \text{ А}.$$

4. Вычисляем максимальный ток через стабилитрон:

$$I_{д\,max} = I_{max} - I_н = 0{,}1 - 0{,}033 = 0{,}067 \text{ А}.$$

5. По справочнику выбираем тип стабилитрона, обеспечивающий

$$U_{вых} = 4 \text{ В и } I_{д\,max} = 0{,}067 \text{ А}.$$

Этим требованиям удовлетворяет стабилитрон КС139А с $E_д$ = = 3,9 В и $I_{д\,max}$ = 70 мА.

6. Вычисляем максимальную мощность балластного резистора $R_б$:

$$P = I^2_{max} R_б = 0{,}01 \cdot 60 = 0{,}6 \text{ Вт}.$$

Ответ

Для стабилизации напряжения в заданных пределах может быть использован стабилитрон КС139А совместно с балластным резистором, например МЛТ-1-60 Ом.

ПРИЛОЖЕНИЕ 18

Трансформатор

Пример расчета

Для лаборатории электротехники приобретен трехфазный трансформатор с параметрами: $S = 2$ кВ · А; $U_1 = 380$ В; $U_2 = 36$ В; $f = 50$ Гц; $\cos \varphi = 0{,}75$.

Вычислить номинальные значения токов в первичной и вторичной обмотках, определить числа витков обеих обмоток, коэффициент трансформации и КПД трансформатора.

Решение

1. Определяем номинальные значения токов:

$$I_{1н} = S/(\sqrt{3}\, U_1) = 2\,000/(\sqrt{3} \cdot 380) = 3 \text{ А};$$

$$I_{2н} = S/(\sqrt{3}\, U_2) = 2\,000/(\sqrt{3} \cdot 36) = 32 \text{ А}.$$

2. Для определения числа витков каждой из обмоток необходимо на один из стержней трансформатора поверх первичной и вторичной обмоток нанести дополнительную обмотку с известным числом витков. Пусть число витков будет 20.

3. В процессе опыта *холостого хода* (см. подразд. 7.1.3) для одной из фаз трансформатора определены:

$U_{10} = 220$ В; $U_{20} = 21$ В; $U_{доп} = 4$ В; $P_{10} = 40$ Вт, где P_{10} — потери на холостом ходу, равные магнитным потерям.

В процессе опыта *короткого замыкания* для той же фазы трансформатора определены:

$U_{1КЗ} = 20$ В; $P_{1КЗ} = 60$ Вт; $I_{1КЗ} = 3$ А; $I_{2КЗ} = 32$ А, где $P_{1КЗ}$ — потери в опыте короткого замыкания, равные электрическим потерям.

4. Определяем коэффициент трансформации трансформатора:

$$к_{21} = U_{20}/U_{10} = 21/220 = 0{,}095.$$

5. Вычисляем число витков первичной и вторичной обмоток:

$$w_1 = w_{доп}U_{10}/U_{доп} = 20 \cdot 220 \,/\, 4 = 1100;$$

$$w_2 = w_{доп}U_{20}/U_{доп} = 20 \cdot \, 21 \,/\, 4 = 105.$$

6. Вычисляем активную мощность, отдаваемую трансформатором в нагрузку:

$$P_2 = S\cos\varphi = 2\,000 \cdot 0{,}75 = 1\,500 \text{ Вт}.$$

7. Вычисляем КПД трансформатора, принимая во внимание, что магнитные и электрические потери измерены для одной фазы:

$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + 3P_{10} + 3P_{1КЗ}) = 1\,500/(1\,500 + 120 + 180) = 0{,}83.$$

Ответ

В процессе испытаний и расчетов для трехфазного трансформатора определены:

- номинальные токи $I_{1н} = 3$ А; $I_{2н} = 32$ А;
- коэффициент трансформации $к_{21} = \ 0{,}095$;
- число витков обмоток $w_1 = 1100$; $w_2 = 105$;
- КПД трансформатора $\eta = 0{,}83$.

Машина постоянного тока

Пример расчета

Двигатель постоянного тока ДПМ-25-Н3-16 с возбуждением от постоянных магнитов, имеющий $n_{ном} = 5\,200$ об/ мин; $U_{ном} = 27$ В; $I_{ном} = 0{,}5$ А; $R_я + R_щ = 0{,}5$ Ом, используется в качестве тахогенератора для контроля за частотой вращения асинхронного двигателя. Определить ожидаемую ЭДС на щетках машины при частоте вращения асинхронного двигателя $n = 2\,970$ об/мин.

Р е ш е н и е

Определяем противоЭДС при работе машины в режиме двигателя:

$$E = U - (R_я + R_щ)\, I_{ном} = 27 - 0{,}5 \cdot 0{,}5 = 26{,}75 \text{ В}.$$

Эта ЭДС возникает в двигателе при номинальном напряжении и номинальной частоте вращения. Поскольку $E = c_e \Phi_в n$, можно вычислить коэффициент пропорциональности $к = c_e \Phi_в = E/n = 26{,}75/5\,200 = 0{,}005$. Этот коэффициент остается тем же самым при работе машины и в режиме генератора. Действительно, коэффициент c_e определяется конструкцией машины, а поток Φ — магнитными характеристиками статора. Оба эти параметра остаются неизменными при работе и в режиме генератора, и в режиме двигателя.

Следовательно, при работе двигателя в режиме тахогенератора, ротор которого приводится в действие асинхронным двигателем, ожидаемая ЭДС на щетках $E = c_e \Phi_в n = кn = 0{,}005 \cdot 2\,970 = 14{,}85$ В.

О т в е т

При работе двигателя в качестве тахогенератора совместно с асинхронным двигателем ожидаемая ЭДС равна 14,85 В.

Асинхронный двигатель

Пример расчета

На щитке трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и шестью выводами на колодке зажимов приведены следующие характеристики: 220/380 В; Δ/Y; 50 Гц; 1 450 об/мин; 2,5 кВт; $\cos\varphi = 0{,}8$; $\eta = 0{,}85$.

Указать положение перемычек при включении двигателя в сеть по схеме треугольник и звезда. Определить, во сколько раз отличаются выходные мощности двигателя при различных схемах включения и одном и том же линейном напряжении. Вычислить рабочий ток статорной обмотки, число пар полюсов и скольжение асинхронного двигателя.

Р е ш е н и е

1. При включении треугольником конец первой обмотки *C4* соединяется с началом второй *C2* и т. д. Начала обмоток подключаются к линейным проводам *A*, *B*, *C* (рис. П15, *а*). При включении звездой концы обмоток *C4*, *C5*, *C6* соединяются вместе, а начала подключаются к линейным проводам *A*, *B*, *C* (рис. П15, *б*).

