Серия «Справочник»

Н. В. Нефедова, П. М. Каменев,
О. М. Большунова

КАРМАННЫЙ СПРАВОЧНИК ПО ЭЛЕКТРОНИКЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

Издание третье

Ростов-на-Дону
«Феникс»
2008

УДК 621(035)
ББК 31.2+32.85я2
КТК 230
Н58

Научный редактор проф. *А.Е. Козярук*

Рецензенты:

канд. техн. наук *Л.В. Куткова* (кафедра теоретических основ электротехники СПбГЭТУ);
канд. техн. наук *Э.К. Егоров* (ВИТР)

Нефедова Н. В.

Н58 Карманный справочник по электронике и электротехнике / Н. В. Нефедова, П. М. Каменев, О. М. Большунова. — Изд. 3-е. — Ростов н/Д : Феникс, 2008. — 283, [1] с. — (Справочник)

ISBN 978–5–222–13800–7

Изложены основы теории электрических и магнитных цепей, электрических машин постоянного и переменного тока, электронных устройств. Рассматриваются методы расчета и анализа электрических и электронных цепей, общие вопросы электропривода и электробезопасности.

Книга представляет собой минисправочник для студентов, абитуриентов и всех, кто хочет повысить уровень своих знаний.

ISBN 978–5–222–13800–7

УДК 621(035)
ББК 31.2+32.85я2

© Нефедова Н.В., Каменев П.М., Большунова О.М., 2004
© ООО «Феникс», оформление, 2008

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Электрические цепи

ВВЕДЕНИЕ

Электричество является основой развития всех отраслей техники, базой для развития промышленности, транспорта, сельского хозяйства.

Основная доля электрической энергии вырабатывается на электростанциях, где энергия первичных носителей (уголь, нефть, газ) превращается в электрическую, которую удобно передавать на большие расстояния воздушными и кабельными линиями, преобразовывать на местах в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую).

Развитие электротехники и ее широкое проникновение во все области современного общества связано с удобствами преобразования и передачи электрической энергии. С помощью электрических сигналов удобно передавать и обрабатывать информацию посредством вычислительной техники.

Большой вклад в развитие электротехники внесли такие ученые как Фарадей, Вольта, Ампер, Эрстед, Ленц, Максвелл, Герц, А.С.Попов, М.О.Доливо-Добровольский и др.

Курс электротехники содержит инженерные методы расчета и анализа широкого класса современных электротехнических устройств и различного электрооборудования предприятий.

В состав электрооборудования промышленных предприятий входят осветительные приборы, разнообразные электродвигатели постоянного и переменного тока, двигатели подъемных машин, кранов, насосов, вентиляторов, компрессоров, воздуходувок, установок загрузки и разгрузки, привода транспортеров, питателей и др.

В справочнике представлены такие разделы как электротехника, электроника, электропривод, способы защиты электрооборудования и вопросы электробезопасности.

В разделе электротехники приведены свойства элементов и законы электрических линейных цепей, рассмотрены особенности трехфазных и нелинейных цепей, процессы в цепи при воздействии на нее изменяющихся напряжений, а также принцип работы и характеристики электрических машин переменного и постоянного тока.

В разделе электроники приведены сведения по устройству и применению полупроводниковых элементов в различных приборах.

В разделе электропривод приведены сведения по конструктивному и климатическому исполнению электрических машин, их модификации и режимы работы. Даны краткие сведения по системам управления и регулирования, а также требования к составлению технического задания.

Коммутация (включение, выключение) электроустановок производится выключателями различных типов: рубильники, автоматические выключатели, пускатели.

Защита от перегрузки и аварийных режимов осуществляется предохранителями, релейными защитами различного устройства и назначения.

В справочнике рассмотрены режимы короткого замыкания, режимы нейтрали и их влияние на электробезопасность. Способы защиты и применение бесконтактных электрических аппаратов (тиристорные пускатели, микропроцессоры, контроллеры).

Предложенный в справочнике материал базируется на современных достижениях в электронике и электроэнергетике.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

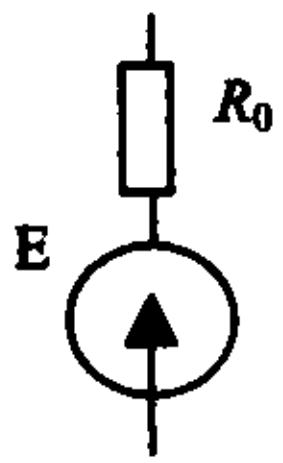
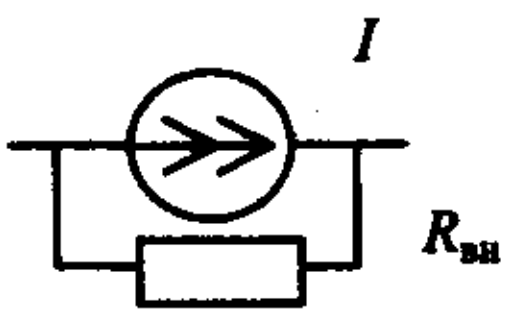
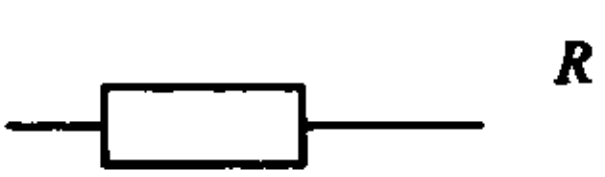
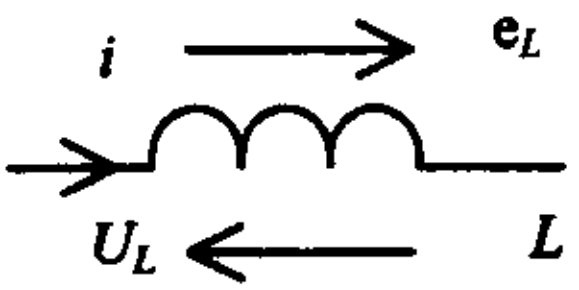
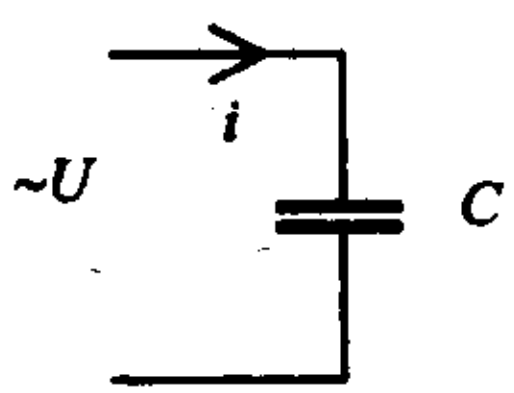
Электрической цепью называется совокупность электротехнических устройств, образующих путь для прохождения электрического тока. К электротехническим устройствам относятся:

- источники электромагнитной энергии (генераторы) или источники электрических сигналов (гальванические элементы, аккумуляторы);
- приемники или потребители;
- устройства передачи и преобразования электрической энергии (кабели, провода и трансформаторы).

Источники электрической энергии относятся к группе активных элементов электротехнических устройств. Если $R_0 = 0$ и электродвижущая сила (ЭДС) E = const, то источник называется идеальным. Внутреннее сопротивление источника тока $R_{вн}$ во много раз больше сопротивления нагрузки. Аккумуляторная батарея по своим параметрам близка к идеальному источнику ЭДС.

К группе пассивных элементов относятся: активное сопротивление R, индуктивность L и емкость C.

Условные обозначения источников электрической энергии и элементов электрических цепей:

Условное обозначение	Элемент
	**Идеальный источник ЭДС** **E – электродвижущая сила, E = const** **R_0 = 0 – внутреннее сопротивление**
	**Идеальный источник тока** **I = const** **$R_{вн}$ – внутреннее сопротивление источника тока,** **$R_{вн} >> R_{наг}$**
	**Активное сопротивление** **R = const**
	**Индуктивность** **L = const**
	**Емкость C = const**

В электротехнических устройствах одновременно протекают три энергетических процесса:

1. В активном сопротивлении в соответствии с законом Джоуля – Ленца происходит преобразование электрической энергии в тепло $P = I^2R$ (P, I – мощность и ток в цепи постоянного тока) или $p = i^2R = u^2g$ (p, i, u – мгновенные значения активной мощности, тока и напряжения в цепи переменного тока, g – активная проводимость или величина, обратная сопротивлению). Напряжение на сопротивлении $u = iR$. Мощность активного сопротивления всегда положительна.

Термин «сопротивление» применяется для условного обозначения элемента электрической цепи и для количественной оценки величины R.

Сопротивление измеряется в омах (Ом).

Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью и измеряется в сименсах (См).

Величина R любого приемника, строго говоря, не остается постоянной при протекании по нему тока, так как сопротивление зависит от температуры:

$$R_t = R_0\left[1 + \alpha(t - t_0)\right].$$

Для практических расчетов в электрических цепях величину R можно принимать постоянной. В этом случае зависимость напряжения на сопротивлении R от силы тока (вольт-амперная характеристика) будет называться линейной. Электрические цепи, в которые включены постоянные по величине сопротивления, также будут линейными.

2. Индуктивный элемент – это элемент, в котором энергия электрического поля преобразуется в энергию магнитного поля. В магнитном поле катушки накопление энергии происходит по закону

$$W_{\text{м}} = \frac{\Psi_{\text{к}} i_{\text{к}}}{2}, \quad \Psi_{\text{к}} = L_{\text{к}} i_{\text{к}},$$

где $\Psi_{\text{к}}$ – потокосцепление; $L_{\text{к}}$ – индуктивность или коэффициент пропорциональности между током и потокосцеплением; $i_{\text{к}}$ – ток через катушку.

Потокосцеплением самоиндукции Ψ цепи называется сумма произведений магнитных потоков, обусловленных только током в этой цепи, на число витков, с которыми они сцеплены.

Если все витки пронизываются одним и тем же магнитным потоком Ф, то потокосцепление равно произведению магнитного потока на число витков $\Psi = \Phi W$.

В СИ потокосцепление измеряется в веберах, индуктивность – в генри.

Зависимость потокосцепления от тока может быть постоянной (линейная зависимость) или нелинейной.

При изменении тока изменяется потокосцепление и в катушке наводится ЭДС

$$e_L = -\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}(iL)}{\mathrm{d}t} = -L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}.$$

Знак минус показывает, что ЭДС противодействует изменению тока в цепи.

Напряжение и мощность индуктивности равны:

$$U_L = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}; \quad p = u_L i.$$

Мощность может быть как положительной (при намагничивании), так и отрицательной (при размагничивании).

При нарастании тока $\frac{di}{dt} > 0$, $U_L > 0$, направления тока и напряжения совпадают, в индуктивности запасается энергия магнитного поля.

При убывании тока $\frac{di}{dt} < 0$, $U_L < 0$, направления тока и напряжения не совпадают, энергия магнитного поля в индуктивности убывает, возвращается обратно к источнику.

3. Накопление энергии в электрическом поле конденсатора

$$W_э = \frac{q_к U_к}{2}, \; q_к = C_к U_к,$$

где $q_к$ – заряд; $U_к$ – напряжение; $C_к$ – емкость конденсатора.

Если q – количество электричества измеряется в кулонах, $U_к$ – в вольтах, то емкость C – в фарадах.

Если напряжение источника в цепи конденсатора изменяется, то происходит перераспределение зарядов на его пластинах, что приводит к возникновению тока в цепи:

$$i = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}(Cu)}{\mathrm{d}t} = C\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}; \quad p_c = ui\,.$$

Мощность конденсатора положительна при его заряде и отрицательна при разряде конденсатора.

Если напряжение возрастает, то $i > 0$. Это значит, что ток и напряжение совпадают по направлению, энергия электрического поля в конденсаторе возрастает.

При убывании напряжения ток также уменьшается, энергия возвращается обратно к источнику.

Величины *R(Ом), L(Гн), C(Ф)* зависят от свойств самого устройства, его конструкции и являются параметрами этого устройства.

Мгновенные значения напряжения и тока *u(t), i(t)* характеризуют режим работы устройства.

2. ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Те или иные соединения элементов *R, L, C* называются *электрической цепью*, а графическое изображение цепи – *электрической схемой.*

Электрическая схема показывает, как осуществляется соединение элементов рассматриваемой цепи. В электрической схеме соединения элементов образуют ветви, узлы, контуры.

Участок электрической цепи, по которому проходит ток одного и того же значения и направления, называется *ветвью.* Замкнутая электрическая цепь, образованная одной или несколькими ветвями, называется *контуром,* а место соединения трех или более ветвей – *узлом.* На схеме узел изображается точкой. Графическое изображение цепи называется *электрической схемой.*

Электрические цепи классифицируются: по роду тока (постоянный и переменный); по характеру элементов (линейные и нелинейные); по схемам соединения (простые и сложные); по изображению (монтажные, принципиальные и замещения).

3. ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

1. *Закон Ома:* $U = IR$, $I = U/R$, $R = U/I$. Определяет связь между основными электрическими величинами на участках цепи с пассивными элементами.

2. *Первый закон Кирхгофа* – закон баланса токов в узле. Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна 0, $\sum_{к=1}^{n} I_к = 0$. Электрический заряд в узле не накапливается.

3. *Второй закон Кирхгофа.* Алгебраическая сумма ЭДС источников питания в любом контуре равна алгебраической сумме падений напряжения на элементах этого контура, $\sum_{i=1}^{n} E_i = \sum_{к=1}^{m} I_к R_к$.

4. *Закон Джоуля – Ленца.* Энергия, выделяемая на сопротивлении R при протекании по нему тока I, пропорциональна произведению квадрата силы тока и величины сопротивления: $W = I^2 Rt$.

4. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Электрические цепи и их элементы могут работать в различных режимах в отношении величин напряжений, токов и мощностей. Наиболее характерными являются номинальный и согласованный, а также режимы холостого хода (х.х) и короткого замыкания (к.з).

Номинальным режимом работы элемента электрической цепи считается режим, при котором он работает с номинальными параметрами.

Согласованным является *режим,* при котором мощность, отдаваемая источником или потребляемая приемником, имеет максимальное значение. Такое значение получается при определенном соотношении (согласовании) параметров электрической цепи.

Под режимом *холостого хода* понимается такой режим, при котором через источник или приемник не протекает электрический ток. При этом источник не отдает энергию во внешнюю часть цепи, а приемник не потребляет ее. Для двигателя это будет режим без механической нагрузки на валу.

Режимом короткого замыкания называется режим, возникающий при соединении между собой разноименных зажимов источника или пассивного элемента, а также участка электрической цепи, находящегося под напряжением.

В промышленности применяются два рода тока – постоянный и переменный. Под постоянным понимают электрический ток, не изменяющийся во времени.

4.1. Электрические цепи постоянного тока

Постоянный ток используется в процессе электролиза (гальванопластика – получение легко отделяющихся точных металлических копий, гальваностегия – нанесение металлических покрытий из одних металлов на изделия из других металлов), на городском транспорте (электропоезда, трамваи, троллейбусы), в осветительных приборах, в устройствах автоматики, электроники и вычислительной техники.

Если ток постоянный, то отсутствует явление самоиндукции и напряжение на катушке индуктивности равно нулю,

$$U_L = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}, \quad \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = 0, \text{ так как } i = \text{const}.$$

Если рассматривать конденсатор как идеальную емкость, то в цепи постоянного тока эта ветвь равносильна разомкнутой.

Постоянный ток через емкость не проходит.

Таким образом, в цепи постоянного тока остаются только источники ЭДС или тока – активные элементы и приемники резисторы – пассивные элементы.

Простыми цепями постоянного тока называются цепи с одним источником при последовательном (рис. 1а), параллельном (рис. 1б) и смешанном (рис. 1в) соединении приемников.

Согласно схеме на рис.1а:

$$\mathrm{E} = IR_1 + IR_2 + \cdots + IR_n =$$
$$= I(R_1 + R_2 + \cdots + R_n) = IR_{\text{экв}};$$
$$R_{\text{экв}} = \Sigma R_i.$$

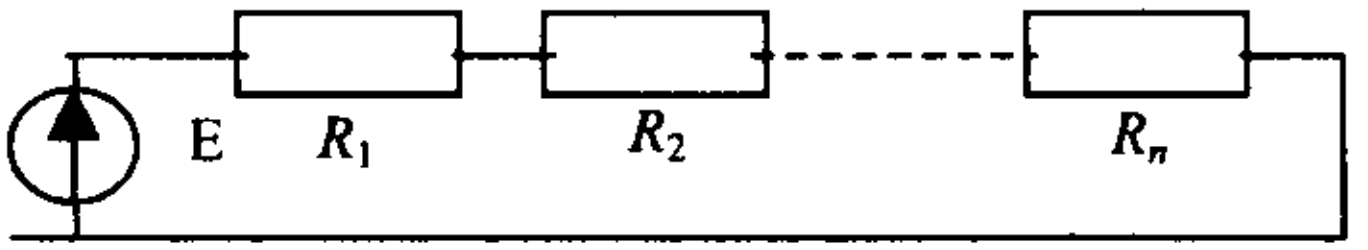


Рис. 1а. Последовательное соединение приемников

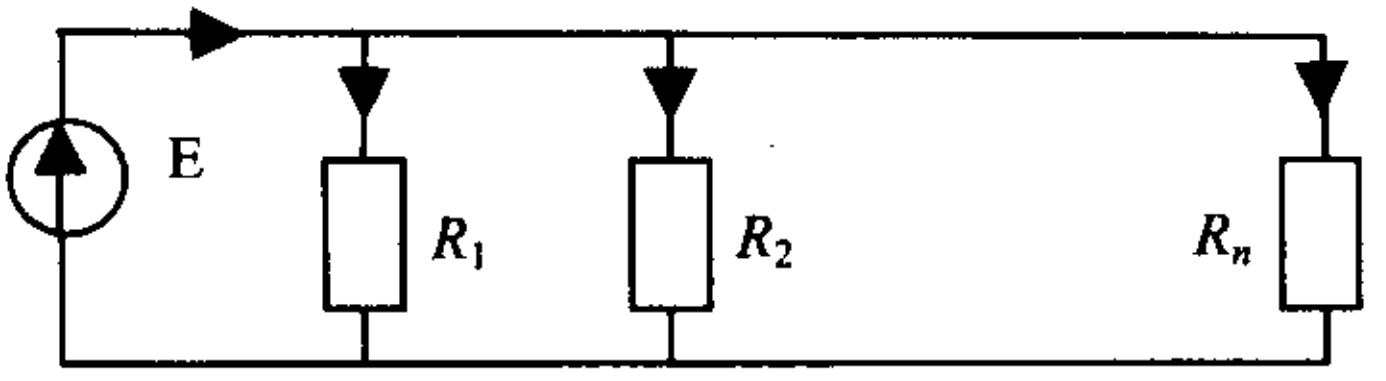


Рис. 1б. Параллельное соединение приемников

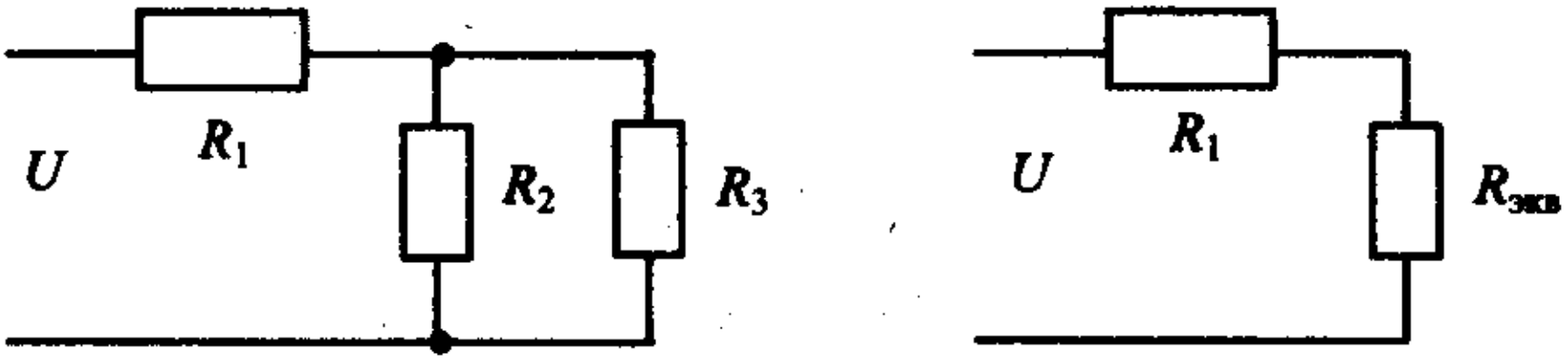


Рис. 1в. Преобразование схемы при смешанном соединении приемников

При параллельном соединении приемников напряжение на всех приемниках одинаково.