2. Полная мощность, потребляемая асинхронным двигателем при включении обмоток треугольником, $S^{\Delta}_{\text{АД}} = 3S_{\text{ф}} = 3U^2_{\text{ф}}/Z_{\text{ф}} = 3U^2_{\text{л}}/Z_{\text{ф}}$. При включении звездой: $S^{\text{Y}}_{\text{АД}} = 3S_{\text{ф}} = 3U^2_{\text{ф}}/Z_{\text{ф}} = U^2_{\text{л}}/Z_{\text{ф}}$.

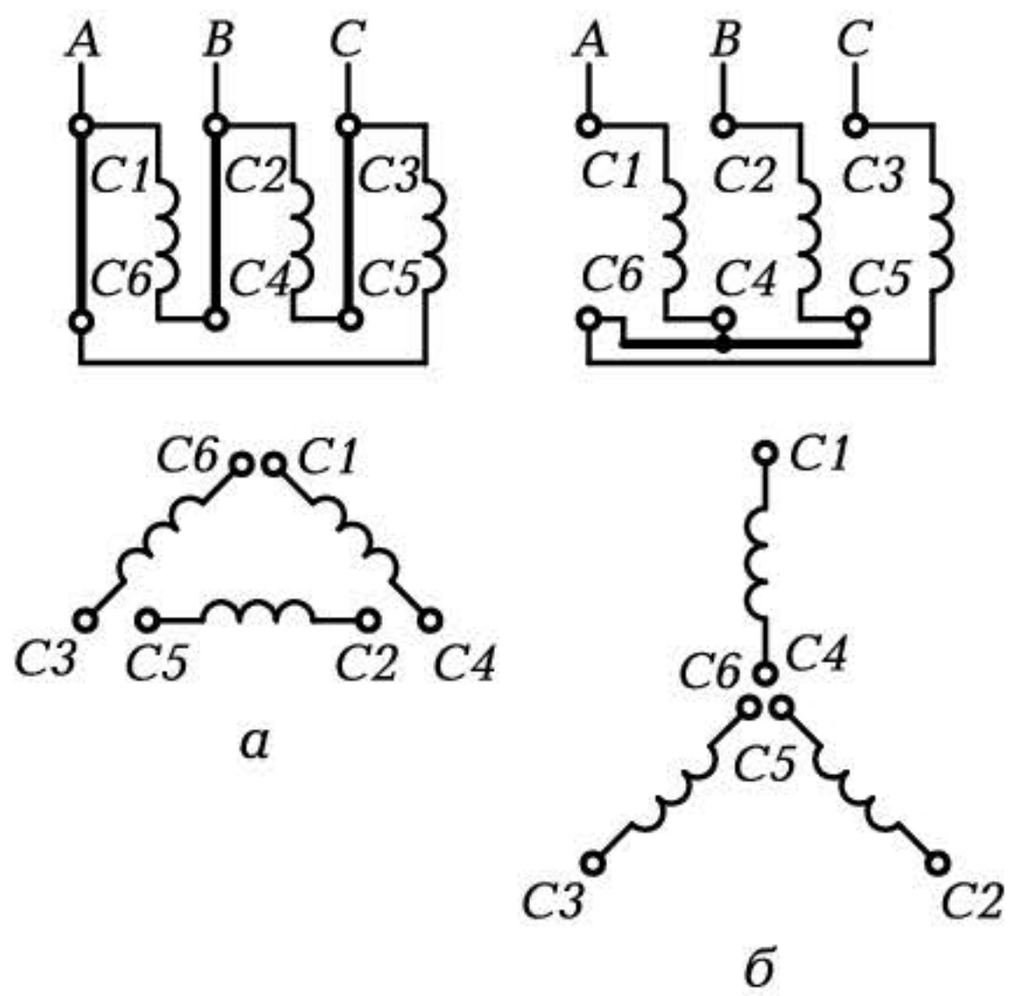


Рис. П15. Установка перемычек на щитке асинхронного двигателя:
а — по схеме треугольник; *б* — по схеме звезда

Отношение $S^{\Delta}_{\text{АД}}/S^{\text{Y}}_{\text{АД}} = 3$.

3. Для вычисления тока статора определяем активную мощность, потребляемую обмоткой статора в рабочем режиме:

$$P_{\text{а}} = P_2/\eta = 2\,500 \,/\, 0{,}85 \approx 2\,940 \text{ Вт}.$$

Из выражения $P_{\text{а}} = \sqrt{3} \cdot UI\cos\varphi$ находим

$$I = P_{\text{а}}/(\sqrt{3} \cdot U\cos\varphi) = 2\,940/(\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0{,}8) = 5{,}6 \text{ А}.$$

4. Из выражения для синхронной частоты вращения магнитного поля $n_1 = 60\ f/p$ находим, при каком числе пар полюсов p значение n_1 будет наиболее близко к значению реальной частоты вращения ротора $n = 1\,450$ об/мин. Так будет при $p = 2$. В этом случае $n_1 = 60 \cdot 50/2 = 1\,500$ об/мин.

5. Вычисляем скольжение асинхронного двигателя:

$$S = (n_1 - n)/n_1 = (1\,500 - 1\,450)/1\,500 = 0{,}033.$$

О т в е т

Для включения асинхронного двигателя треугольником надо установить три перемычки вертикально между зажимами *C1—C6*, *C2—C4*, *C3—C5*, а звездой — две перемычки горизонтально, объединив зажимы *C6—C4—C5*.

Выходная мощность двигателя при включении обмоток статора под одно и то же линейное напряжение треугольником в 3 раза больше, чем при включении звездой.

Ток статора в рабочем режиме — 5,6 А.

Число пар полюсов — 2.

Скольжение составляет 3,3 %.

ПРИЛОЖЕНИЕ 21

Синхронный генератор

Пример расчета

Известны паспортные данные гидрогенератора:
номинальная выходная мощность $P_{2\,\text{ном}} = 690$ МВт;
номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 16$ кВ;
номинальная частота напряжения 50 Гц;
номинальная частота вращения ротора $n_{\text{ном}} = 142{,}8$ об/мин;

коэффициент полезного действия $\eta = 98\,\%$;

коэффициент мощности $\cos\varphi = 0{,}83$.

Вычислить номинальный вращающий момент $M_{ном}$, номинальный ток турбогенератора $I_{ном}$, число пар полюсов p.