По закону Ома токи в каждой ветви:

$$I_1 = \frac{\mathrm{E}}{R_1} \; ; \; I_2 = \frac{\mathrm{E}}{R_2} \; ; \; I_n = \frac{\mathrm{E}}{R_n} .$$

По первому закону Кирхгофа общий ток

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n = \mathrm{E}(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}) =$$

$$= \mathrm{E}(g_1 + g_2 + \cdots + g_n) = \mathrm{E}\, g_{\text{экв}} ;$$

$$g_{\text{экв}} = g_1 + g_2 + \cdots + g_n \; ; \quad R_{\text{экв}} = \frac{1}{g_{\text{экв}}}$$

Смешанное соединение – комбинация первых двух соединений, где параллельное соединение может быть преобразовано к последовательному.

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} .$$

Сложной электрической цепью называется цепь, содержащая несколько источников и которую нельзя

свернуть до простой цепи последовательного или параллельного соединения.

Расчет таких цепей (рис. 2) ведется по уравнениям Кирхгофа.

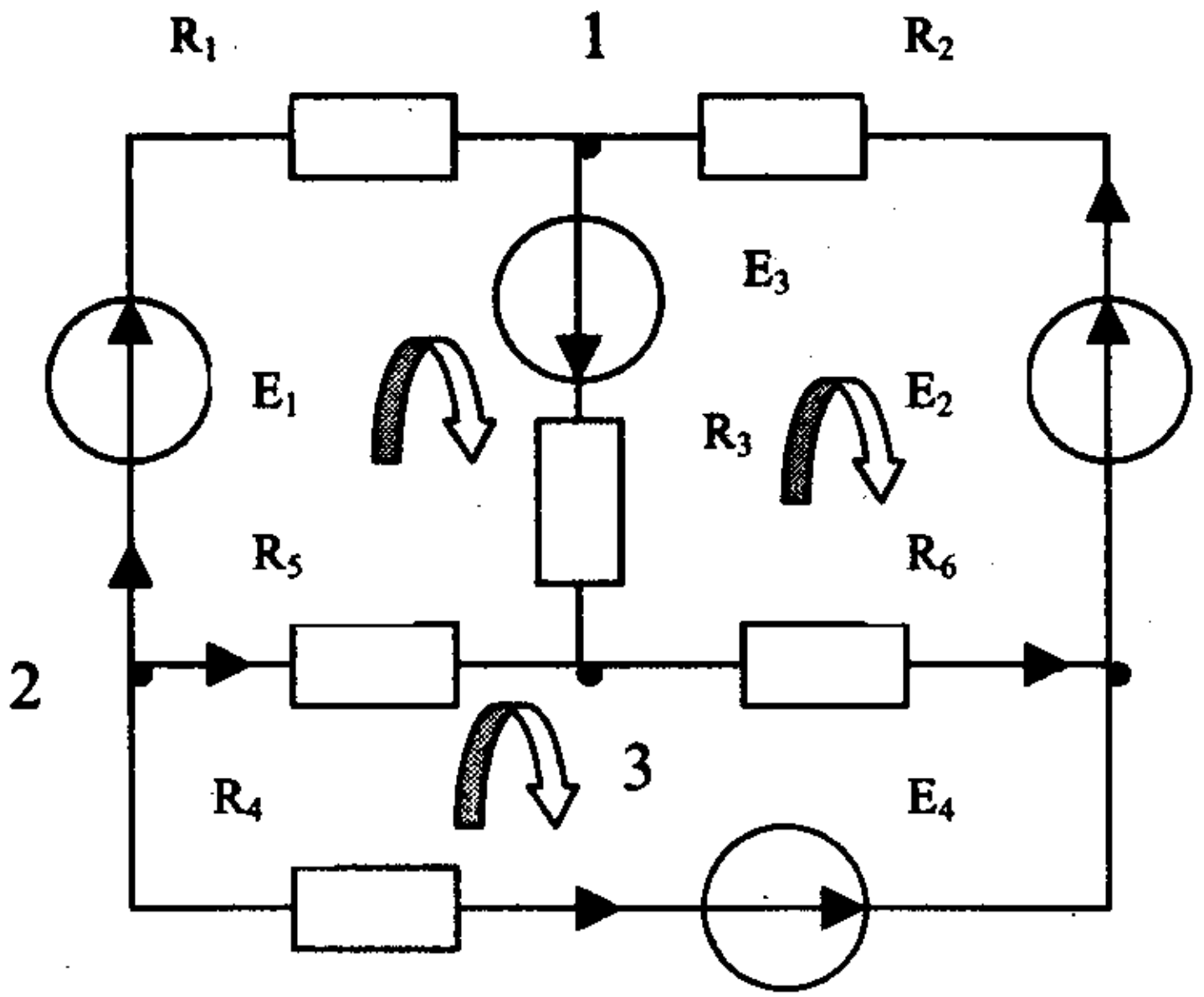


Рис. 2. Схема сложной электрической цепи

Для их составления необходимо задать условные направления токов в ветвях (номер введем в соответствии с порядковым номером сопротивлений).

По первому закону Кирхгофа составляются уравнения для каждого из независимых узлов (для данной схемы таких узлов 3).

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0;$$
$$-I_1 - I_5 - I_4 = 0;$$
$$I_3 + I_5 - I_6 = 0.$$

Выбираются направления обхода в каждом из независимых контуров и составляются уравнения по второму закону Кирхгофа – сумма падений напряжений на пассивных элементах замкнутого контура электрической цепи равна алгебраической сумме источников ЭДС в данном контуре.

$$E_1 + E_3 = I_1 R_1 + I_3 R_3 - I_5 R_5 ;$$

$$- E_2 - E_3 = -I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_6 R_6 ;$$

$$- E_4 = -I_4 R_4 + I_5 R_5 + I_6 R_6 .$$

Для нахождения решения необходимо любым математическим способом решить полученные шесть уравнений, что весьма сложно. Чтобы сократить число уравнений, используют *метод контурных токов*.

Для вывода уравнений по методу контурных токов в общем виде исключим из последних трех уравнений токи ветвей смежных контуров I_3, I_5, I_6, заменив их выражениями, полученными из первых трех уравнений:

$$I_3 = I_1 + I_2 ;$$

$$I_5 = -(I_4 + I_1) ;$$

$$I_6 = I_2 - I_4 ;$$

$$E_1 + E_3 = I_1 (R_1 + R_3 + R_5) + I_2 R_3 - I_4 R_5 ;$$

$$- E_2 - E_3 = -I_2 (R_2 + R_3 + R_6) - I_1 R_3 - I_4 R_6 ;$$

$$- E_4 = -I_4 (R_4 + R_5 + R_6) - I_1 R_5 + I_2 R_6 .$$

Введем обозначения контурных токов:

$I_1 = I_{11}$ – ток первого контура;

$-I_2 = I_{22}$ – ток второго контура;

$-I_4 = I_{33}$ – ток третьего контура.

Для конкретизации и сокращения записи введем обозначения для контурных ЭДС, равных сумме ЭДС источников рассматриваемого контура:

$E_1 + E_3 = E_{11}$; $-E_2 - E_3 = E_{22}$; $-E_4 = E_{33}$;

и соответственно суммы сопротивлений в каждом контуре через контурные сопротивления:

$R_1 + R_3 + R_5 = R_{11}$; $R_2 + R_3 + R_6 = R_{22}$; $R_4 + R_5 + R_6 = R_{33}$,

а сопротивления смежных ветвей как:

$R_3 = R_{12} = R_{21}$; $R_5 = R_{13} = R_{31}$; $R_6 = R_{23} = R_{32}$.

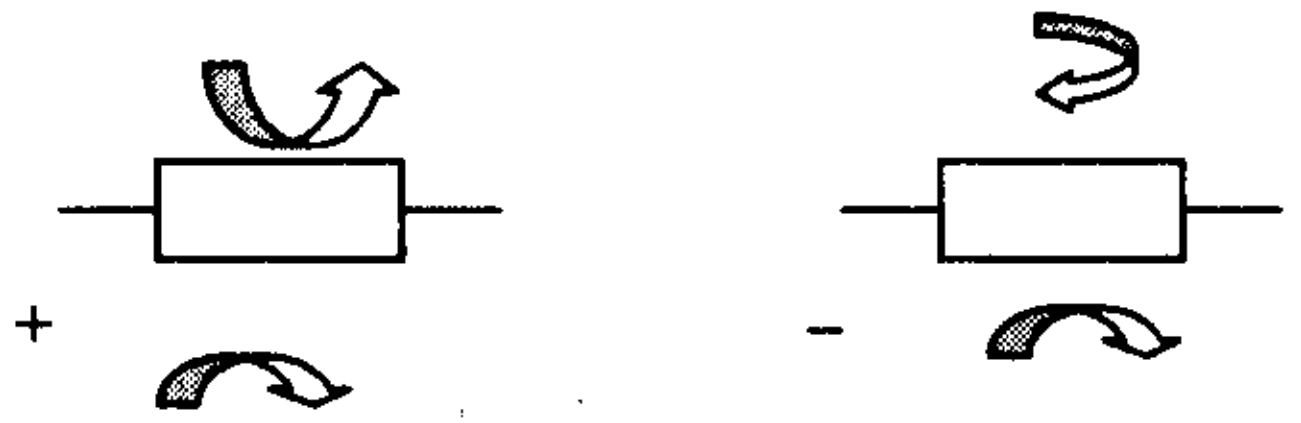
При принятых обозначениях система расчетных уравнений запишется в общем виде как:

$$E_{11} = I_{11} R_{11} - I_{22} R_{12} - I_{33} R_{13} - \ldots - I_{nn} R_{1n};$$

$$E_{22} = -I_{11} R_{11} + I_{22} R_{22} - I_{33} R_{23} - \ldots - I_{nn} R_{2n};$$

$$E_{nn} = -I_{nn} R_{n1} - I_{22} R_{n2} - I_{33} R_{n3} - \ldots + I_{nn} R_{nn}.$$

Примечание: знак слагаемых, входящих в уравнения с множителями смежных ветвей, определяется выбранным направлением токов ветвей и направлением обхода контура: положительный при согласном направлении и отрицательный при встречном.



Метод узловых потенциалов

Вторым методом, которым пользуются для решения сложных цепей, является *метод узловых потенциалов*. Этот

метод основан на составлении уравнений по первому закону Кирхгофа, схема (рис. 3).

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

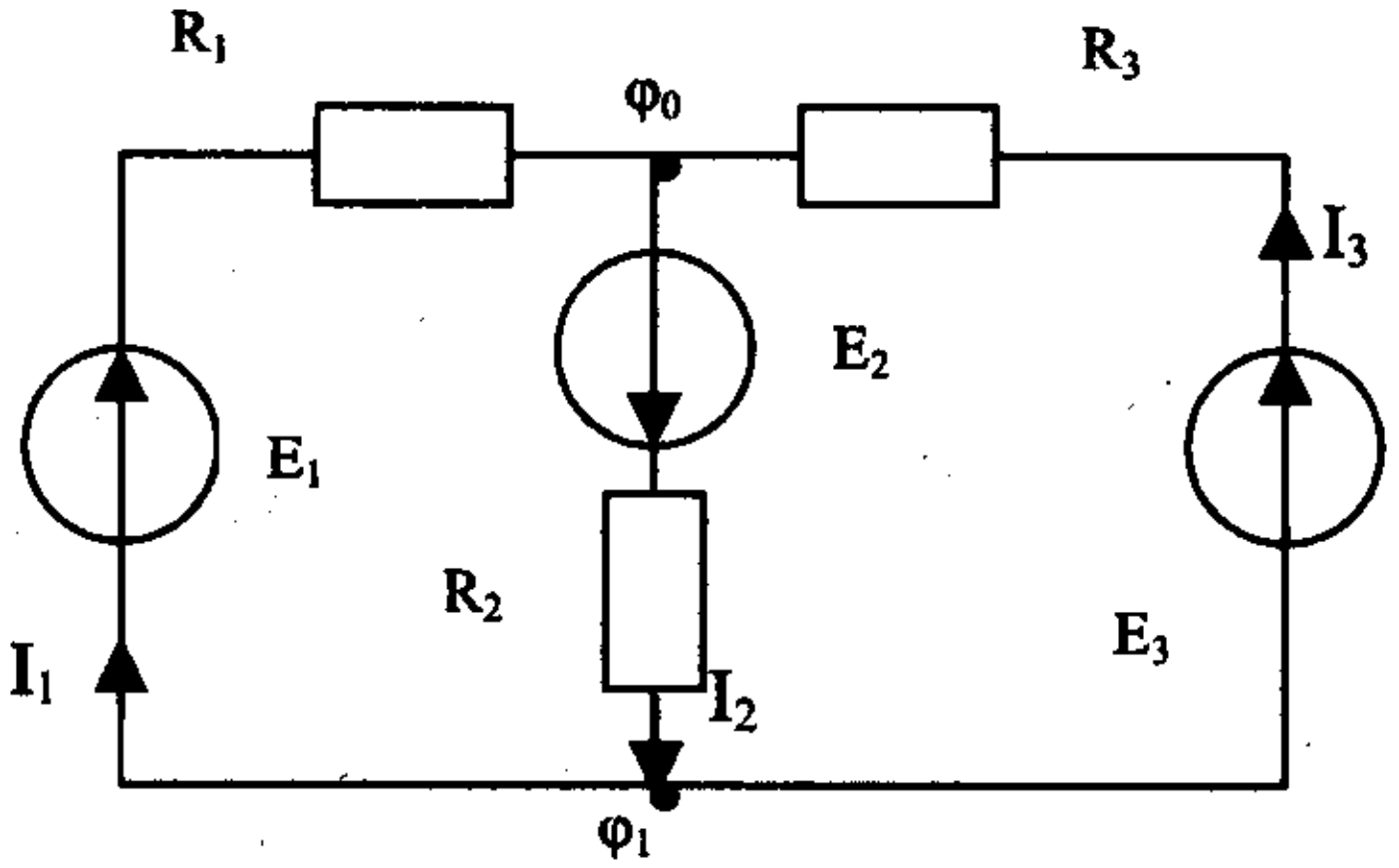


Рис. 3. Схема сложной электрической цепи с двумя узлами

Токи каждой из параллельных ветвей определяются как:

$$I_1 = \frac{E_1 + U_{10}}{R_1} = \frac{E_1 + \varphi_1}{R_1};$$

$$I_2 = \frac{E_2 + U_{01}}{R_2} = \frac{E_2 - \varphi_1}{R_2};$$

$$I_3 = \frac{E_3 + U_{10}}{R_3} = \frac{E_3 + \varphi_1}{R_3}.$$

Напряжения между точками с заданными потенциалами при $\varphi_0 = 0$:

$$U_{10} = \varphi_1 - \varphi_0 = \varphi_1; \qquad U_{01} = \varphi_0 - \varphi_1 = -\varphi_1.$$

Подставив полученные значения токов в первое уравнение

$$-\frac{E_1+\varphi_1}{R_1}+\frac{E_2-\varphi_1}{R_2}-\frac{E_3+\varphi_1}{R_3}=0;$$

$$-\frac{E_1}{R_1}+\frac{E_2}{R_2}-\frac{E_3}{R_3}=\varphi_1\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}\right);$$

получим выражение для потенциала φ_1

$$\varphi_1=\frac{-E_1Y_1+E_2Y_2-E_3Y_3}{Y_1+Y_2+Y_3}.$$

При решении методом узловых потенциалов необходимо помнить, что в левой части уравнения знак ЭДС (+), если она направлена к рассматриваемому узлу, и знак (–), если от узла. В случае последовательного соединения сопротивлений в ветви

$$Y=1/Z_1+Z_2.$$

В общем виде уравнения узловых потенциалов имеют вид:

$$I_{11}=\varphi_1Y_{11}-\varphi_1Y_{12}-\varphi_3Y_{13}\ldots\ldots-\varphi_mY_{1m};$$

$$I_{22}=-\varphi_1Y_{21}+\varphi_2Y_{22}-\varphi_3Y_{23}\ldots\ldots-\varphi_mY_{2m};$$

$$I_{NN}=\varphi_1Y_{N1}-\varphi_2Y_{N2}-\varphi_3Y_{N3}\ldots\ldots\varphi_NY_{Nm}.$$

Если в схеме имеются источники тока, то слагаемое в правой части будет равно сумме источников тока:

$$I_{11}=\sum I_к.$$

Метод узловых потенциалов имеет преимущество, если число независимых узлов меньше числа контуров.

При наличии источников тока контура надо выбирать так, чтобы источники входили только в один контур. Тогда ток этого контура будет равен току источника.

Баланс мощности

На основании закона сохранения энергии мощность, развиваемая источниками электрической энергии, должна быть равна мощности преобразования в цепи электрической энергии в другие виды энергии:

$$\sum EI = \sum RI^2 ,$$

где $\sum EI$ – сумма мощностей, развиваемых источниками;

$\sum RI^2$ – сумма мощностей всех приемников и необратимых преобразований энергии внутри источников.