Р е ш е н и е

1. Вычисляем номинальный вращающий момент, приводящий в движение турбину:

$$M_{ном} = P_{ном}/(0{,}105 n_{ном}\eta) = 690 \cdot 10^6/(0{,}105 \cdot 142{,}8 \cdot 0{,}98) = 47 \cdot 10^6\ \text{Н} \cdot \text{м}.$$

2. Вычисляем номинальный ток гидрогенератора:

$$I_{ном} = P_{ном}/(\sqrt{3}\, U_{ном}\cos\varphi) = 690 \cdot 10^6/(\sqrt{3} \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 0{,}83) = \\ = 30 \cdot 10^3\ \text{А} = 30\ \text{кА}.$$

3. Определяем число пар полюсов:

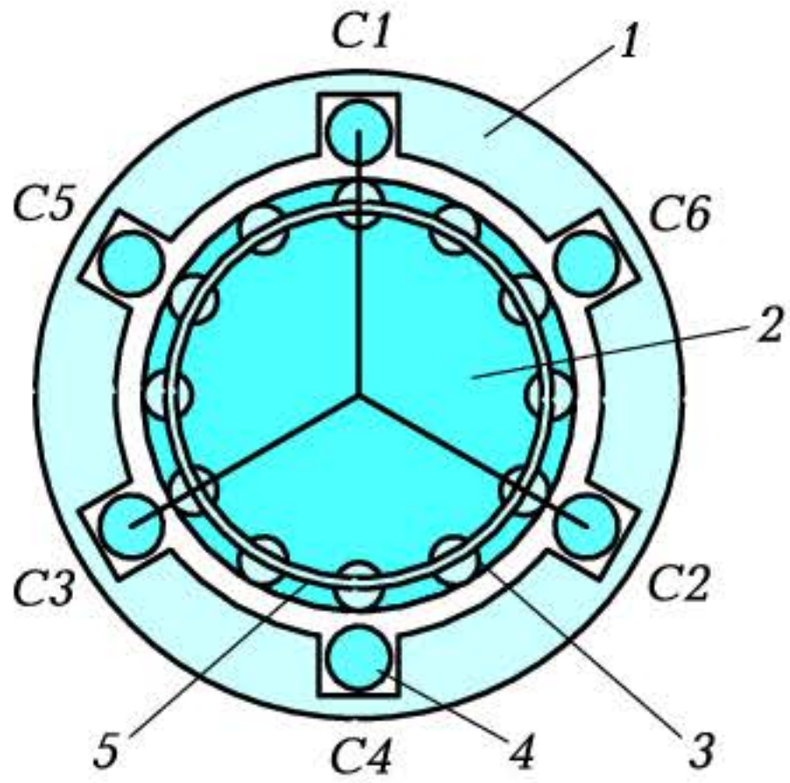
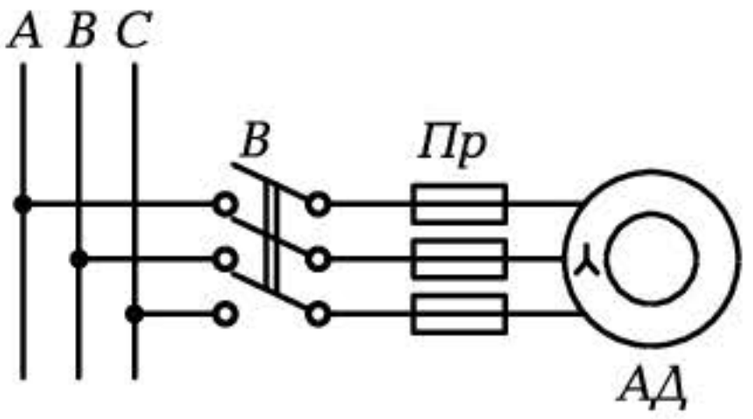
$$p = 60f/n = 60 \cdot 50/142{,}8 = 21.$$