4.2. Электрические цепи переменного тока

Переменный ток получил гораздо большее распространение в промышленности и в быту, чем постоянный, так как упрощается конструкция электродвигателей, а синхронные генераторы могут быть выполнены на значительно большие мощности и более высокие напряжения, чем генераторы постоянного тока. Переменный ток позволяет легко изменять величину напряжения с помощью трансформаторов, что необходимо при передаче электроэнергии на большие расстояния.

Переменным током называется ток, периодически меняющийся по величине и направлению и характеризующийся амплитудой, периодом, частотой и фазой.

Амплитудой переменного тока называется наибольшее значение, положительное или отрицательное, принимаемое переменным током.

Периодом называется время, в течение которого происходит полное колебание тока в проводнике.

Частота – величина, обратная периоду.

Фазой называется угол ωt или $\omega t \pm \psi$, стоящий под знаком синуса. Фаза характеризует состояние переменного тока с течением времени. При $t=0$ фаза называется начальной.

Периодический режим: $I_0(t) = I_0(t + кT)$. К такому режиму может быть отнесен и синусоидальный:

$$U_0(t) = U_0(\omega t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

где U_m – амплитуда; ψ_u – начальная фаза; $\omega = 2\pi / T = 2\pi f$ – угловая скорость вращения ротора генератора.

При $f = 50$ Гц $\quad T = 1/f = 0{,}02$ с, $\quad \omega \approx 314$ рад/с.

График синусоидальной функции называется волновой диаграммой (рис. 4).

Расчет цепей переменного тока с использованием мгновенных значений тока, напряжения и ЭДС требует громоздкой вычислительной работы. Поэтому изменяющиеся непрерывно во времени токи, напряжения и ЭДС заменяют эквивалентными во времени величинами.

При расчете электрических цепей синусоидальную функцию выражают по формуле Эйлера через экспоненциальные функции:

$$\ell^{j\alpha} = \cos\alpha + j\sin\alpha; \quad \cos\alpha = \frac{\ell^{j\alpha} + \ell^{-j\alpha}}{2};$$

$$\sin\alpha = \frac{\ell^{j\alpha} - \ell^{-j\alpha}}{2j};$$

где $j = \sqrt{-1}$.

Тогда

$$U(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u) = \frac{U_m \ell^{j(\omega t + \Psi_u)} - U_m \ell^{-j(\omega t + \Psi_u)}}{2j} =$$

$$= \frac{\dot{U}_m \ell^{j\omega t} - \dot{U}_m \ell^{-j\omega t}}{2j},$$

где $\ell^{j(\omega t + \Psi_u)} = \ell^{j\omega t} \ell^{j\Psi_u}$; $\ell^{j\omega t}$ – поворотный множитель; $U_m \ell^{j\Psi_u} = \dot{U}_m$ – комплексная амплитуда напряжения; $U_m \ell^{-j\Psi_u} = \overset{*}{\dot{U}}_m$ – сопряженная комплексная амплитуда напряжения.

Таким образом, синусоидальное напряжение можно представить на комплексной плоскости вращающимся вектором. Тогда амплитудное значение напряжения U_m будет представлять собой модуль или длину вектора напряжения (рис. 5).

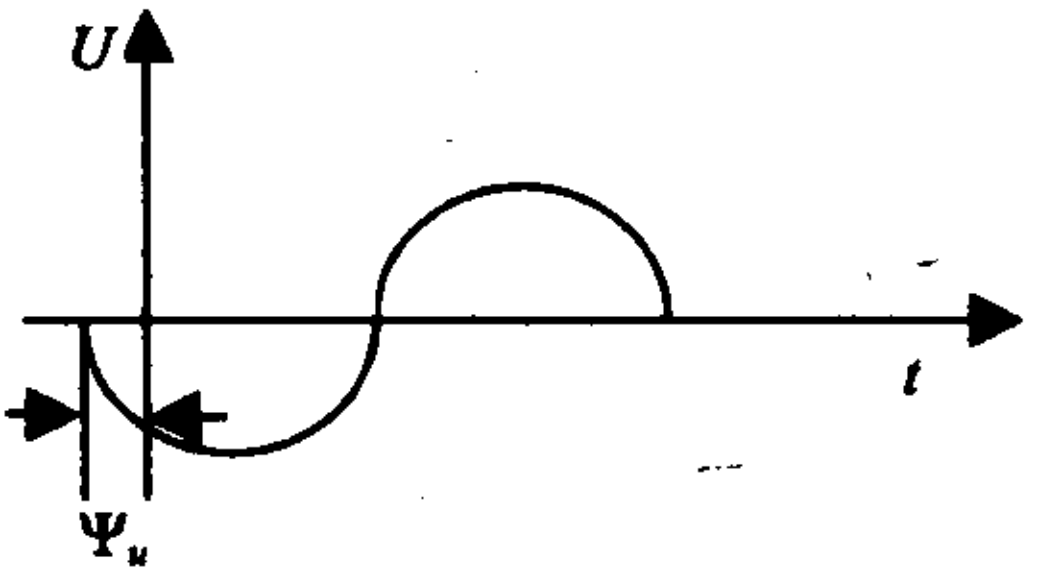


Рис. 4. Волновая диаграмма напряжения

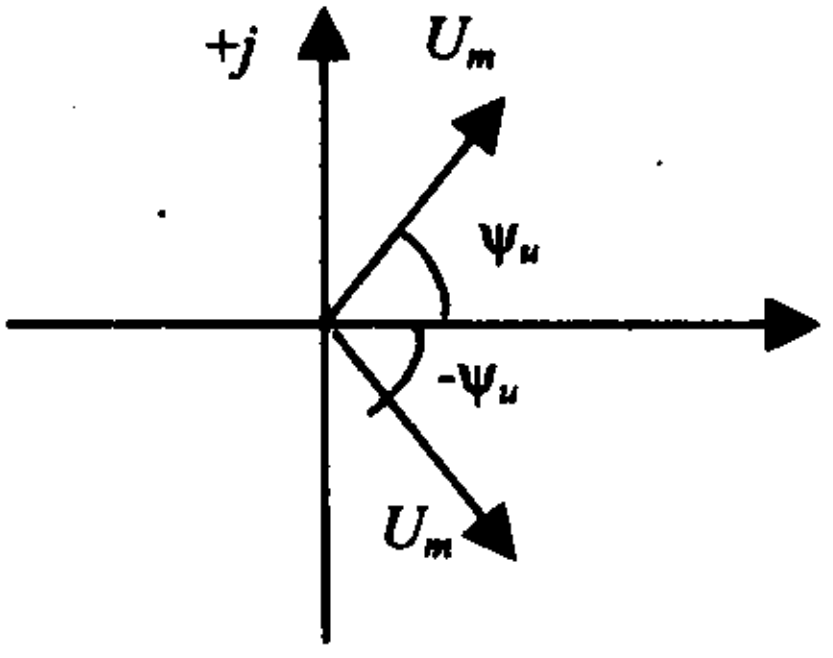


Рис. 5. Вектор напряжения на комплексной плоскости

Так как в цепи с синусоидальным напряжением ток тоже будет подчиняться этому закону, то аналогично можно записать

$$I_0(t) = I_m \sin(\omega t + \Psi_i) = \frac{I_m \ell^{j(\omega t + \Psi_i)} - I_m \ell^{-j(\omega t + \Psi_i)}}{2j} = \frac{\dot{I}_m \ell^{j\omega t} - \overset{*}{I}_m \ell^{-j\omega t}}{2j};$$

где $I_m \ell^{j\Psi i} = \dot{I}_m -$ комплексная амплитуда тока;

$I_m \ell^{-j\Psi_i} = \overset{*}{I}_m -$ сопряженная комплексная амплитуда тока.

Разделив напряжение на ток, получим закон Ома в комплексном виде:

$$\frac{U_0(t)}{I_0(t)} = \frac{\dot{U}_m \ell^{j\omega t} - \overset{*}{U}_m \ell^{-j\omega t}}{2j} : \frac{\dot{I}_m \ell^{j\omega t} - \overset{*}{I}_m \ell^{-j\omega t}}{2j} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{U_m \ell^{j\Psi_u}}{I_m \ell^{j\Psi_i}} = Z.$$

При $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ напряжение на сопротивлении согласно закону Ома $u = iR = RI_m \sin(\omega t + \psi_i) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$. Таким образом, следует отметить, что *на активном сопротивлении* напряжение и ток совпадают по фазе и $\psi_u - \psi_i = \varphi = 0$ (рис. 6).

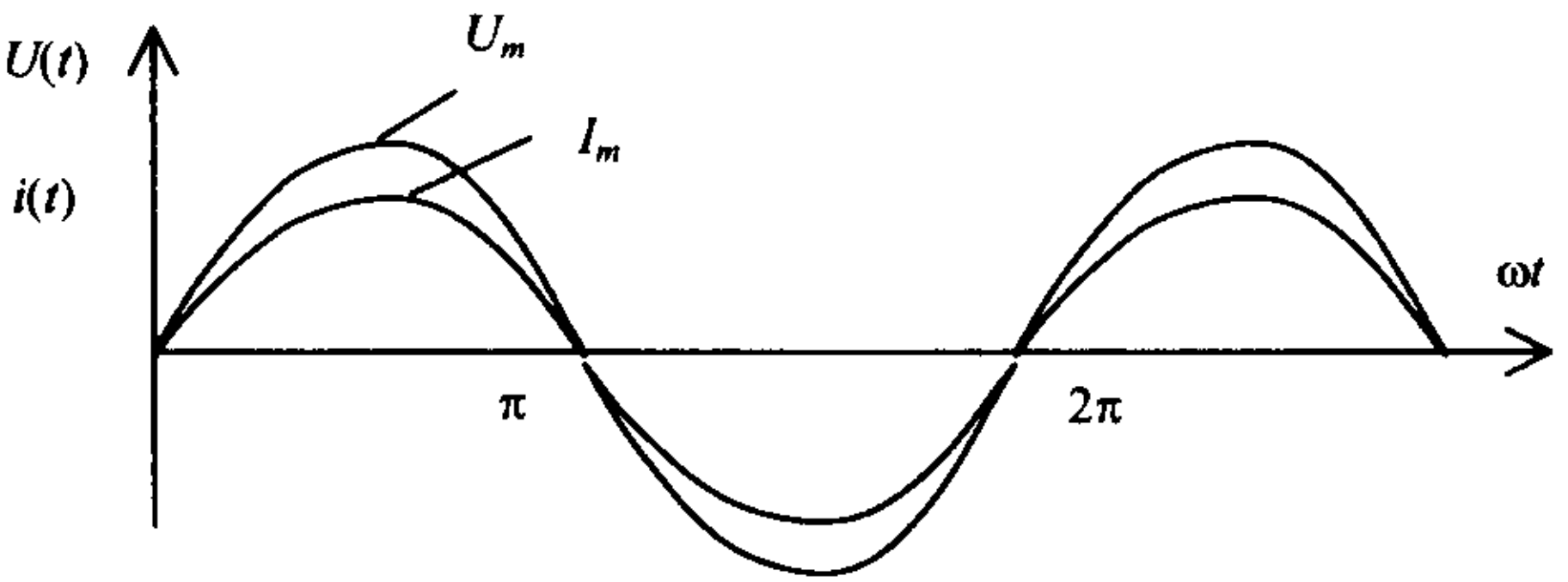


Рис. 6. Кривые напряжения и тока в активном сопротивлении

Величину переменного напряжения или тока можно оценить значением амплитуды или средним значением за полупериод или действующим значением. При изменении напряжения или тока по закону синуса среднее значение напряжения определяется

$$U_{cp} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} U_m \sin(\omega t)\, d\omega t = \frac{2U_m}{\pi} = 0.637 \cdot U_m .$$

Тепловое действие тока, а также сила взаимодействия двух проводников, по которым проходит один и тот же ток, пропорциональны квадрату тока. Поэтому о величине тока судят по так называемому действующему (среднеквадратичному) значению за период.

Действующее значение переменного тока равно по величине такому постоянному току, который, проходя через неизменное сопротивление R за период T, выделяет то же количество тепла, что и переменный ток.

$$RI^2T = \int_0^T Ri^2 dt \text{ , откуда } I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt} .$$

При синусоидальном законе изменения действующие значения тока и напряжения:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \qquad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} .$$

Приборы электромагнитной системы, применяемые для измерений напряжений и токов на переменном токе, регистрируют действующие значения. Соответственно градуируются и шкалы этих приборов.

Ток, протекающий через индуктивность L (рис. 7), меняется по закону синуса $i = I_m \sin(\omega t + \psi_t)$.

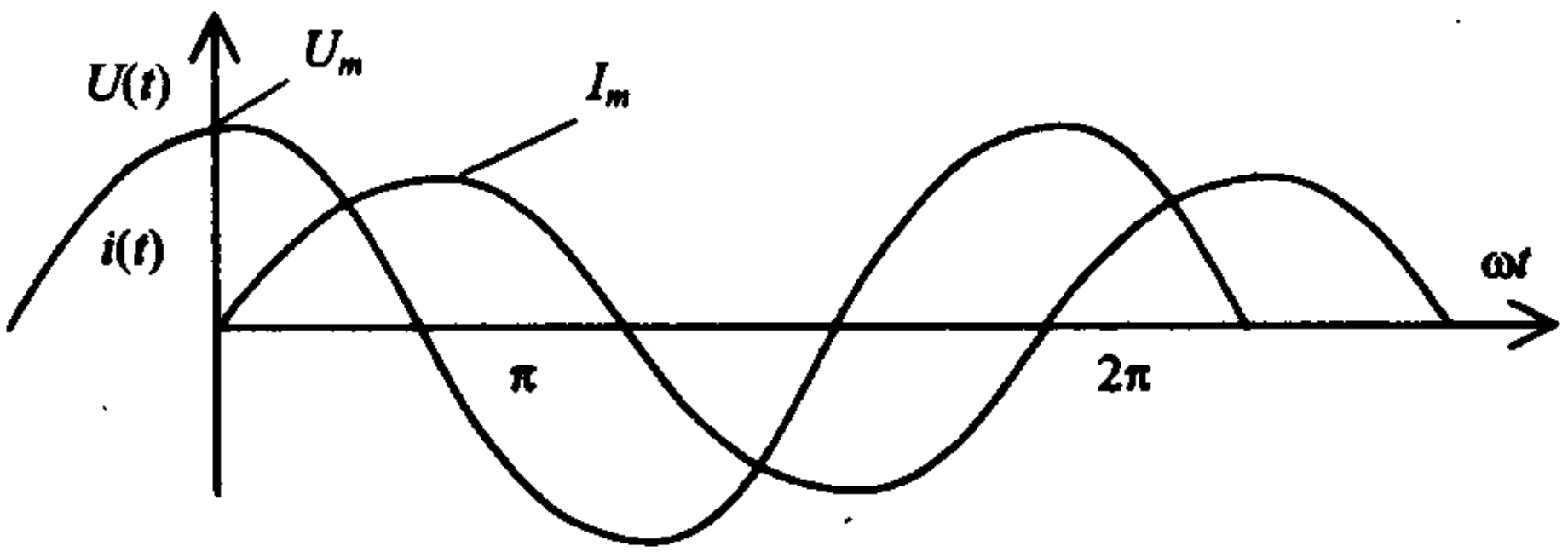


Рис. 7. Кривые напряжения и тока в индуктивном сопротивлении

Напряжение на индуктивности определяется выражением

$$U = U_L = -e_L = L\frac{di}{dt} = L\omega I_m \cos(\omega t + \psi_i) = U_m \sin(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}),$$

где $U_m = I_m \omega L = I_m X_L$; $X_L = \omega L = 2\pi f L$ – модуль индуктивного сопротивления цепи переменного тока.

В идеальной индуктивности ток отстает от напряжения на 90°.

$$\psi_u - \psi_i = \varphi = 90^0.$$

Если напряжение на емкости меняется по закону синуса (рис. 8) $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$, то

$$i = C\frac{dU_c}{dt} = C\omega U_m \cos(\omega t + \psi_u) = I_m \sin(\omega t + \psi_u + \frac{\pi}{2});$$

$$I_m = U_m \omega C; \quad X_c = \frac{1}{\omega C}; \quad I_m = \frac{U_m}{X_c} = U_m \omega C.$$

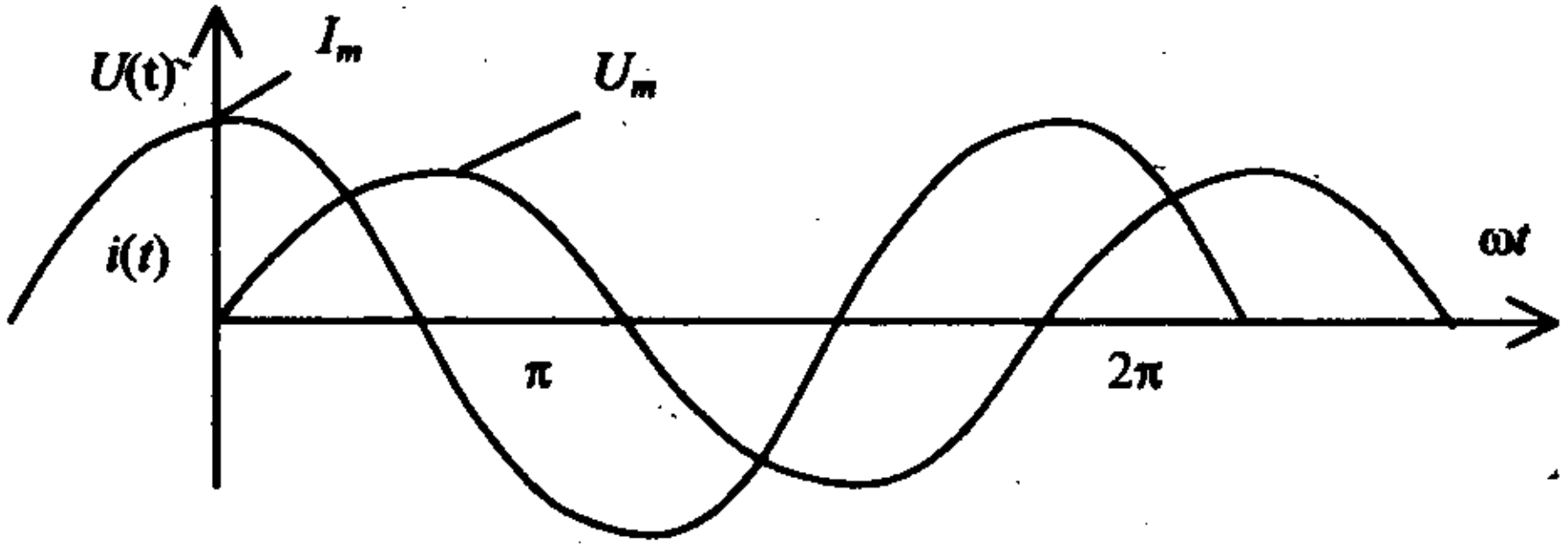


Рис. 8. Кривые напряжения и тока в емкостном сопротивлении

В идеальной емкости ток опережает напряжение на 90°.

$$\psi_i - \psi_u = \varphi = 90^0 .$$

Режим – состояние электрической цепи переменного тока описывается дифференциальными уравнениями, представляющими собой уравнения с постоянными коэффициентами и правой частью, например $Ri + L\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = U(t)$.