О т в е т

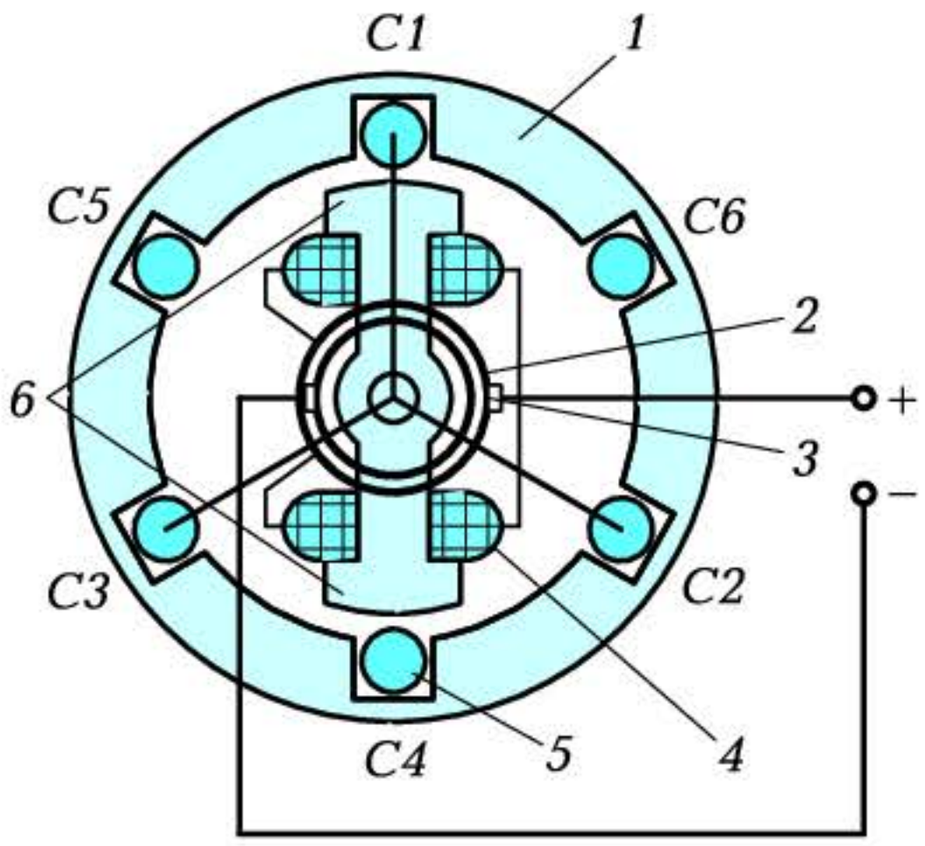
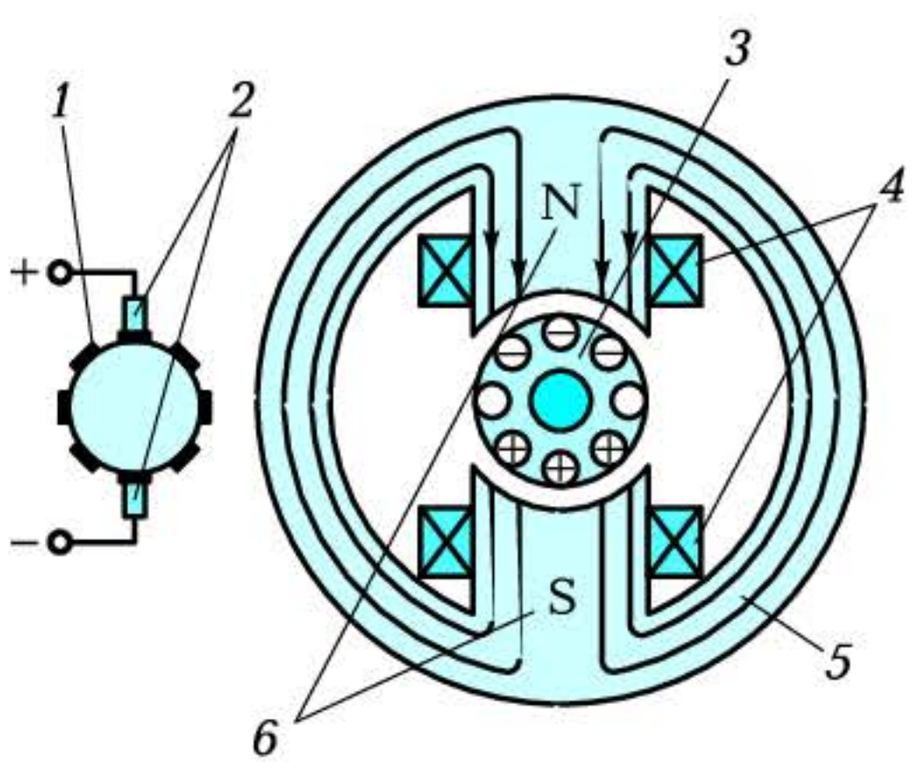
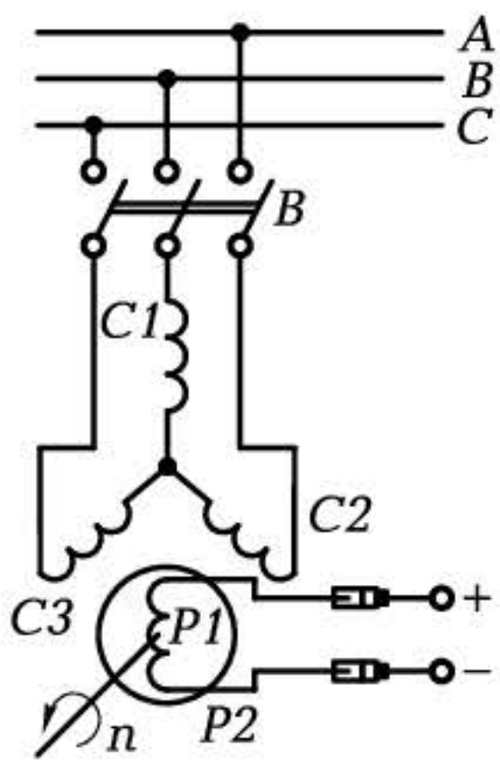
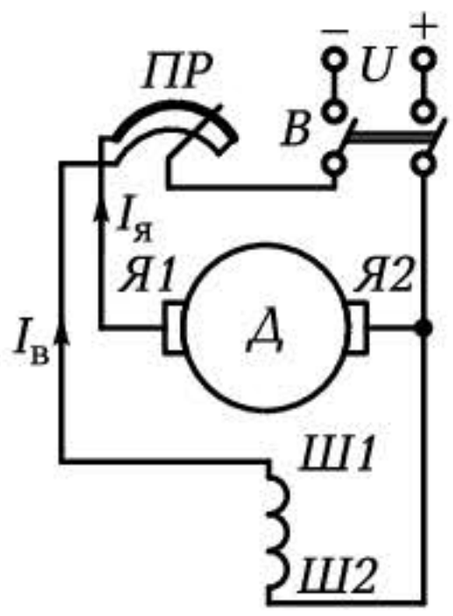
Номинальный вращающий момент турбины — 47 МН · м, номинальный ток гидрогенератора — 30 кА, число пар полюсов — 21.

Краткая сравнительная оценка основных

Электрические машины переменного тока

Наименование	Асинхронная машина
Состав	Статор Ротор
Конструктивная схема	 *а* *1* — статор; *2* — ротор; *3* — обмотка ротора; *4* — обмотка статора; *5* — закорачивающие кольца
Принцип действия	Взаимодействие вращающегося магнитного поля, создаваемого обмотками статора, с токами, наведенными этим полем в обмотке ротора
Схема включения	

типов электрических машин (режим двигателя)

Синхронная машина	Машина постоянного тока (МПТ)
Статор Ротор Два кольца со щетками	Статор Ротор Коллектор со щетками
 *1* — статор; *2* — кольца; *3* — щетки; *4* — обмотка ротора; *5* — обмотка статора; *6* — полюсы ротора	 *1* — коллектор; *2* — щетки; *3* — ротор с обмоткой; *4* — обмотка статора; *5* — статор; *6* — полюсы
Взаимодействие вращающегося магнитного поля, создаваемого обмотками статора, с постоянным магнитным полем, создаваемым обмоткой ротора	Взаимодействие постоянного магнитного поля, создаваемого обмотками статора, с током в проводнике, подаваемым в обмотку ротора через щетки и коллектор
	

Наименование	Асинхронная машина
Основное применение	Трехфазный асинхронный двигатель — основной приводной двигатель металлорежущих станков и подъемных механизмов
Основные параметры	Частота вращения $n = 60f(1 - S)/p$ Мощность $P = 0{,}105\ M_{вр}n$

ПРИЛОЖЕНИЕ 23

Устройство защитного отключения

Устройство защитного отключения (УЗО) — это по существу быстродействующий автоматический выключатель. Он предназначен 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.

Основными частями УЗО являются:

- дифференциальный трансформатор тока;
- реле тока;
- исполнительный механизм.

Фазный A и нейтральный N провода, подводимые к электрооборудованию ($R_н$), выполняют роль первичных обмоток трансформатора тока и проходят внутри него. Вторичная обмотка трансформатора включена на реле тока PT (рис. П16).

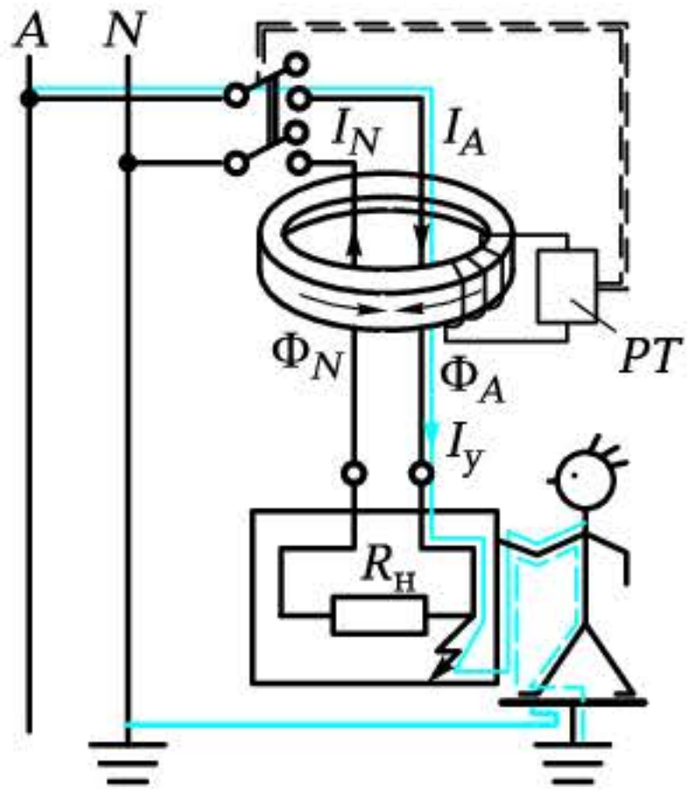


Рис. П16. Схема включения электрооборудования через УЗО в сеть

Синхронная машина	Машина постоянного тока (МПТ)
Трехфазный синхронный генератор — основной источник электрической энергии переменного тока	Двигатель постоянного тока — основной приводной двигатель транспортных устройств; генератор постоянного тока — основной источник электрической энергии постоянного тока
ЭДС $E = c_e \Phi n$ Мощность $P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$	Частота вращения $n = U/(c_e \Phi) - (R_я/c_e \Phi) I_я$ Мощность $P = 0{,}105\ M_{вр} n$

В нормальном режиме ток в подводящих проводах одинаков и создает одинаковые магнитные потоки Φ_A и Φ_N в магнитопроводе трансформатора. Поскольку они направлены встречно, результирующий магнитный поток равен нулю и не наводит во вторичной обмотке ЭДС.

При прикосновении человека, например, к корпусу электроустановки $R_н$, в которой произошли пробой изоляции и замыкание на корпус, по фазному проводу потечет дополнительно ток утечки $I_у$. Это приведет к нарушению равенства магнитных потоков, появлению разностного потока, который наведет во вторичной обмотке трансформатора тока ЭДС. Если эта ЭДС превысит пороговое значение, сработает исполнительный механизм и отключит электроустановку от сети.

Роль исполнительного механизма обычно выполняет пружина со спусковым механизмом, размыкающая силовые контакты и обесточивающая электрическую цепь.

ПРИЛОЖЕНИЕ 24

Особенности включения люминесцентных ламп

Принцип работы люминесцентных ламп состоит в преобразовании невидимого ультрафиолетового излучения, возникающего в результате газового разряда, в видимый свет посредством люминофорного покрытия. Таким образом, в люминесцентных лампах электрическая энергия преобразуется непосредственно в свето-

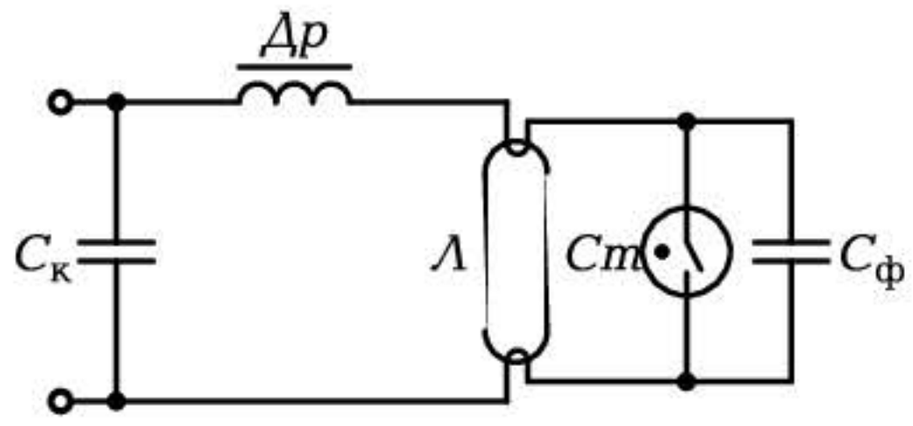


Рис. П17. Схема включения люминесцентной лампы

вую в отличие от ламп накаливания, в которых световое излучение является следствием термоизлучения — излучения нити накаливания при прохождении по ней электрического тока.

Люминесцентные лампы находят широкое применение благодаря высокому КПД, большому сроку службы, низкой температуре поверхности, возможности получения освещения, близкого к естественному. Однако они требуют достаточно сложной схемы включения и специальной пускорегулирующей аппаратуры.

Дело в том, что для зажигания лампы (пробоя межэлектродного промежутка) требуется напряжение, вдвое превышающее рабочее напряжение между электродами. В то же время после ионизации лампы напряжение на электродах должно быть вдвое ниже рабочего. С этой задачей справляется включаемый последовательно с лампой *Л* дроссель *Др*, работающий в паре со стартером тлеющего разряда *Ст* (рис. П17).

При включении схемы в сеть в стартере образуется тлеющий разряд, нагревающий его электроды. Поскольку один из электродов выполнен из биметалла, то под действием теплоты он изгибается в сторону другого электрода и замыкается с ним. Тлеющий разряд гаснет, электроды остывают и размыкаются. В момент размыкания электродов стартера в дросселе индуцируется значительная ЭДС, разогревающая электроды лампы и обеспечивающая ионизацию газа в ней. Для увеличения длительности импульса индуцируемой ЭДС и уверенного зажигания лампы параллельно стартеру устанавливается конденсатор небольшой емкости $C_ф$.

После зажигания лампы напряжение на ее электродах ограничивается величиной индуктивного сопротивления дросселя

Для повышения коэффициента мощности в цепь пускорегулирующей аппаратуры включается компенсационный конденсатор $C_к$.