Из курса высшей математики известно, что общее решение такого уравнения может быть найдено методом наложения принужденного и свободного режимов:

$$i = i_{\text{св}} + i_{\text{пр}}, \quad Ri_{\text{св}} + L\frac{\mathrm{d}i_{\text{св}}}{\mathrm{d}t} = 0,$$

где $\mathrm{i}_{пр} = \mathrm{U}/\mathrm{R}$ **– ток принужденного режима при** $d\,\mathrm{i}/d\,\mathrm{t} = 0$ **и** $U(t) = U_0$; $\mathrm{i}_{св} = Ae^{\kappa t}$ **– ток свободного режима.**

Свободные процессы исследуются с целью определения устойчивости системы. В устойчивой системе процессы должны затухать. Принужденный и свободный режимы в сумме определяют процессы, которые называются переходными, т.е. осуществляется переход от одного установившегося режима к другому.

При установившемся режиме ток и напряжение сохраняют в течение длительного времени амплитудные значения.

В цепях постоянного тока токи и напряжения остаются неизменными, а в цепях переменного тока остаются неизменными кривые изменения токов и напряжений.

4.3. Мощность цепи переменного тока

В периодическом синусоидальном режиме

$$p(t) = u(t)i(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u) I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

Используя известное тригонометрическое преобразование

$$\sin\alpha \sin\beta = \frac{1}{2}\left[\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)\right]$$

и обозначив $\varphi = \psi_u - \psi_i$, получим

$$p(t) = \frac{U_m I_m}{2}\left[\cos(\psi_u - \psi_i) - \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i)\right] =$$

$$= UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i).$$

Среднее за период значение гармонической функции удвоенной частоты равно нулю. Отсюда получаем, что мощность в цепи переменного тока не зависит от времени и определяется ее средним значением

$$P_{\text{ср}} = P = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} p(\omega t)\,\mathrm{d}\,\omega t = UI\cos\varphi,$$

где cosφ – энергетическое значение коэффициента мощности,

$$I = \frac{P}{U\cos\varphi};\quad P = UI\cos\varphi = RI^2 = U^2 g.$$

При заданных P и U ток является функцией cosφ. Потери мощности на сопротивлении $\Delta P = I^2 R$.

В цепи с резистором $\varphi = 0$, на рис. 9 приведены временные характеристики тока и напряжения, а на рис. 10 – кривая мощности, соответствующие указанному режиму.

Cosφ имеет большое практическое и экономическое значение, так как характеризует степень использования энергетического оборудования. Увеличение cosφ дает возможность полнее использовать номинальную мощность генератора электрической энергии, повысить его КПД.

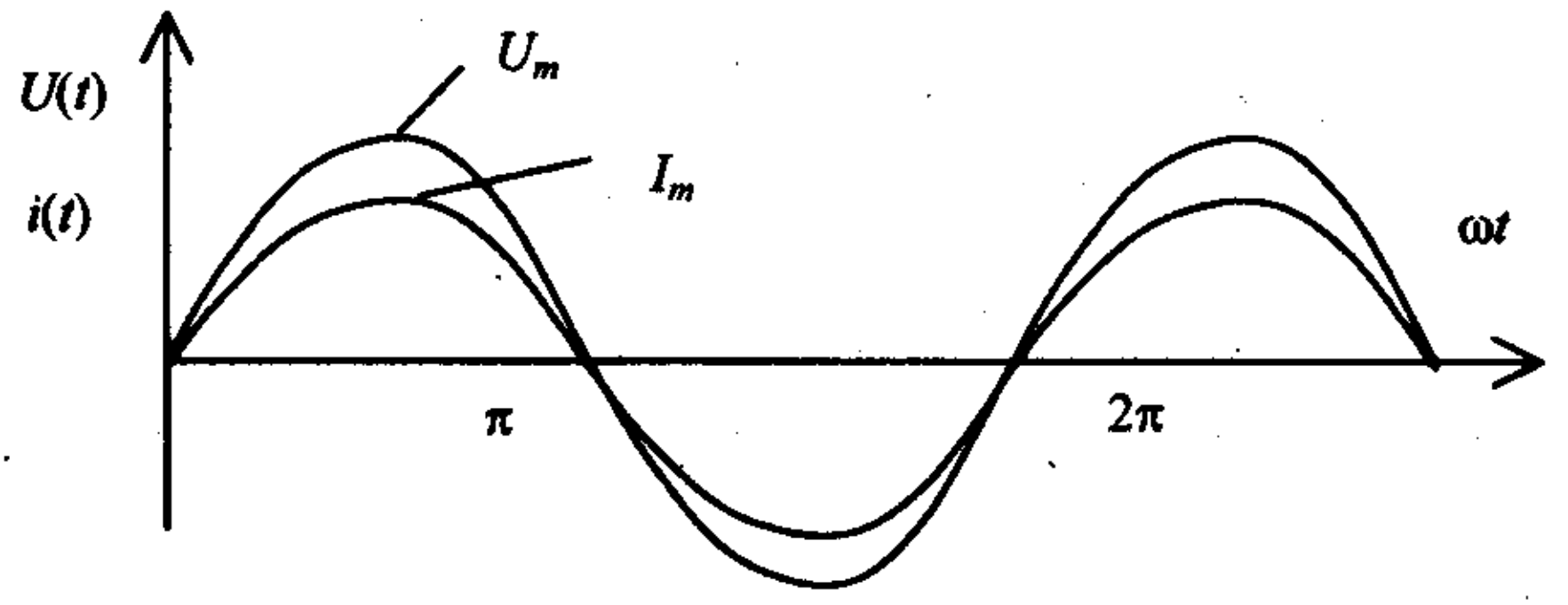


Рис. 9. Напряжение и ток в активном сопротивлении

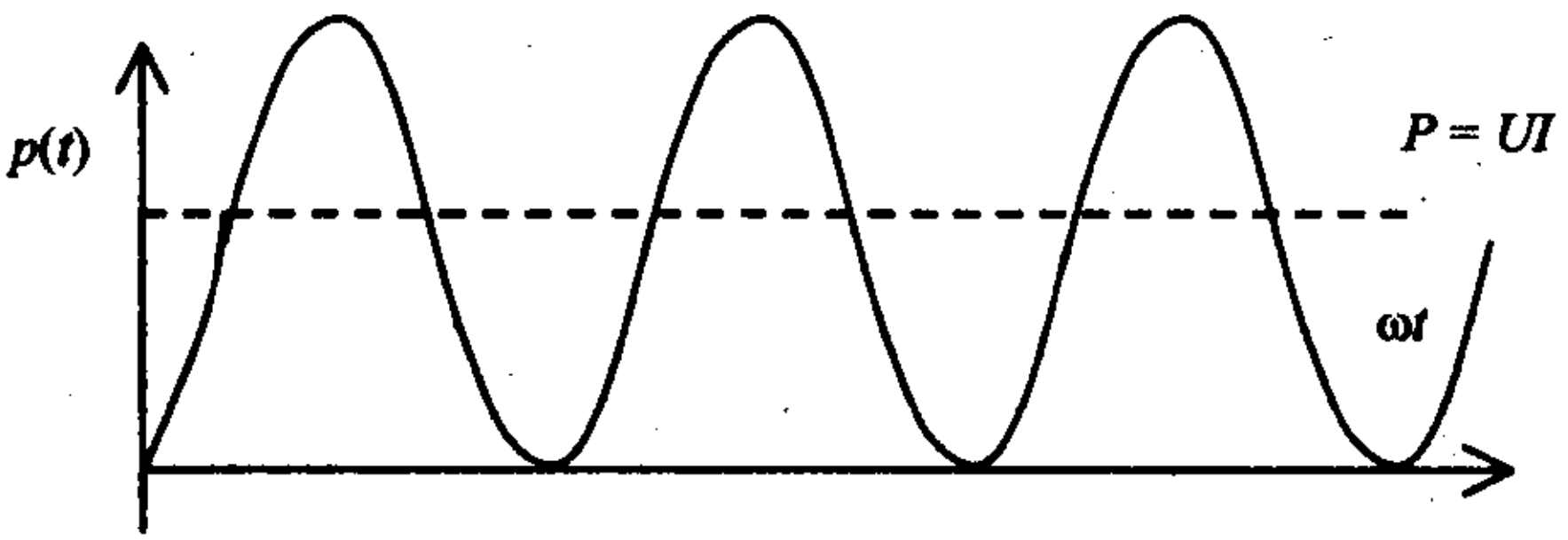


Рис. 10. Мощность в активном сопротивлении

Мгновенное значение мощности для цепи с резистором:

$$p = ui = U_m I_m \sin^2(\omega t + \psi_u) = \frac{U_m I_m}{2}\left(1 - \cos 2(\omega t + \psi_u)\right);$$

$$p = UI - UI\cos 2(\omega t + \psi_u).$$

Действующее значение мощности:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\,\mathrm{d}t = UI = I^2 R.$$

Активная мощность в цепи с идеальной катушкой индуктивности равна 0. Реактивная мощность определяется выражением $Q = U_L I = I^2 X_L$.

Аналогичные выкладки можно проделать для цепи с идеальным конденсатором: $P = 0$, $Q = U_c I = I^2 X_c$.

4.4. Символический метод расчета цепей переменного тока

Для цепи переменного тока с последовательным соединением R, L, C (рис. 11) дифференциальные уравнения по второму закону Кирхгофа имеют вид:

$$U = iR + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + U_c i = C\frac{\mathrm{d}U_c}{\mathrm{d}t}.$$

Решение системы дифференциальных уравнений можно существенно упростить, если перейти от дифференциальных уравнений к алгебраическим. Это можно сделать, изображая синусоидальные величины (i, u) в комплексной форме, т.е. в виде вектора на комплексной плоскости (рис. 12).

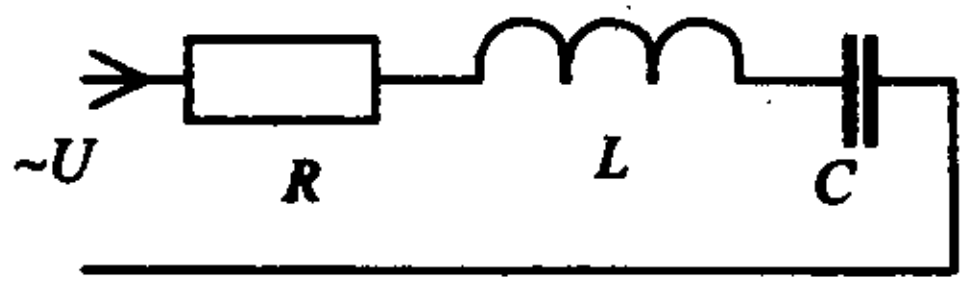


Рис. 11. Последовательное включение *R*, *L*, C

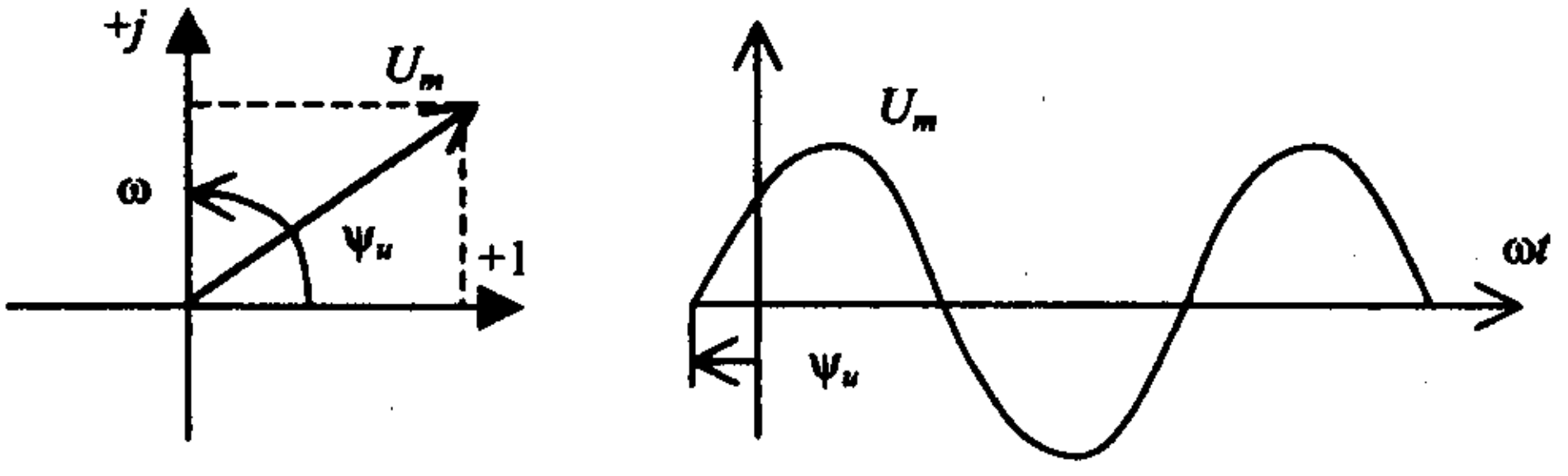


Рис. 12. Вектор U_m и его проекции на ось мнимых чисел

Расположим под углом ψ_u относительно оси абсцисс вектор U_m, длина которого в масштабе равна амплитуде изображаемой величины. Положительные углы будем откладывать в направлении против часовой стрелки.

Проекции вектора на вертикальную ось мнимых величин в комплексной плоскости равны мгновенному значению напряжения.

Система векторов на комплексной плоскости называется векторной диаграммой. Вектора вращаются относительно центра координат с одной и той же скоростью и поэтому относительно друг друга их положение не меняется. Векторная диаграмма изображается неподвижной в заданный момент времени, определяемый начальной

фазой какой-либо величины, например, для идеальных элементов R, L, C (рис. 13).

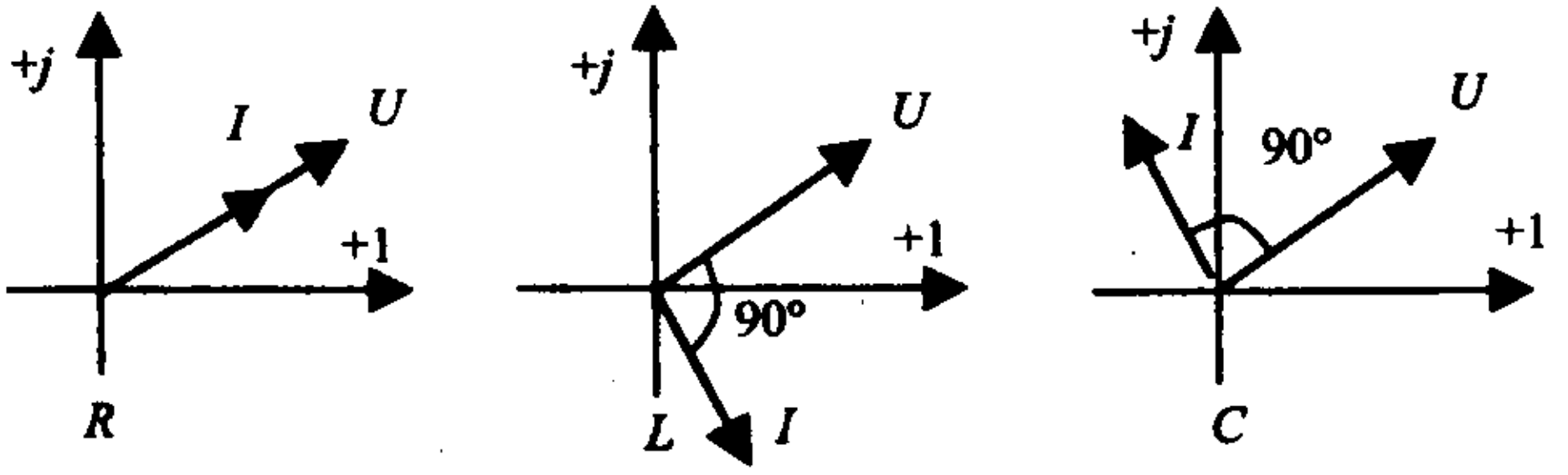


Рис. 13. Векторные диаграммы для идеальных элементов R, L, C

Сложение двух функций в тригонометрической форме трудоемко, но легко производится в векторной форме (рис. 14).

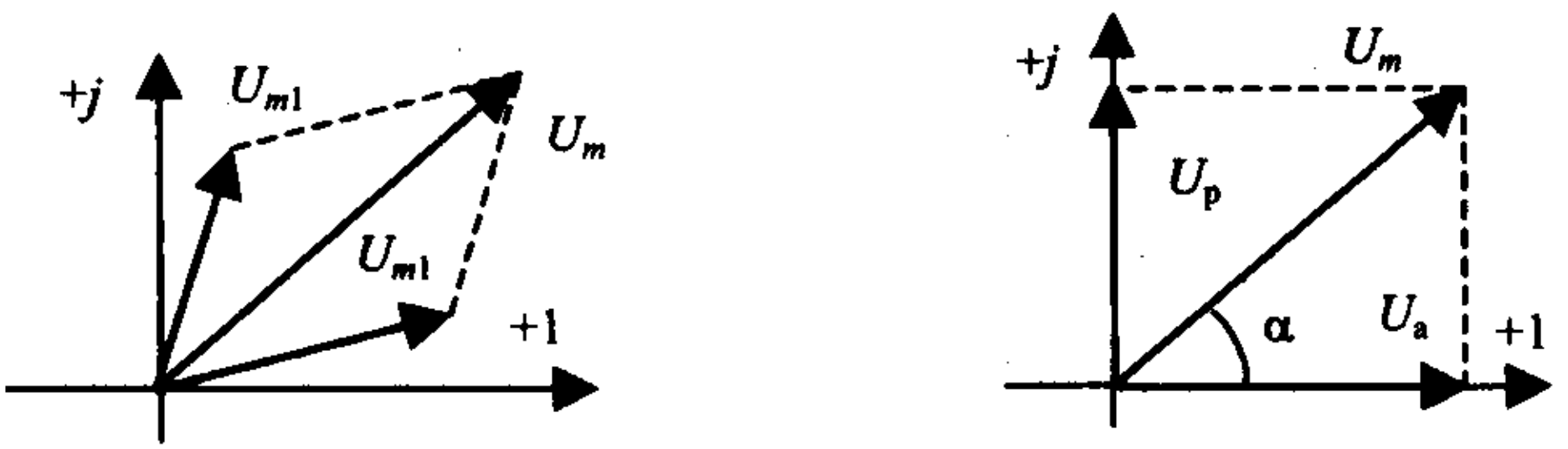


Рис. 14. Векторные диаграммы сложения двух напряжений

В расчетах применяют три формы записи комплексных величин:

1) алгебраическая $\dot{U} = U_a + jU_p$;

2) тригонометрическая

$$\dot{U} = U\cos\alpha + jU\sin\alpha = U(\cos\alpha + j\sin\alpha);$$

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}\ ;\ \alpha = \operatorname{arctg} U_p / U_a;$$

3) показательная, учитывая $\cos\alpha + j\sin\alpha = e^{j\alpha}$;

$$\dot{U} = Ue^{j\alpha};\quad U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2};\quad \alpha = \operatorname{arctg} U_p / U_a .$$

Символ *j* перед мнимой частью комплексного числа в алгебраической форме означает, что мнимая часть повернута по отношению к вещественной на угол 90° в положительном направлении (против часовой стрелки).

Переходы из одной формы записи в другие:

$$a + jb \;\Rightarrow\; A\sin(\omega t + \psi) \;\Rightarrow\; Ae^{j\psi},$$

где $A = \sqrt{a^2 + b^2}$, $\psi = \operatorname{arctg}\dfrac{b}{a}$;

$$Ae^{j\psi} \;\Rightarrow\; a + jb,$$

где $a = A\cos\psi$, $b = A\sin\psi$.

Представленная ранее система дифференциальных уравнений для цепи переменного тока с *R*, *L*, C в комплексном виде записывается следующим образом:

$$U_m e^{j\omega t} e^{j\psi_u} = RI_m e^{j\omega t} e^{j\psi_i} + I_m \omega L e^{j\omega t} e^{j\psi_i} e^{j90} + U_{cm} e^{j\omega t} e^{j\psi_{uc}};$$

$$I_m e^{j\omega t} e^{j\psi_i} = \omega C U_{cm} e^{j\omega t} e^{j\psi_{uc}} e^{j90};$$

$$U_{cm} = \frac{I_m}{\omega C} e^{j\psi_i} e^{-j\psi_{uc}} e^{-j90}.$$

Используя выражения $e^{j90} = j$, $e^{-j90} = -j$, **запишем выражение для полного напряжения цепи:**

$$U_m e^{j\psi_u} = I_m e^{j\psi_i}\left(R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}\right),$$

где $R + j\omega L - j\dfrac{1}{\omega C} = Z$ – комплексное сопротивление;

$U_m e^{j\psi_u} = \dot{U}_m$ – комплексная амплитуда напряжения;

$I_m e^{j\psi_i} = \dot{I}_m$ – комплексная амплитуда тока.

При замене амплитудных значений на действующие получим закон Ома в комплексной форме:

$$\dot{U} = \dot{I}\,Z\,.$$

Первый закон Кирхгофа в комплексной форме:

$$\sum_{к=1}^{n} \dot{I}_к = 0\,.$$

Второй закон Кирхгофа в комплексной форме:

$$\sum_{к=1}^{n} \dot{E}_к = \sum_{к=1}^{m} \dot{I}_к Z_к\,.$$

Векторная диаграмма напряжений для цепи (рис. 11) будет представлять собой прямоугольный треугольник (рис. 15).

$U_р = U\sin\varphi = XI$;

$U_а = U\cos\varphi = RI$;

$U = \sqrt{U_а^2 + U_р^2}$; $\varphi = \operatorname{arctg}\dfrac{U_р}{U_а}$.

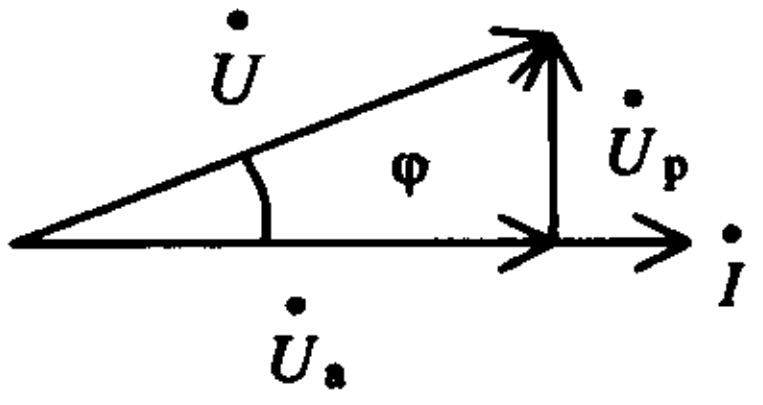


Рис. 15. Треугольник напряжений

Треугольники токов, сопротивлений (рис.16) и мощностей (рис.17) строятся аналогично:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}\,; \quad R = Z\cos\varphi\,; \quad X = Z\sin\varphi\,;$$

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z};\ \sin\varphi = \frac{X}{Z};\ tg\varphi = \frac{X}{R}.$$

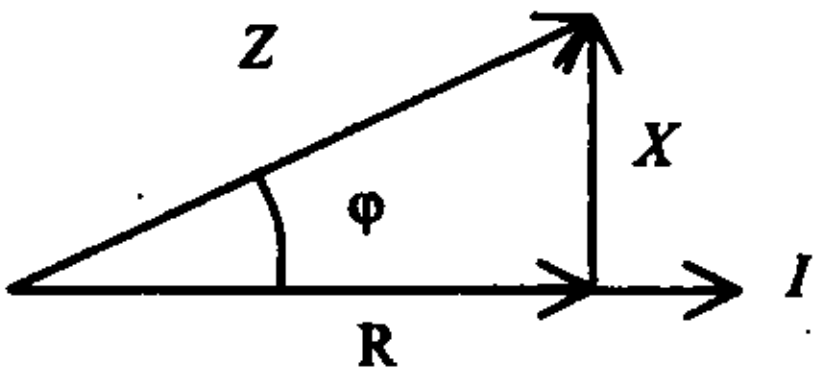


Рис. 16. Треугольник сопротивлений

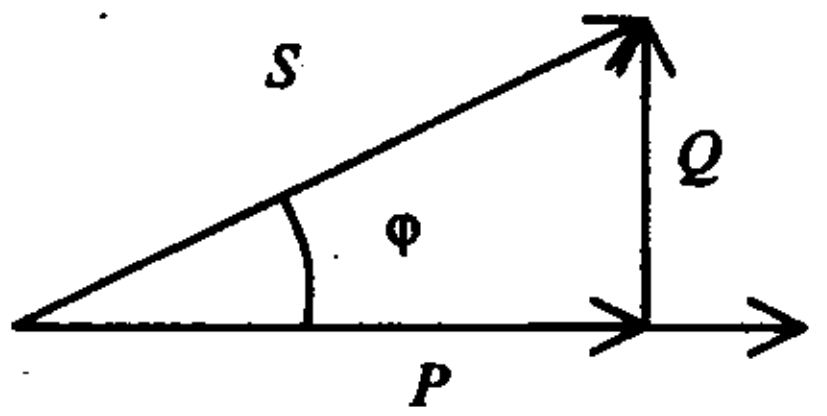


Рис. 17. Треугольник мощностей

Полная мощность $S = UI$; **активная мощность** $P = UI\cos\varphi$; **реактивная мощность** $Q = UI\sin\varphi$, **где** $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$; $P = S\cos\varphi$; $\cos\varphi = P/S$; $Q = S\sin\varphi$; $\sin\varphi = Q/S$; $\mathrm{tg}\,\varphi = Q/P$.

В треугольниках напряжений, токов, сопротивлений и мощностей угол φ сохраняет свое значение.

При параллельном соединении ветвей (рис. 18) их проводимости складываются в комплексной форме:

$$Y_{экв} = Y_1 + Y_2 + \cdots + Y_n;$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{Z_1};\quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{Z_2};\quad \dot{I}_n = \frac{\dot{U}}{Z_n}.$$

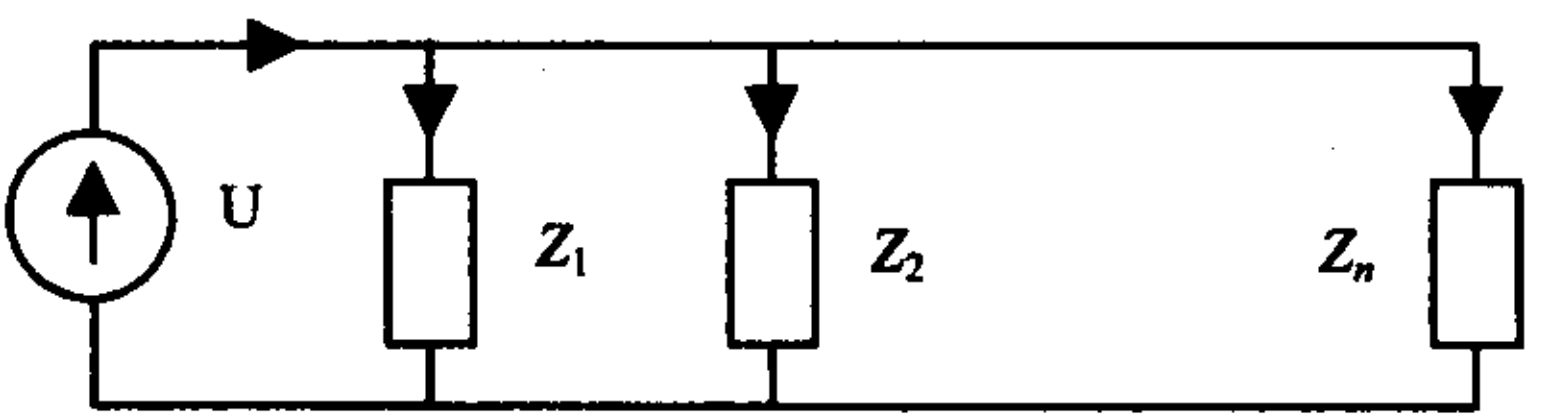


Рис. 18. Параллельное соединение ветвей

Общий ток, согласно первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}=\dot{I}_1+\dot{I}_2+\cdots+\dot{I}_n=\dot{U}\left(\frac{1}{Z_1}+\frac{1}{Z_2}+\cdots+\frac{1}{Z_n}\right)=\dot{U}(Y_1+Y_2+\cdots+Y_n)=\dot{U}Y_{\text{экв}}.$$

4.5. Резонансные явления в электрических цепях

Идеальное активное сопротивление от частоты не зависит, индуктивное сопротивление линейно зависит от частоты, емкостное сопротивление зависит от частоты по гиперболическому закону (рис. 19):

$$R = \text{const}, X_L = j\omega L, X_C = -j(1/\omega C).$$

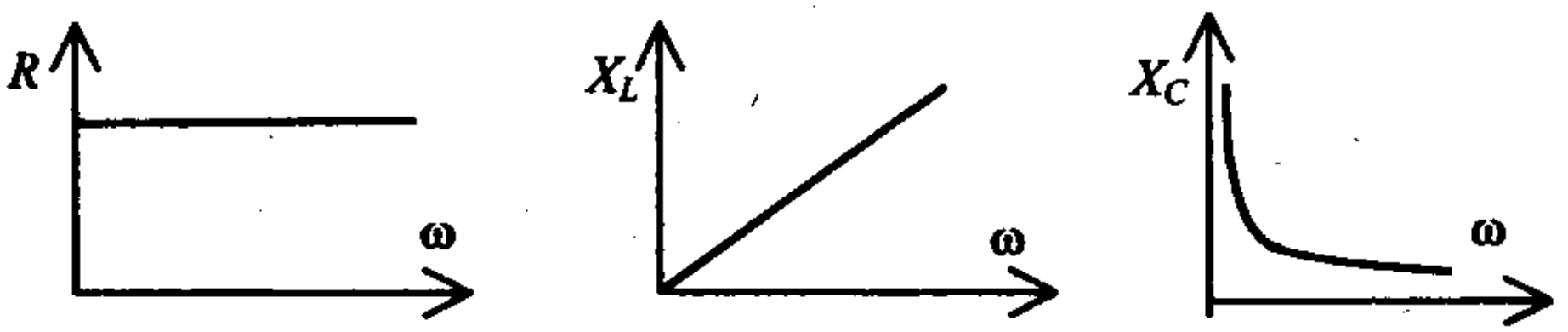


Рис. 19. Зависимость сопротивлений R, X_L, X_C от частоты

Резонанс напряжений

Резонансом в электрических цепях называется режим участка электрической цепи, содержащей индуктивный и емкостной элементы, при котором разность фаз между напряжением и током равна нулю ($\varphi = 0$). Режим резонанса может быть получен при изменении частоты ω питающего напряжения или изменением параметров элементов L и C.

При последовательном соединении возникает резонанс напряжения (рис. 20).

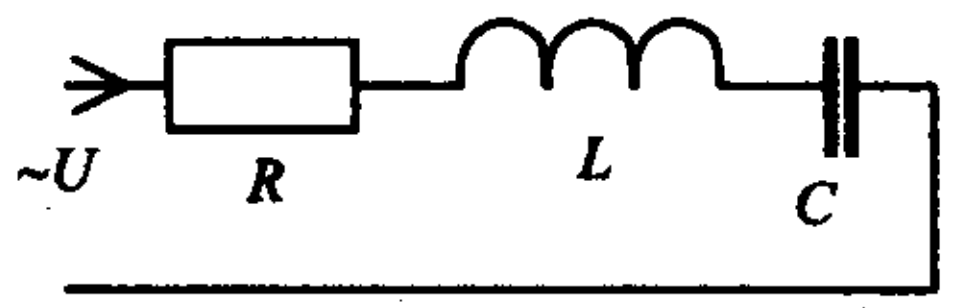


Рис. 20. Схема последовательного соединения *R*, *L*, *C*

Для схемы на рис. 20 ток

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}.$$

Знаменатель данного выражения есть модуль комплексного сопротивления, который зависит от частоты. При достижении некоторой частоты реактивная составляющая сопротивления исчезает, модуль сопротивления становится минимальным, ток в данной схеме возрастает до максимального значения, причем вектор тока совпадает с вектором напряжения по фазе (рис. 21):

$$I = I_{max} = U / R\,;\ \varphi = 0;$$

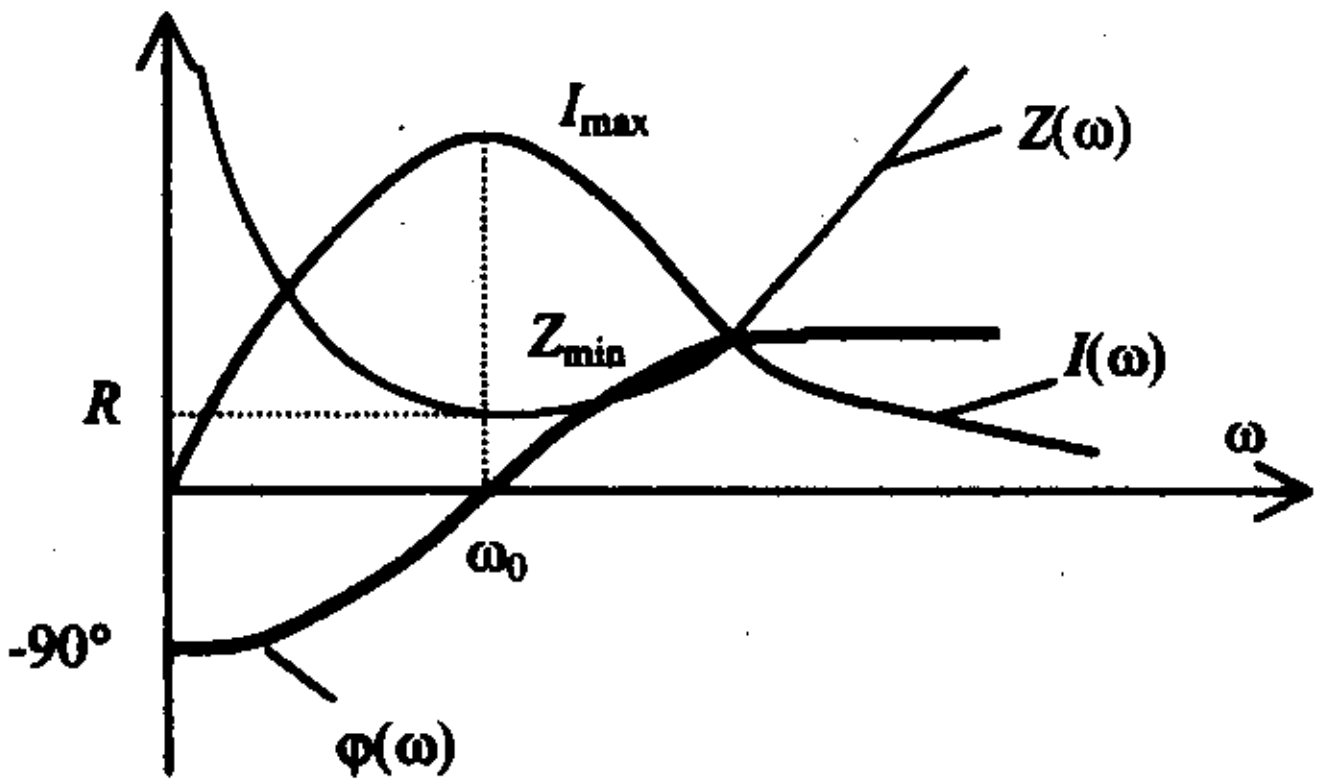


Рис. 21. Зависимость тока, сопротивления и угла φ от частоты

$$\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0;$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C})^2} = Z_{\min} = R,$$

где ω_0 – резонансная частота напряжения, определяемая из условия

$$|X_L| = |X_C|;\ \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}.$$

Тогда

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC},\ \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

Волновое или характеристическое сопротивление последовательного контура

$$|X_L| = |X_C| = \omega_0 L = \sqrt{\frac{L}{C}} = Z_B.$$

Отношение напряжения на индуктивности или емкости к напряжению на входе в режиме резонанса называется добротностью контура:

$$Q = \frac{U_L}{U_{вх}} = \frac{U_C}{U_{вх}} = \frac{X_L I}{RI} = \frac{X_L}{R}.$$

Добротность контура представляет собой коэффициент усиления по напряжению и в катушках индуктивности может достигать сотен единиц:

$$U_{L\text{рез}} = I_{\text{рез}} X_L = \frac{U}{R} X_L = U \frac{X_L}{R}.$$

При $X_L >> R$ напряжение на индуктивности (или емкости) может быть гораздо больше напряжения на входе, что широко используется в радиотехнике. В промышленных се-

тях резонанс напряжений является аварийным режимом, так как увеличение напряжения на конденсаторе может привести к его пробою, а рост тока – к нагреву проводов и изоляции.