Список литературы

1. *Арестов К. А.* Основы электроники / К. А. Арестов, Б. С. Яковенко. — М. : Радио и связь, 1988.
2. *Бутырин П. А.* Электротехника / П. А. Бутырин, О. В. Толчеев, Ф. Н. Шакирзянов; под ред. П. А. Бутырина. — М. : Изд. центр «Академия», 2006.
3. *Касаткин А. С.* Основы электротехники / А. С. Касаткин — М. : Высш. шк., 1986.
4. *Китаев В. Е.* Электротехника с основами промышленной электроники / В. Е. Китаев. — М. : Высш. шк., 1985.
5. *Константинов В. И.* Сборник практических примеров и задач по общей электротехнике / В. И. Константинов, А. Ф. Симонов. — М. : Высш. шк., 1971.
6. *Корякин-Черняк С. Л.* Справочник домашнего электрика / С. Л. Корякин-Черняк. — СПб. : Наука и техника, 2005.
7. *Лихачев В. Л.* Электротехника: справочник. — Т. 1. / В. Л. Лихачев. — М. : СОЛОН-Р, 2001.
8. *Полещук В. И.* Задачник по электротехнике и электронике / В. И. Полещук. — М. : Изд. центр «Академия», 2006.
9. *Прошин В. М.* Лабораторно-практические работы по электротехнике / В. М. Прошин. — М. : Изд. центр «Академия», 2004.
10. *Синдеев Ю. Г.* Электротехника с основами электроники / Ю. Г. Синдеев. — Ростов н/Д : Феникс, 2004
11. Электротехника и электроника / Б. И. Петленко, Ю. М. Иньков, А. В. Крашенинников и др.; под ред. Б. И. Петленко. — М. : Изд.центр «Академия», 2003.
12. Электротехника / А. Я. Шихин, Н. М. Белоусова, Ю. Х. Пухляков и др.; под ред. А. Я. Шихина — М. : Высш. шк., 1991.

Оглавление

Введение 4

Глава 1. Электрические цепи постоянного тока 10

1.1. Основные электрические величины 10
1.1.1. Физика электрического тока 10
1.1.2. Понятия основных электрических величин 11
1.1.3. Единицы измерения электрических величин 15
1.2. Электрическая энергия и электрическая цепь. Законы электротехники 15
1.2.1. Виды источников электрической энергии 15
1.2.2. Понятие электрической цепи 18
1.2.3. Основные законы электротехники 20
1.3. Приемники и источники электрической энергии. Расчет простой электрической цепи 21
1.3.1. Способы соединения приемников электрической энергии 21
1.3.2. Способы соединения источников электрической энергии 24
1.3.3. Алгоритм расчета простой неразветвленной электрической цепи 25
1.4. Общие сведения об электроизмерительных приборах 27
1.4.1. Электрические методы измерений 27
1.4.2. Измерение напряжения 28
1.4.3. Измерение тока 29
1.4.4. Измерение мощности 30
1.4.5. Измерение сопротивления 31
1.4.6. Основные показатели электроизмерительных приборов 31
1.4.7. Системы электроизмерительных приборов 32
1.5. Режимы работы электрических цепей. Расчет проводов. Разветвленная электрическая цепь 34
1.5.1. Режимы работы электрических цепей 34
1.5.2. Расчет проводов на потерю напряжения и на нагревание 35
1.5.3. Разветвленная электрическая цепь. Метод контурных токов 36
1.6. Нелинейные электрические цепи 38
1.6.1. Виды вольт-амперных характеристик нелинейных элементов 38
1.6.2. Последовательное соединение нелинейных элементов 40
1.6.3. Параллельное соединение нелинейных элементов 41

Глава 2. Электрические цепи переменного тока 43

2.1. Понятие электрических цепей переменного тока. Векторные диаграммы. Понятие емкостного и индуктивного сопротивлений 43
2.1.1. Основные понятия и определения 43
2.1.2. Векторные диаграммы 45
2.1.3. Емкость 46
2.1.4. Индуктивность 48
2.2. Электрические цепи переменного тока с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью 50
2.2.1. Цепь с активным сопротивлением 50
2.2.2. Цепь с индуктивностью 51
2.2.3. Цепь с индуктивностью и активным сопротивлением 52
2.2.4. Цепь с емкостью 53
2.2.5. Цепь с емкостью и активным сопротивлением 54
2.3. Электрическая цепь переменного тока с последовательным включением конденсатора и катушки индуктивности. Резонанс напряжений 55
2.3.1. Колебательный контур 55
2.3.2. Последовательное включение индуктивной катушки и конденсатора 55
2.3.3. Резонанс напряжений 56
2.4. Электрическая цепь переменного тока с параллельным включением конденсатора и катушки индуктивности. Резонанс токов 59
2.4.1. Понятие проводимостей на переменном токе 59
2.4.2. Резонанс токов 60
2.4.3. Коэффициент мощности и пути его повышения 61
2.5. Несинусоидальные токи. Переходные процессы в линейных электрических цепях 62
2.5.1. Несинусоидальные токи 62
2.5.2. Ряды Фурье для наиболее типичных видов несинусоидальных напряжений 64
2.5.3. Понятие переходного процесса 65
2.5.4. Переходный процесс в *RC*-цепи 66
2.5.5. Переходный процесс в *RL*-цепи 66

Глава 3. Трехфазные электрические цепи 69

3.1. Получение трехфазного напряжения. Способы соединения фаз источника 69
3.1.1. Основные понятия о трехфазных электрических цепях 69
3.1.2. Способы соединения фаз источника 70
3.2. Схемы включения трехфазной нагрузки 73
3.2.1. Виды нагрузок 73
3.2.2. Симметричная нагрузка, включенная треугольником 74
3.2.3. Несимметричная нагрузка, включенная треугольником 75
3.2.4. Симметричная нагрузка, включенная звездой 76
3.2.5. Несимметричная нагрузка, включенная звездой 77

3.3. Расчет трехфазной электрической цепи. Мощность цепи и методы ее измерения 78
3.3.1. Методы расчета трехфазных электрических цепей 78
3.3.2. Мощность трехфазной электрической цепи и методы ее измерения 80

Глава 4. Магнитные цепи 82

4.1. Магнитные цепи на постоянном токе 82
4.1.1. Индукционное и силовое действия магнитного поля 82
4.1.2. Основные параметры магнитного поля 83
4.1.3. Физика ферромагнитных материалов 84
4.1.4. Закон полного тока 86
4.2. Электромагнитные устройства. Аналогия магнитных и электрических цепей 87
4.2.1. Электромагниты 87
4.2.2. Электромагнитное реле 89
4.2.3. Электрические машины 89
4.2.4. Аналогия магнитных и электрических цепей 91
4.3. Расчет магнитных цепей постоянного тока. Магнитные цепи переменного тока 93
4.3.1. Задачи расчета 93
4.3.2. Алгоритм расчета 93
4.3.3. Особенности расчета 94
4.3.4. Магнитные цепи на переменном токе. Магнитные потери 95

Глава 5. Электрические измерения 98

5.1. Конструктивные элементы электромеханических измерительных приборов 98
5.1.1. Основные понятия и определения 98
5.1.2. Конструктивные элементы 101
5.2. Конструктивные схемы и принцип действия электроизмерительных приборов магнитоэлектрической и электромагнитной систем 103
5.2.1. Магнитоэлектрические приборы 103
5.2.2. Электромагнитные приборы 106
5.3. Конструктивные схемы и принцип действия электроизмерительных приборов электродинамической и индукционной систем. Самопишущие и регистрирующие приборы 108
5.3.1. Электродинамические приборы 108
5.3.2. Индукционные приборы 110
5.3.3. Самопишущие и регистрирующие приборы 111
5.4. Электронные измерительные приборы 112
5.4.1. Особенности электронных измерительных приборов 112
5.4.2. Электронно-лучевой осциллограф 113
5.4.3. Электронный вольтметр 116
5.4.4. Электронный генератор 118