Резонанс токов

Резонанс токов может возникнуть при параллельном соединении (рис. 22) реактивных элементов в цепях переменного тока. В этом случае: $b_L - b_C = 0$,

где $b_L = \frac{X_L}{Z^2}$; $b_C = \frac{X_C}{Z^2}$;

тогда $\varphi = \text{arctg}\frac{b_L - b_C}{g_1 + g_2} = 0$;

$$\dot{I} = \dot{I}_L + \dot{I}_C = \dot{U}Y_L + \dot{U}Y_C =$$

$$= \dot{U}(g_L - jb_L + g_C + jb_C) = \dot{U}\left[g - j(b_L - b_C)\right]$$

При определенной частоте, называемой резонансной, реактивные составляющие проводимости могут сравняться по модулю и суммарная проводимость будет минимальной. Общее сопротивление при этом становится максимальным, общий ток минимальным, вектор тока совпадает с вектором напряжения. Такое явление называется резонансом токов (рис. 23).

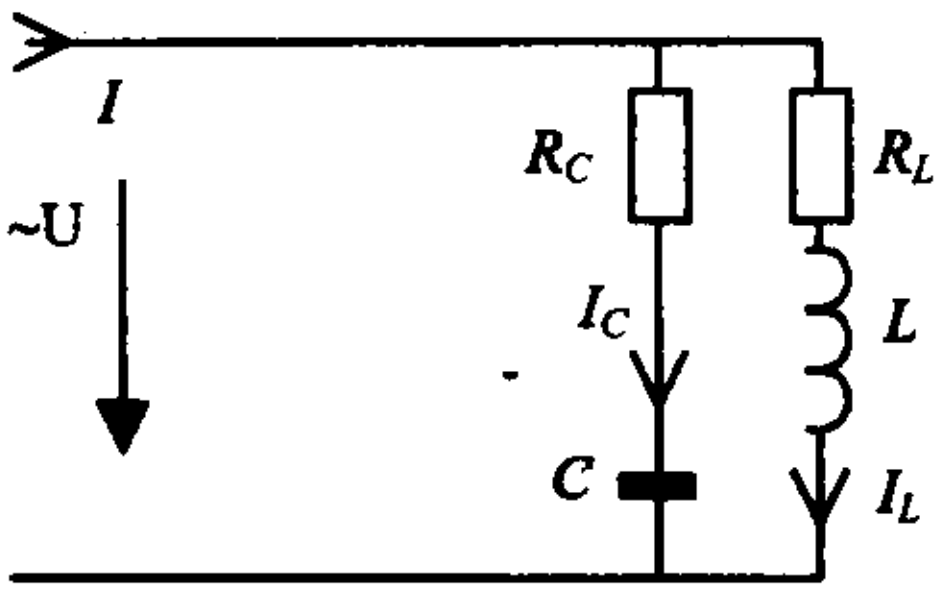


Рис. 22. Параллельное соединение реактивных элементов

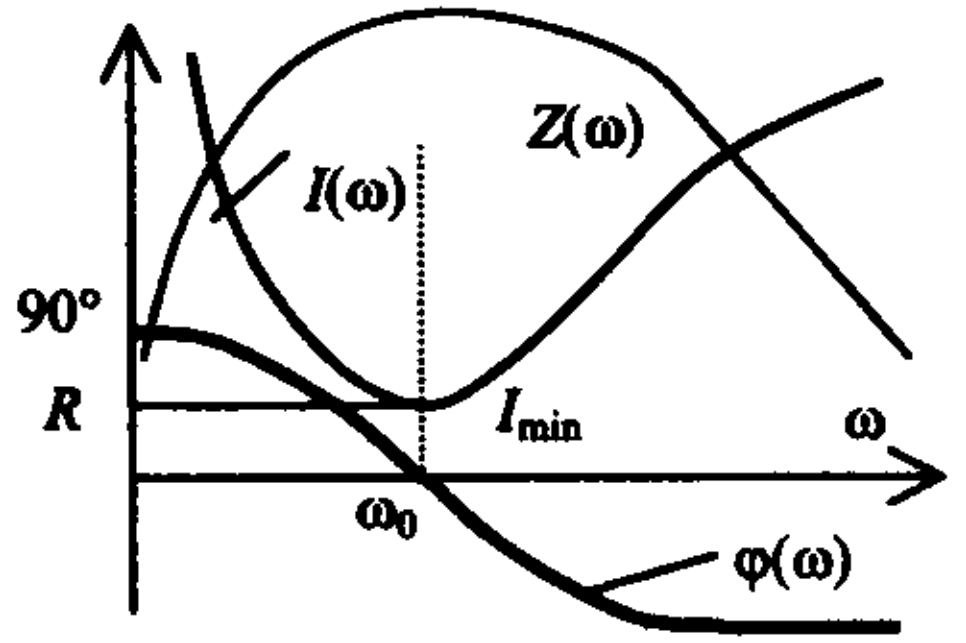


Рис. 23. Зависимость тока, сопротивления и угла φ от частоты

Волновая проводимость $b_L = b_C = \sqrt{\frac{C}{L}} = \gamma$.

При $g << b_L$ **ток в ветви с индуктивностью гораздо больше общего тока, поэтому такое явление называется резонансом токов и широко используется в силовых сетях промышленных предприятий для компенсации реактивной мощности.**

Резонансную частоту тока ω* найдем из условия равенства реактивных проводимостей ветвей.

$$\frac{\omega^{*}L}{R_L^2 + (\omega^{*}L)^2} = \frac{\frac{1}{\omega^{*}C}}{R^2 c + (\frac{1}{\omega^{*}C})^2}.$$

После ряда преобразований получим:

$$\omega^{*} = \frac{1}{\sqrt{LC}}\sqrt{\frac{L/C - R_L^2}{L/C - R_C^2}} = \omega\sqrt{\frac{\rho^2 - R_L^2}{\rho^2 - R_C^2}}$$

Из формулы следует, что:

1) резонансная частота зависит от параметров не только реактивных сопротивлений, но и активных;
2) резонанс возможен, если R_L и R_C больше или меньше ρ, в противном случае частота будет мнимой величиной и резонанс невозможен;
3) если $R_L = R_C = \rho$, то частота будет иметь неопределенное значение, что означает возможность существования резонанса на любой частоте при совпадении фаз напряжения питания и общего тока;
4) при $R_L = R_C << \rho$ резонансная частота напряжения равна резонансной частоте тока.

Энергетические процессы в цепи при резонансе токов аналогичны процессам, происходящим при резонансе напряжений.

Реактивная энергия циркулирует внутри цепи: в одну часть периода энергия магнитного поля индуктивности переходит в энергию электрического поля емкости, в следующую часть периода происходит обратный процесс.

При резонансе токов реактивная мощность равна нулю.

Большинство промышленных потребителей переменного тока носит активно-индуктивный характер и, следовательно, потребляет реактивную мощность. К таким потребителям относятся асинхронные двигатели, установки электрической сварки и т.д.

Для уменьшения реактивной мощности и повышения коэффициента мощности параллельно потребителю включают батарею конденсаторов, что приводит к уменьшению тока в проводах, соединяющих потребителя с источником энергии.

5. ЦЕПИ С ИНДУКТИВНЫМИ СВЯЗЯМИ

Индуктивно связанными элементами электрической цепи переменного тока называются индуктивные катушки, в которых кроме ЭДС самоиндукции создается ЭДС от действия переменного магнитного поля других индуктивных катушек с током. Такая ЭДС называется ЭДС *взаимной индукции*.

Взаимная индуктивность между первой катушкой с током и второй определяется как: $M_{21}=\psi_{21}/\imath_1$, и наоборот, от 2-й катушки с первой $M_{12}=\psi_{12}/\imath_2$. При этом $M_{21}=M_{12}=M$, где M – коэффициент взаимной индукции. Измеряется, как и индуктивность, в генри.

Чтобы знать, как направлены друг относительно друга магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции, используют разметку зажимов катушек (рис. 24).

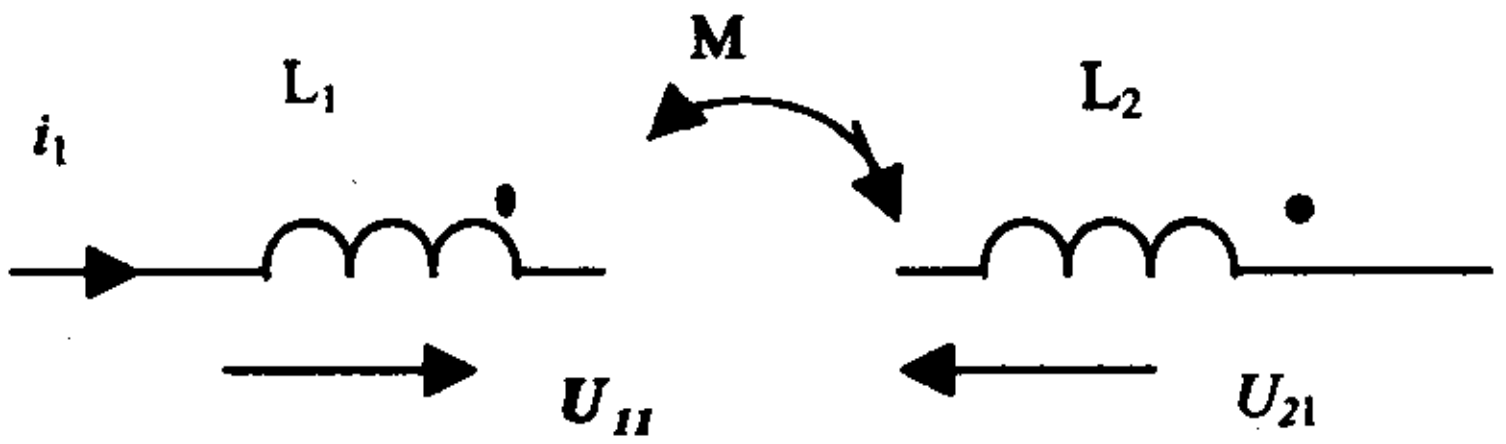


Рис. 24.Индуктивно связанные катушки

$$U_{11} = L_1 \cdot \frac{d\imath_1}{dt}$$ **– напряжение индукции**

$$U_{21} = M \cdot \frac{d\imath_1}{dt}$$ **– напряжение взаимной индукции**

При одинаковом направлении токов относительно одноименных зажимов (•) магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции в каждой катушке суммируются. Такое включение называется *согласным*.

Включение, при котором токи в обеих катушках имеют противоположные направления относительно одноименных зажимов (•), называется *встречным*. В этом случае магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции в каждой катушке вычитаются.

Последовательное соединение катушек

Для цепи с последовательным соединением (рис. 25).

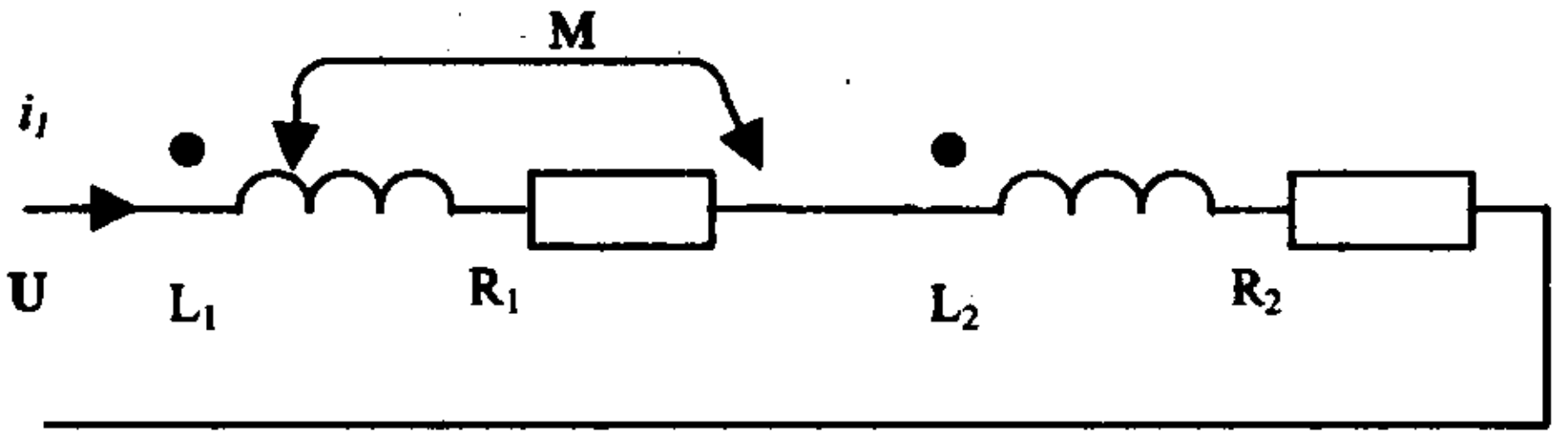


Рис. 25. Последовательное соединение катушек

При согласном включении:

$$\psi_1 = L_1 i M i \; ; \quad \psi_2 = L_2 i + M i \; ;$$

$$L = (\psi_1 + \psi_1)/ i = L_1 + L_2 + 2M.$$

При встречном:

$L_1 + L_2 - 2M$, **так как** $\psi_1 = L_1 i - M i$ **и** $\psi_2 = L_2 i - M i$;

$$\dot{U}_1 = R_1 \dot{I} + j\omega L_1 \dot{I} \pm j\omega M \dot{I} ;$$

$$\dot{U}_2 = R_2 \dot{I} + j\omega L_2 \dot{I} \pm j\omega M \dot{I} .$$

Для мгновенных значений:

$$u = R_1 i + L_1 \frac{di}{dt} \pm V \frac{di}{dt} + R_2 i + L_2 \frac{di}{dt} \pm M \frac{di}{dt} .$$

$$\dot{U} = \dot{I}(Z_1 + Z_2 \pm 2Z_м)\ Z = Z_1 + Z_2 \pm 2Z_М,$$

где $Z_С = Z_1 + Z_2 + 2Z_М$, а $Z_В = Z_1 + Z_2 - 2Z_М$.

Зная $Z_С$ и $Z_В$, можно определить сопротивление взаимной индукции $Z_М$.

$$Z_М = \frac{Z_с - Z_в}{4}.$$

Параллельное соединение катушек

При параллельном соединение катушек (рис. 26)

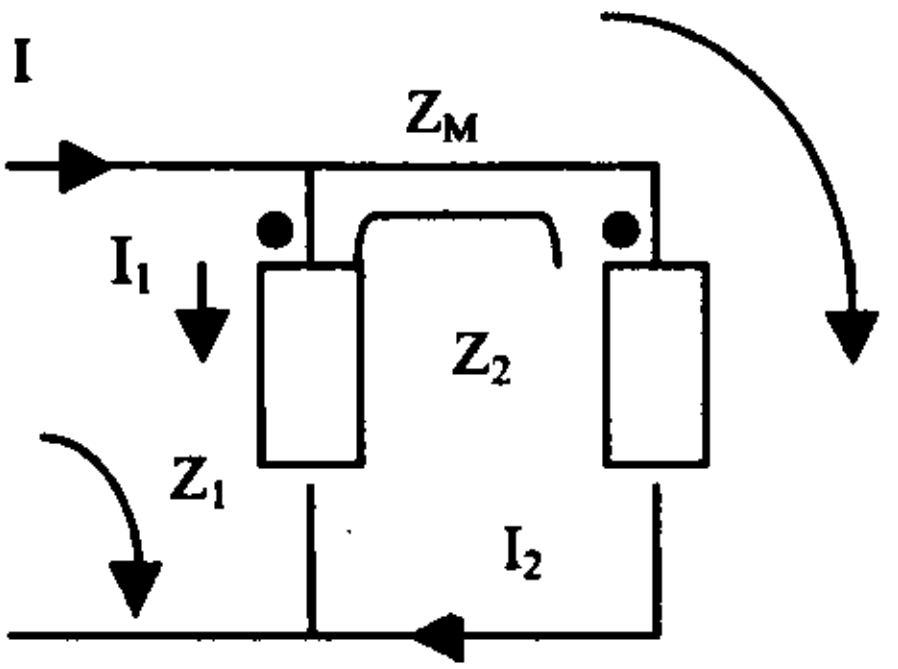


Рис. 26. Параллельное соединение катушек

параметры цепи можно определить по соотношениям:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2; \quad \dot{U} = \dot{I}_1 Z_1 \pm \dot{I}_2 Z_м; \quad \dot{U} = \pm \dot{I}_1 Z_м + \dot{I}_2 Z_2.$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}(Z_2 \mp Z_М)}{Z_1 Z_2 - Z_М^2}; \qquad \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}(Z_1 \mp Z_М)}{Z_1 Z_2 - Z_М^2};$$

$$\dot{I} = \dot{U}\frac{Z_1 + Z_2 \mp 2Z_M}{Z_1 Z_2 - Z_M^2}, \text{ где } Z = \frac{Z_1 Z_2 - Z_M^2}{Z_1 + Z_2 \mp 2Z^2}.$$

Верхний знак соответствует согласному включению катушек.

6. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Переходные процессы есть процессы перехода от одного установившегося состояния к другому установившемуся состоянию. Изменения параметров элементов схемы или изменение режима работы самой схемы называются *коммутациями.*

Непосредственное изменение сигналов тока и напряжения во времени может быть определено классическим методом расчета электрических цепей. Основой этого способа является составление дифференциальных уравнений, описывающих состояние цепи, и их интегрирование, причем количество производных определяется числом элементов-накопителей в заданной цепи.

В соответствии с классическим методом находят частное и общее решения однородных дифференциальных уравнений. Частное решение обусловлено вынужденным воздействием источников *e(t)* или *i(t).* Общее решение находят при отсутствии источников. В этом случае токи и напряжения называются свободными и всегда затухают за счет потерь в цепи. В случае комплексных корней процессы в цепи могут быть колебательными за счет

собственных колебаний цепи, но также будут убывать во времени при положительной вещественной части.

Законы коммутации

В природе соблюдается принцип непрерывности во времени потокосцепления индуктивности и электрического заряда емкости.

$$W_{M(0-)} = \frac{L \cdot i^2_{(0-)}}{2} = \frac{L \cdot i^2_{(0+)}}{2} = W_{M(+)} .$$

Потокосцепление скачком измениться не может

$$\Psi(0_+) = \Psi(0_-),$$

$$W_{Э(0-)} = \frac{C \cdot u^2_{(0-)}}{2} = \frac{C \cdot u^2_{(0+)}}{2} = W_{Э(+)} .$$

Заряд емкости скачком измениться не может

$$Q(0_+) = Q(0_-),$$

Следовательно, по 1-му закону коммутации в первый момент после коммутации *ток в катушке индуктивности скачком измениться не может* $i_L(0_+) = i_L(0_-)$;

по 2-му закону коммутации в первый момент после коммутации *напряжение на емкости скачком измениться не может* $U_C(0_+) = U_C(0_-)$.

За начало отсчета переходного процесса принимается время, равное нулю, начальные значения тока и напряжения до коммутации определяются из начальных условий.

Анализ переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами сводится к решению линейных неоднородных дифференциальных уравнений на основе законов Кирхгофа.

При включение цепи с R, L на постоянное напряжение (рис. 27)

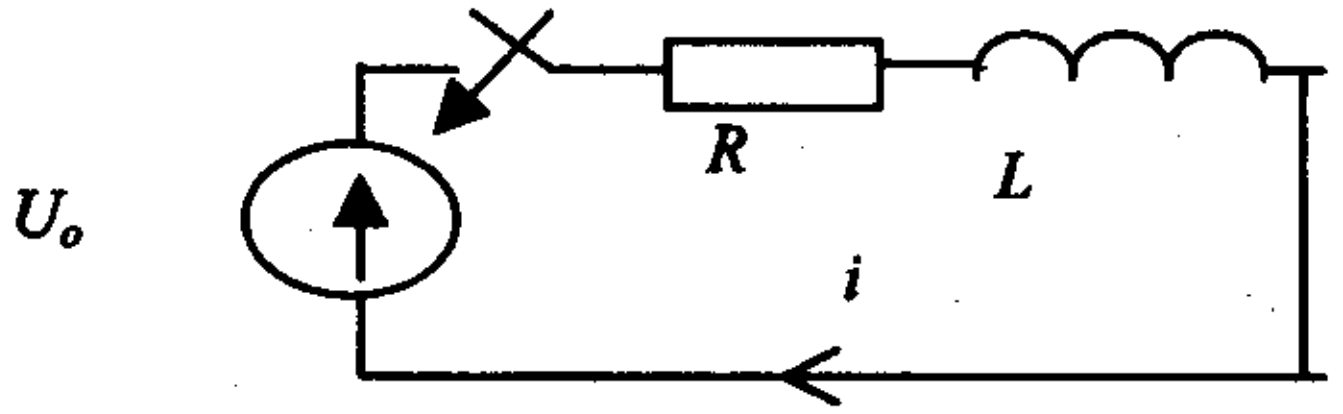


Рис. 27. Включение цепи R, L

уравнение цепи имеет вид: $Ri + L\dfrac{di}{dt} = U$.

Общее решение уравнения может быть найдено методом наложения принужденного и свободного режимов.

$$i = i_{ПР} + i_{СВ}\,; \qquad Ri_{СВ} + L\frac{di_{СВ}}{dt} = 0\,,$$

где $i_{ПР} = \dfrac{U}{R}$ **– ток принужденного режима при** $\dfrac{di}{dt} = 0$ **или частное решение неоднородного уравнения,**

$i_{СВ} = Ae^{kt}$ **– ток свободного режима или общее решение однородного уравнения (с нулевой правой частью).**

В общем случае $i_{СВ} = \sum Ae^{kt}$ **. Число слагаемых зависит от порядка уравнения или числа накопителей энергии.**

Свободные процессы исследуются для определения устойчивости системы. В устойчивой системе процессы должны затухать.

Принужденный режим определяет новое состояние электрической цепи после окончания переходного процесса.

До коммутации (до включения) ток в цепи отсутствовал $i_L(0_-) = 0$. На основании 1-го закона коммутации $i_L(0_+) = i_L(0_-)$ ток в индуктивности в первый момент после коммутации равен току до коммутации. В нашем примере ток равен 0.

Ток находим в виде суммы принужденной и свободной составляющих $i = i_{ПР} + i_{СВ}$

$i_{ПР} = \frac{U}{R}$ – ток принужденного режима при $\frac{di}{dt} = 0$.

Свободную составляющую находим из уравнения $Ri_{СВ} + L\frac{di_{СВ}}{dt} = 0$, Решение этого уравнения $i_{СВ} = Ae^{kt}$,

где k – корень характеристического уравнения.

$$R + kL = 0; \qquad k = -\frac{R}{L}.$$

А – постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий при $t = 0$ с использованием законов коммутации, в частном случае первого закона для индуктивности

$$i_L(0_+) = i_L(0_-) = 0 = i_{пр}(0) + i_{св}(0) = \frac{U}{R} + A = 0.$$

Учитывая, что $i_{СВ}(0) = Ae^0 = A; \qquad A = -\frac{U}{R}$.

Решение будет иметь вид:

$$i = \frac{U}{R} - \frac{U}{R}e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{U}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t});$$

$$U_R = iR = U(1 - e^{-\frac{R}{L}t}); \quad U_l = L\frac{di}{dt} = Ue^{-\frac{R}{L}t}.$$

Вид кривых тока и напряжений на элементах цепи приведен на рис. 28.

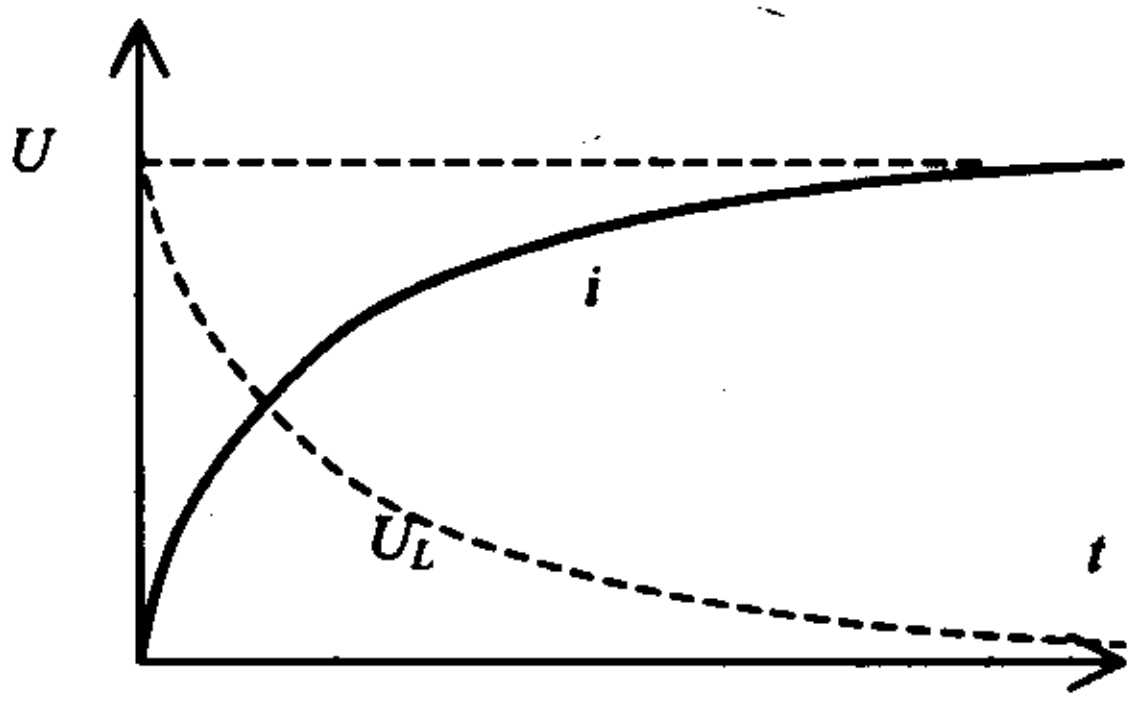


Рис. 28. Вид кривых тока и напряжений на элементах цепи

При отключении цепи с индуктивным сопротивлением от источника постоянного тока автоматическим выключателем ток не сразу становится равным нулю, так как в катушке индуцируется ЭДС такой величины, при которой напряжение между разомкнутыми контактами пробивает воздушный промежуток. Возникает электрическая дуга, по которой цепь остается замкнутой до тех пор, пока вся энергия магнитного поля не преобразуется в тепло в электрической дуге и в сопротивлении катушки.

7. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

Трехфазные цепи – совокупность однофазных, в которых действуют синусоидальные токи и напряжения одной частоты, отличающиеся по фазе.

В электротехнике термин фаза имеет два значения: понятие, характеризующее стадию периодического процесса, и наименование однофазных цепей, образующих многофазную систему.

В трехфазных системах токи (напряжения) фаз сдвинуты на одну треть периода, т.е. на 120°.

Рассмотрим работу простейшего трехфазного генератора (рис. 29). Он состоит из статора, внутри которого расположены три обмотки, сдвинутые относительно друг друга на 120°, и мощного электромагнита с обмоткой, получающей питание от источника постоянного тока. При вращении магнита в обмотках индуктируются ЭДС, сдвинутые во времени также на 120°.

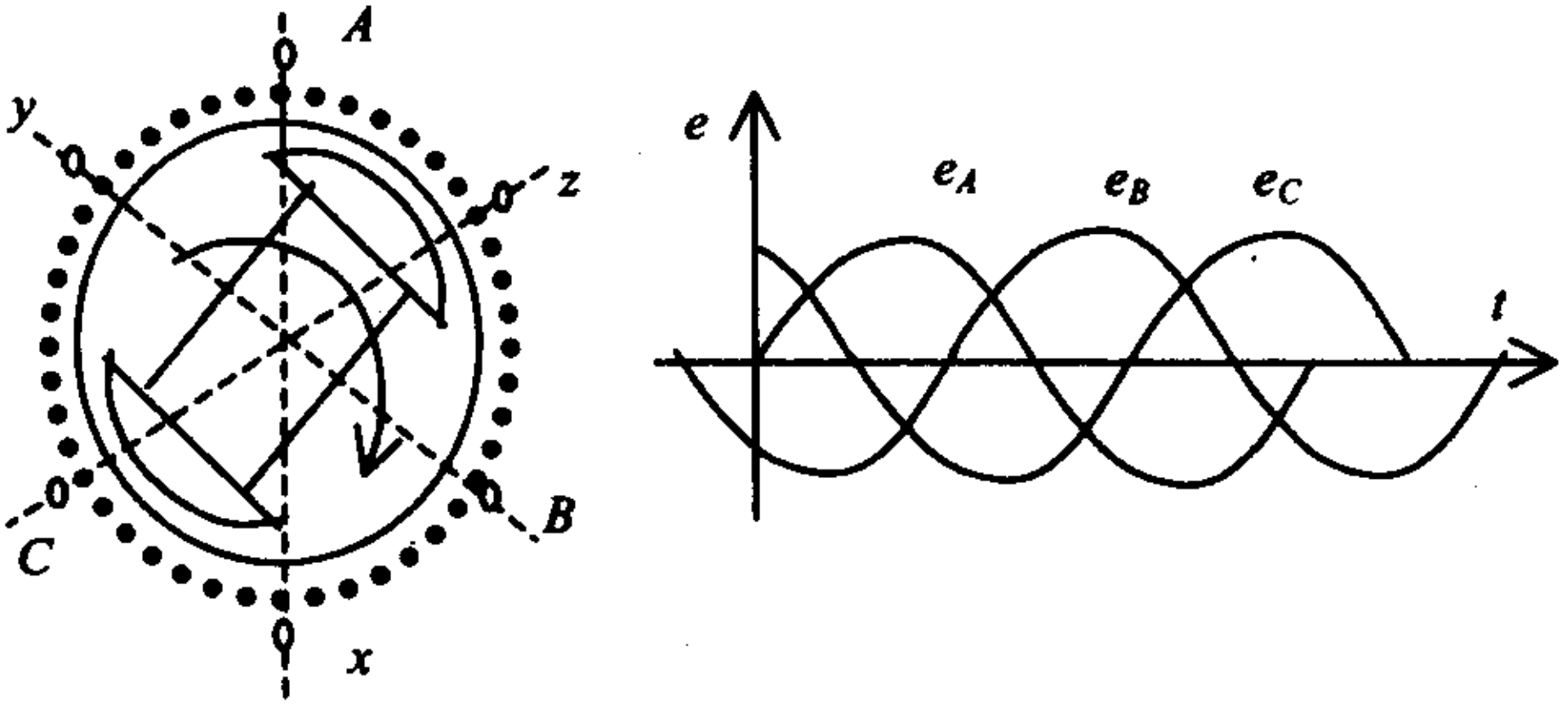


Рис. 29. Получение трехфазной системы ЭДС

Ниже приведены выражения для ЭДС фаз *A*, *B*, *C* и их векторная диаграмма (рис. 30):

$$e_A = E_m \sin\omega t\,;\ \dot{E}_A = Ee^{j0}\,;\ e_A + e_B + e_C = 0;\ \dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

$e_C = E_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$; $\dot{E}_C = Ee^{j120}$; $e_B = E_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$

$\dot{E}_B = Ee^{-j120}$.

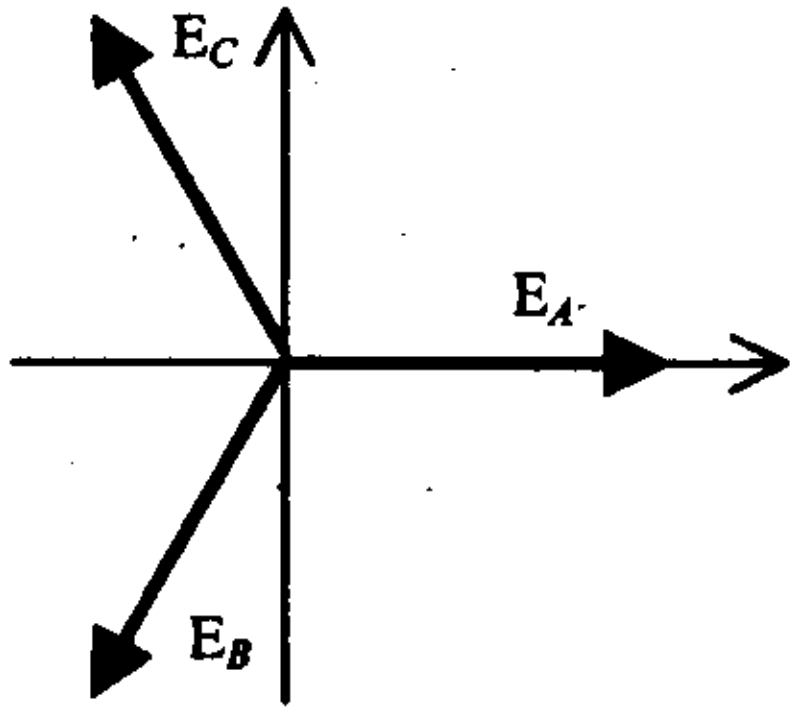


Рис.30. Векторная диаграмма трехфазной системы ЭДС

Соединение фаз звездой

Рассмотрим схему соединения звездой на рис. 31.

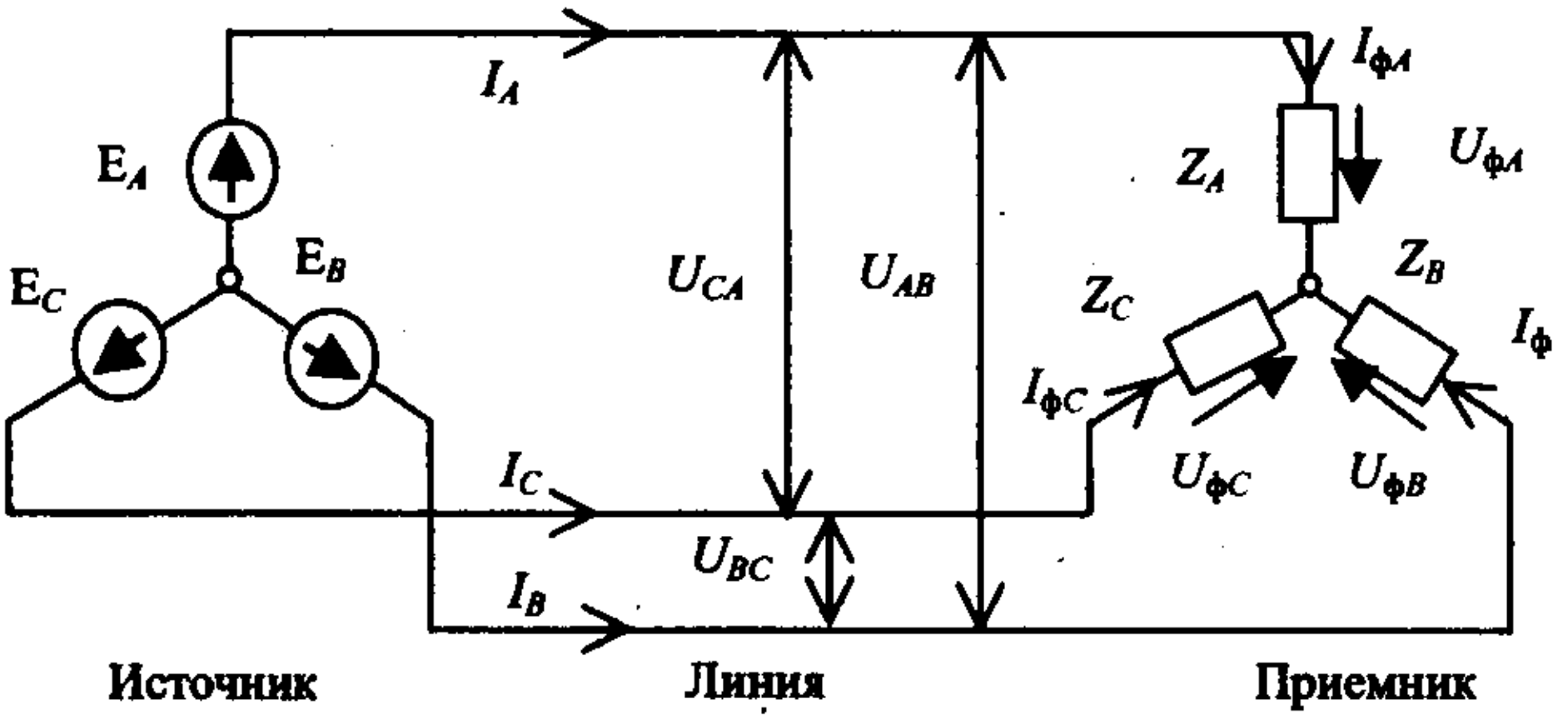


Рис. 31. Схема соединения звездой

$U_{\phi A}, U_{\phi B}, U_{\phi C}$ – фазные напряжения (напряжения между началом и концом соответствующей фазы); $I_{\phi A}$, $I_{\phi B}$, $I_{\phi C}$ – фазные токи – токи в фазах приемника; U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – линейные напряжения (напряжения между началами двух соседних фаз); I_A, I_B, I_C – линейные токи – токи в линиях.