5.5. Измерение индуктивности и емкости. Измерение неэлектрических величин электрическими методами 119
5.5.1. Мультиметры 119
5.5.2. Измерение индуктивности и емкости 120
5.5.3. Измерение неэлектрических величин 121

Глава 6. Основы промышленной электроники 124

6.1. Линейные и нелинейные элементы промышленной электроники 124
6.1.1. Основные понятия 124
6.1.2. Линейные элементы промышленной электроники 124
6.1.3. Нелинейные элементы промышленной электроники. Физика проводимости полупроводников 128
6.1.4. Приборы на основе полупроводников *n*- и *p*-типов 129
6.1.5. Свойство электронно-дырочного перехода 131
6.2. Однопереходные полупроводниковые приборы 132
6.2.1. Диоды 132
6.2.2. Полевые транзисторы 135
6.3. Многопереходные полупроводниковые приборы. Интегральные схемы и микроэлектроника 138
6.3.1. Биполярные транзисторы 138
6.3.2. Тиристоры 141
6.3.3. Интегральные микросхемы 142
6.4. Выпрямительные устройства. Однофазные выпрямители 144
6.4.1. Состав и назначение элементов выпрямительного устройства 144
6.4.2. Однополупериодный однофазный выпрямитель 146
6.4.3. Двухполупериодные однофазные выпрямители 146
6.5. Трехфазные выпрямители. Сглаживающие фильтры. Инверторы 148
6.5.1. Схемы трехфазных выпрямителей 148
6.5.2. Сглаживающие фильтры 150
6.5.3. Инверторы 152
6.6. Стабилизаторы постоянного напряжения 154
6.6.1. Назначение, типы и основной параметр стабилизатора 154
6.6.2. Параметрический стабилизатор 155
6.6.3. Компенсационный стабилизатор 156
6.7. Усилительные устройства. Режимы работы и принцип работы усилителя 158
6.7.1. Назначение и классификация 158
6.7.2. Параметры и характеристики 159
6.7.3. Режимы работы 160
6.7.4. Принцип работы 160
6.8. Обратная связь в усилителях. Влияние обратной связи на характеристики усилителя 162
6.8.1. Виды обратных связей 162
6.8.2. Принцип термостабилизации 164
6.9. Многокаскадные усилители напряжения 165
6.9.1. Виды межкаскадных связей 165

6.9.2. Усилители с *RC*-связью 166
6.9.3. Усилители с трансформаторной связью 166
6.9.4. Усилители с гальванической связью 168
6.10. Усилители постоянного тока и усилители мощности 169
6.10.1. Операционные усилители 169
6.10.2. Усилители мощности 171
6.11. Электронные генераторы синусоидальных колебаний 173
6.11.1. Классификация электронных генераторов 173
6.11.2. *LC*-генераторы 174
6.11.3. *RC*-генераторы 175
6.12. Электронные генераторы несинусоидальных колебаний 176
6.12.1. Релаксационные генераторы 176
6.12.2. Мультивибратор 177
6.12.3. Электронное реле (триггер) 179

Глава 7. Электрические машины 181

7.1. Общие сведения об электрических машинах. Назначение и конструкция трансформатора 181
7.1.1. Основные понятия и определения 181
7.1.2. Принципы, положенные в основу работы электрических машин 182
7.1.3. Назначение и конструктивная схема трансформатора 183
7.2. Основные соотношения в однофазном трансформаторе. Потери и КПД трансформатора 186
7.2.1. Принцип действия трансформатора 186
7.2.2. Уравнение напряжений и коэффициент трансформации 187
7.2.3. Потери и КПД 189
7.3. Внешняя характеристика трансформатора. Трехфазные трансформаторы, трансформаторы специального назначения 191
7.3.1. Внешняя характеристика трансформатора 191
7.3.2. Трехфазные трансформаторы 192
7.3.3. Автотрансформатор 194
7.3.4. Измерительные трансформаторы 195
7.3.5. Сварочный трансформатор 196
7.4. Общие сведения об асинхронных машинах 197
7.4.1. Конструкция асинхронной машины 197
7.4.2. Принцип работы трехфазного асинхронного двигателя 200
7.5. Характеристики асинхронного двигателя 202
7.5.1. Механические и рабочие характеристики двигателя 202
7.5.2. Потери в асинхронной машине. Энергетическая диаграмма 204
7.6. Пуск и регулирование частоты вращения асинхронного двигателя 205
7.6.1. Реверс и схемы пуска 205
7.6.2. Регулирование частоты вращения 207
7.7. Однофазные и универсальные асинхронные двигатели 208
7.7.1. Однофазные асинхронные двигатели 208

7.7.2. Универсальные асинхронные двигатели 211
7.8. Общие сведения о синхронной машинах 212
7.8.1. Конструкция 212
7.8.2. Принцип действия синхронных машины при работе в режиме двигателя 213
7.8.3. Принцип действия синхронной машины при работе в режиме генератора 214
7.9. Особенности работы синхронной машины в режиме двигателя 215
7.9.1. Особенности пуска синхронного двигателя 215
7.9.2. Синхронные машины малой мощности 217
7.10. Общие сведения о машинах постоянного тока 218
7.10.1. Принцип получения постоянной ЭДС 218
7.10.2. Конструкция и принцип действия 219
7.10.3. ЭДС и электромагнитный момент 220
7.11. Генератор постоянного тока 221
7.11.1. Работа машины постоянного тока в режиме генератора 221
7.11.2. Характеристика холостого хода 223
7.11.3. Внешняя характеристика 223
7.12. Двигатель постоянного тока 224
7.12.1. Работа машины постоянного тока в режиме двигателя 224
7.12.2. Регулирование частоты вращения 226
7.13. Особенности пуска двигателя постоянного тока. Двигатель с последовательным возбуждением и универсальные коллекторные двигатели 228
7.13.1. Пуск двигателя и роль пускового реостата 228
7.13.2. Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением 229
7.13.3. Универсальные коллекторные двигатели 230

Глава 8. Производство и распределение электрической энергии 232

8.1. Производство электроэнергии 232
8.1.1. Традиционные источники электрической энергии 232
8.1.2. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии 235
8.2. Передача и распределение электроэнергии 236
8.2.1. Передача электрической энергии 236
8.2.2. Распределение электрической энергии 238

Приложение 1. Основные электрические единицы 242
Приложение 2. Обозначение кратных и дольных единиц измерения 246
Приложение 3. Удельное электрическое сопротивление и температурный коэффициент сопротивления основных электротехнических материалов 246
Приложение 4. Среднее значение относительной диэлектрической проницаемости ε основных электротехнических материалов 247
Приложение 5. Простая неразветвленная электрическая цепь 247

Приложение 6. Разветвленная электрическая цепь 249
Приложение 7. Нелинейная электрическая цепь 250
Приложение 8. Электрическая цепь переменного тока 252
Приложение 9. Гасящая емкость 253
Приложение 10. Электрические измерения 254
Приложение 11. Параллельный колебательный контур 256
Приложение 12. Трехфазная электрическая цепь 258
Приложение 13. Алгоритм расчета трехфазной трехпроводной ЭЦ с несимметричной нагрузкой, включенной звездой 259
Приложение 14. Расчет магнитной цепи электромагнита 261
Приложение 15. Выпрямитель 263
Приложение 16. Усилитель 264
Приложение 17. Параметрический стабилизатор 265
Приложение 18. Трансформатор 266
Приложение 19. Машина постоянного тока 268
Приложение 20. Асинхронный двигатель 269
Приложение 21. Синхронный генератор 270
Приложение 22. Краткая сравнительная оценка основных типов электрических машин (режим двигателя) 272
Приложение 23. Устройство защитного отключения 274
Приложение 24. Особенности включения люминисцентных ламп 275

Список литературы 277

Учебное издание

Прошин Владимир Михайлович

Электротехника

Учебник

4-е издание, стереотипное

Редактор *Т. П. Манухина*
Технический редактор *О. Н. Крайнова*
Компьютерная верстка: *Е. Ю. Назарова*
Корректор *А. П. Сизова*

Изд. № 104113433. Подписано в печать 26.04.2013. Формат 60 × 90/16.
Гарнитура «Балтика». Бумага офс. №1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 18,0.
Тираж 4 000 экз. Заказ №

ООО «Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1.
Тел./факс: (495) 648-0507, 616-00-29.
Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU. АЕ51. Н 16476 от 05.04.2013.

Отпечатано с электронных носителей издательства.
ОАО «Тверской полиграфический комбинат», 170024, г. Тверь, пр-т Ленина, 5.
Телефон: (4822) 44-52-03, 44-50-34. Телефон/факс: (4822) 44-42-15.
Home page — www.tverpk.ru Электронная почта (E-mail) — sales@tverpk.r

ACADEMIA

Предлагаем вашему вниманию следующие книги:

П. А. БУТЫРИН, О. В. ТОЛЧЕЕВ,
Ф. Н. ШАКИРЗЯНОВ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
Под ред. П. А. Бутырина
Объем 272 с.

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

Для учащихся учреждений начального профессионального образования.

В. В. МОСКАЛЕНКО
СПРАВОЧНИК ЭЛЕКТРОМОНТЕРА
Объем 368 с.

В учебном пособии содержатся сведения о назначении и технических характеристиках основных видов электрооборудования: кабельных и электроизоляционных изделий, электрических аппаратов низкого и высокого напряжения, трансформаторов, электрических машин, полупроводниковых приборов и преобразователей, резисторов, конденсаторов и реакторов, электроприводов и электротехнологических установок и осветительных приборов. Приводятся также сведения из электротехники, расчетные соотношения для выбора и проверки электрооборудования и содержатся примеры решения типовых задач.

Для учащихся учреждений начального профессионального образования.

www.academia-moscow.ru

П. Н. НОВИКОВ, О. В. ТОЛЧЕЕВ

ЗАДАЧНИК ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

Объем 384 с.

Практикум содержит задачи на применение основных законов электротехники, а также связанные с физикой, химией, математикой, электроматериаловедением, специальными предметами, производственным обучением. Приводятся краткие теоретические сведения и основные расчетные формулы, подробные решения отдельных задач, отражающих специфику электротехнических объектов. Задачи рассчитаны на разный уровень подготовки и позволяют учитывать индивидуальные особенности учащихся. Их можно применять на различных этапах усвоения знаний, они реализуют межпредметные связи. На большинство задач в конце практикума даны ответы и пояснения к решениям. В 3-ем издании учтены замечания и пожелания, полученные в результате апробации.

Для учащихся учреждений начального профессионального образования.

В. М. НЕСТЕРЕНКО, А. М. МЫСЬЯНОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОМОНТАЖНЫХ РАБОТ

Объем 592 с.

В учебном пособии приведены материалы по курсу «Технология электромонтажных работ» для подготовки рабочих по специальностям электротехнического профиля. Особое внимание уделено межпредметным связям и теоретическому объяснению наиболее сложных вопросов и тем.

Для учащихся учреждений начального профессионального образования электротехнического профиля, а также слушателей курсов переподготовки незанятого населения, преподавателей и мастеров производственного обучения.

Издательский центр «Академия»

Учебная литература для профессионального образования

Наши книги можно приобрести (оптом и в розницу)

Москва:

129085, Москва, пр-т Мира, д. 101в, стр. 1
(м. Алексеевская)
Тел.: (495) 648-0507, факс: (495) 616-0029
E-mail: sale@academia-moscow.ru

Филиалы:

Северо-Западный
194044, Санкт-Петербург, ул. Чугунная,
д. 14, оф. 319
Тел./факс: (812) 244-92-53
E-mail: spboffice@acadizdat.ru

Приволжский
603101, Нижний Новгород, пр. Молодежный,
д. 31, корп. 3
Тел./факс: (831) 259-7431, 259-7432, 259-7433
E-mail: pf-academia@bk.ru

Уральский
620142, Екатеринбург, ул. Чапаева, д. 1а, оф. 12а
Тел.: (343) 257-1006
Факс: (343) 257-3473
E-mail: academia-ural@mail.ru

Сибирский
630009, Новосибирск, ул. Добролюбова, д. 31, корп. 4, а/я 73
Тел./факс: (383) 362-2145, 362-2146
E-mail: academia_sibir@mail.ru

Дальневосточный
680038, Хабаровск, ул. Серышева, д. 22, оф. 519, 520, 523
Тел./факс: (4212) 56-8810
E-mail: filialdv-academia@yandex.ru

Южный
344082, Ростов-на-Дону, ул. Пушкинская,
д. 10/65
Тел.: (863) 203-5512
Факс: (863) 269-5365
E-mail: academia-UG@mail.ru

Представительства:

в Республике Татарстан
420034, Казань, ул. Горсоветская,
д.17/1, офис 36
Тел./факс: (843) 562-1045
E-mail: academia-kazan@mail.ru

в Республике Дагестан
Тел.: 8-928-982-9248

www.academia-moscow.ru