Для схемы соединения звездой очевидно равенство фазных и линейных токов. Независимо от характера нагрузки:

$$\dot{I}_A+\dot{I}_B+\dot{I}_C=0;\quad \dot{U}_{AB}+\dot{U}_{BC}+\dot{U}_{CA}=0;$$

$$\dot{I}_{\phi B}=\dot{I}_B;\quad \dot{I}_{\phi C}=\dot{I}_C;\quad \dot{I}_{\phi A}=\dot{I}_A,\quad I_\phi=I_л.$$

Из векторной диаграммы (рис. 32) при равномерной (симметричной) нагрузке следует:

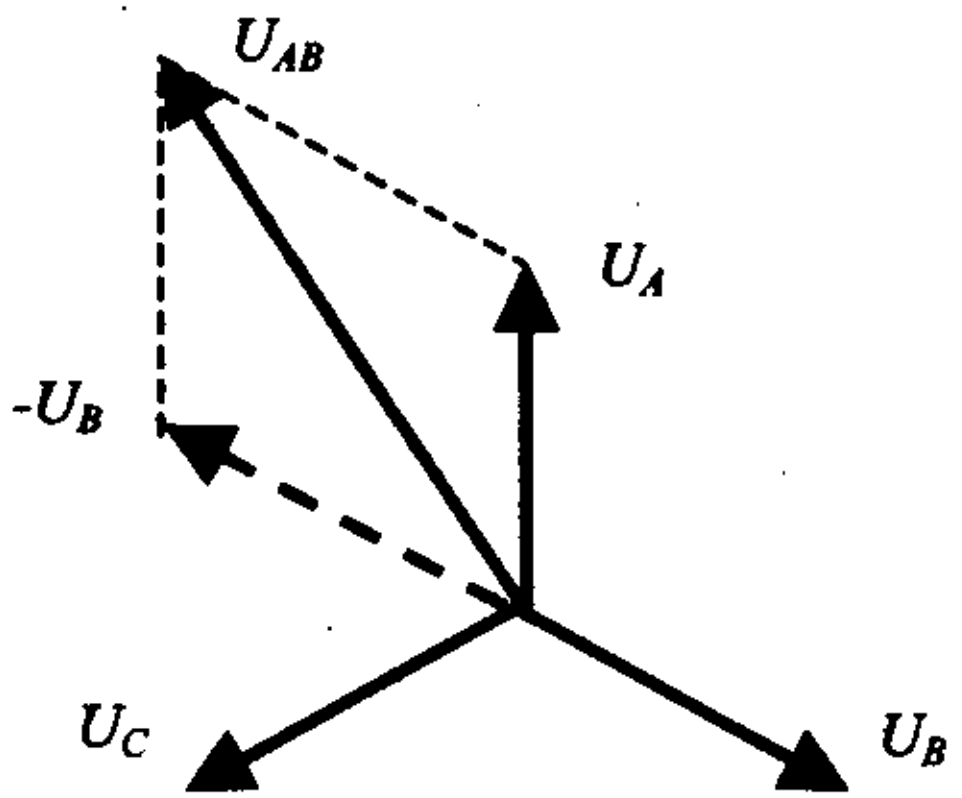


Рис. 32. Векторная диаграмма напряжений

$$\dot{U}_{AB}=\dot{U}_A-\dot{U}_B;$$

$$\dot{U}_{BC}=\dot{U}_B-\dot{U}_C;$$

$$\dot{U}_{CA}=\dot{U}_C-\dot{U}_A;$$

$$\frac{U_л}{2}=U_\phi\cos 30^\circ;$$

$$U_л=\sqrt{3}U_\phi;$$

$$\dot{U}_{AB}=\dot{U}_A\sqrt{3}e^{j30^\circ}.$$

При неравномерной (несимметричной) нагрузке $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$.

Между точками 0 и 0_1 возникает напряжение несимметрии (рис. 33).

$$\dot{U}_{00_1} = \frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C};$$

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A - \dot{U}_{00_1}; \quad \dot{U}_B = \dot{E}_B - \dot{U}_{00_1}; \quad \dot{U}_C = \dot{E}_C - \dot{U}_{00_1}.$$

При симметричной нагрузке $\dot{U}_{00_1} = 0$.

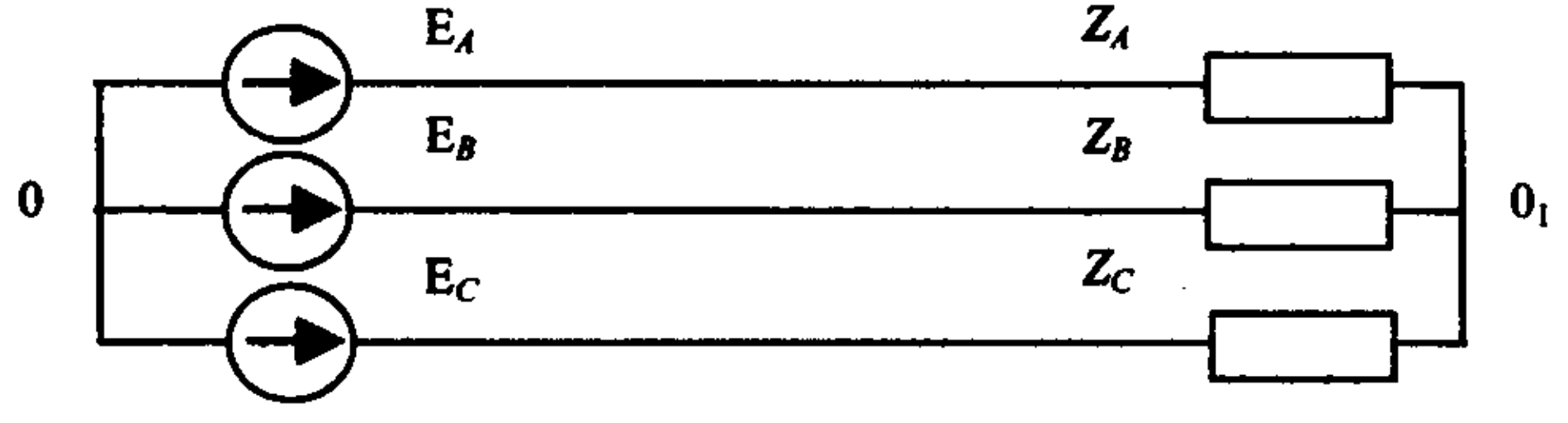


Рис. 33. Трехпроводная схема соединения при несимметричной нагрузке

При несимметричной нагрузке напряжения фаз приемника неодинаковы по величине и по фазе (рис. 34).

Для обеспечения симметричной системы напряжений во всех фазах и независимой работы отдельных приемников используется схема звезда с нулевым проводом или четырехпроводная система (рис. 35).

$$\dot{I}_{\phi A} = \dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_A} = \dot{U}_A Y_A;$$

$$\dot{I}_{\phi B} = \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_B} = \dot{U}_B Y_B; \quad \dot{I}_{\phi C} = \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z_C} = \dot{U}_C Y_C.$$

Поскольку узлы 00_1 соединены нулевым проводом, напряжение между ними равно нулю. При несимметричной нагрузке фазные и линейные напряжения остаются постоянными.

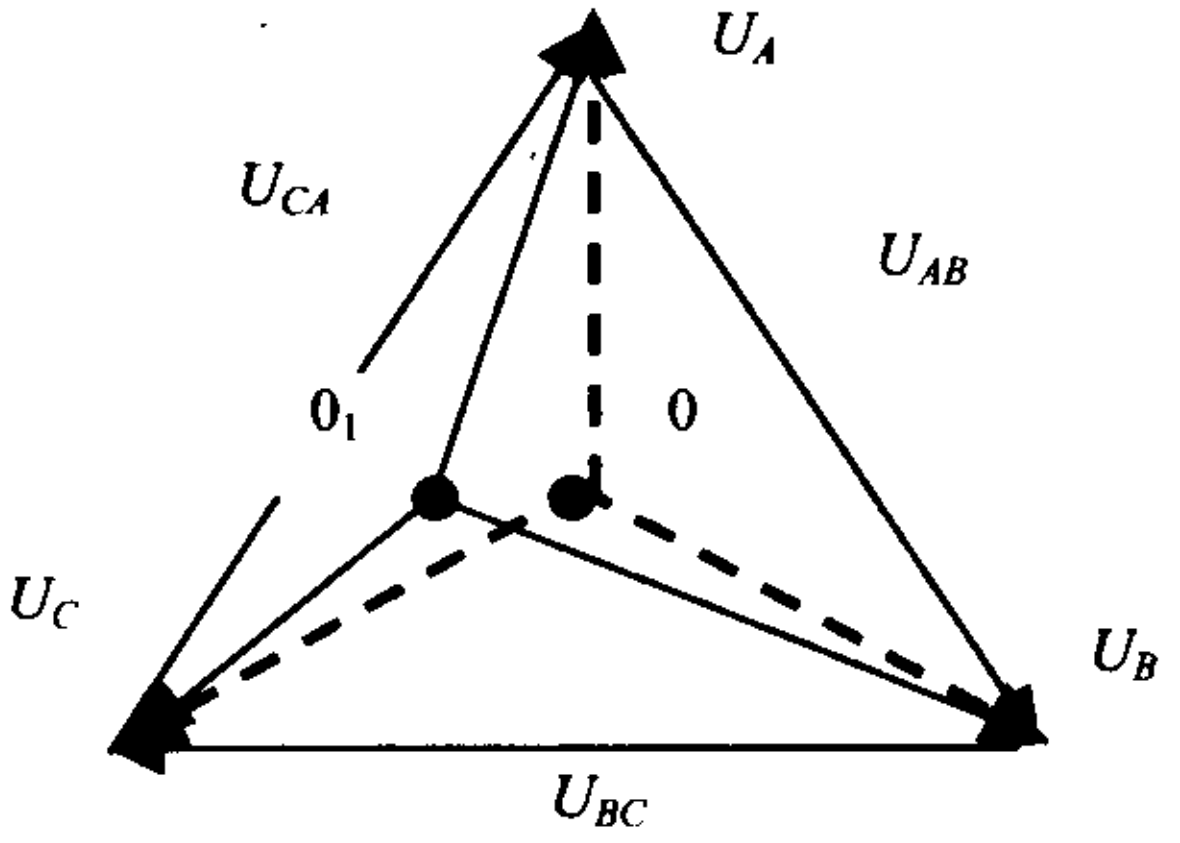


Рис. 34. Векторная диаграмма напряжений при несимметричной нагрузке

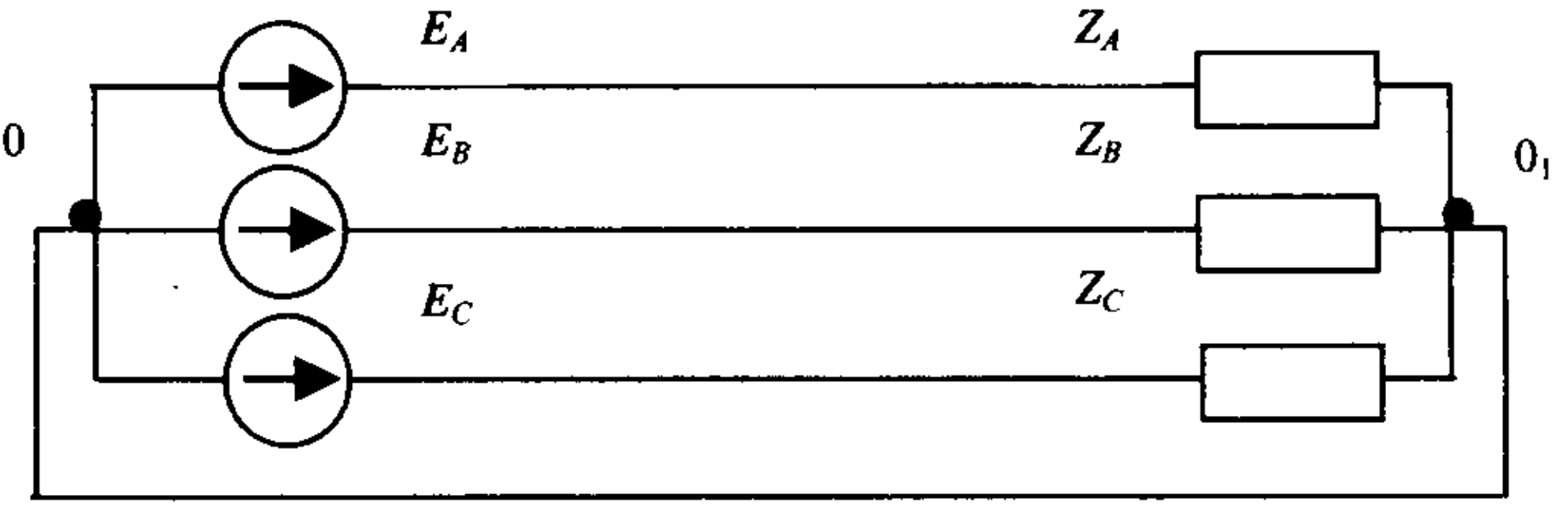


Рис. 35. Четырехпроводная схема соединения

Четырехпроводная система позволяет получать одновременно два напряжения – фазное и линейное, например, 220 и 380 В.

Соединение нагрузки треугольником

Рассмотрим схему соединения треугольником на рис. 36.

Из схемы очевидно: $U_{\phi AB} = U_{AB}$; $U_{\phi BC} = U_{BC}$; $U_{\phi CA} = U_{CA}$.

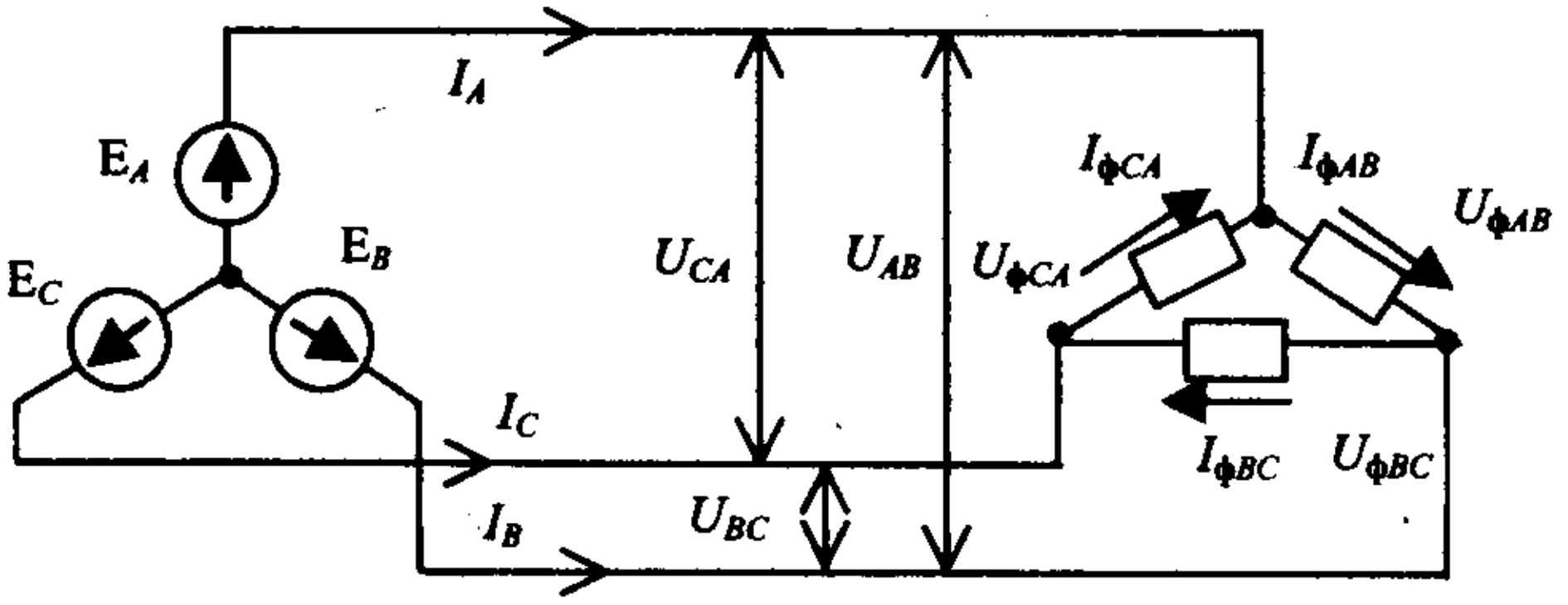


Рис. 36. Схема соединения треугольником

Для схемы соединения треугольником:

$$U_{\phi} = U_{л};$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}; \quad I_{л}/2 = I_{\phi}\cos 30^{\circ}.$$

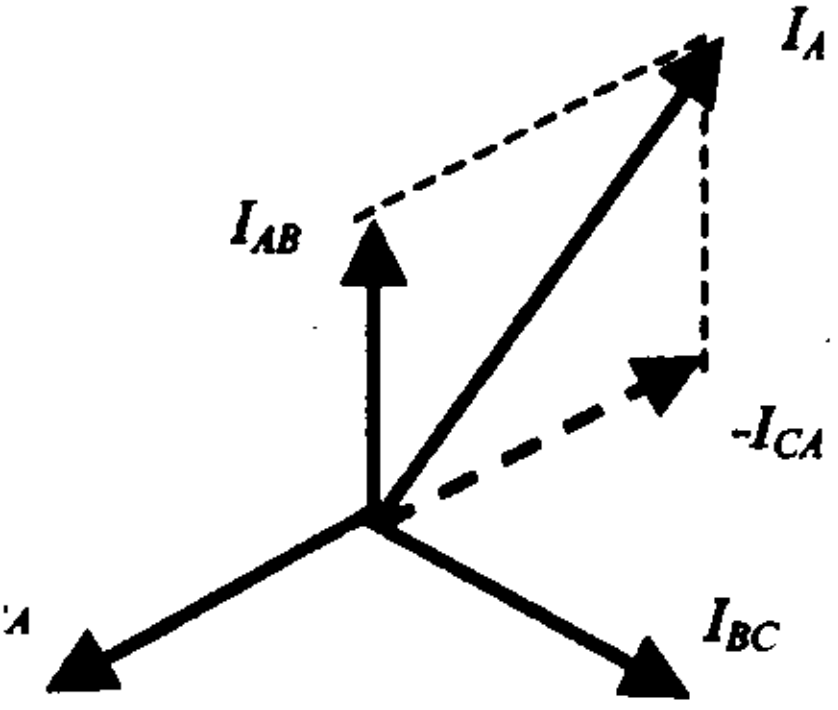


Рис. 37. Векторная диаграмма токов

Связь между линейными и фазными токами показана на рис. 37:

$$I_{л} = \sqrt{3} I_{\phi};$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB}\sqrt{3}e^{-j30^{\circ}}.$$

Для симметричной трехфазной системы справедливы соотношения:

в схеме звездой

$$U_{л} = \sqrt{3}U_{ф};\ I_{л} = I_{ф};\ U_{AB} = U_{BC} = U_{CA};\ \ I_A = I_B = I_C.$$

в схеме треугольником

$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_{ф};\ \ I_{л} = \sqrt{3}I_{ф};$$

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{ф} = U_{л};\ \ U_{л} = U_{ф}.$$

Используя метод преобразования, всегда можно перейти от схемы соединения звездой к схеме соединения треугольником и наоборот (рис. 38). Преобразование будет эквивалентным, если режим работы остальной части электрической цепи не изменится, то есть токи, притекающие к узловым точкам, в той и другой схеме будут одинаковыми, а потенциалы соответствующих узлов будут равны. Эти два условия сводятся к тому, что сопротивления или проводимости между двумя узловыми точками должны быть равны.

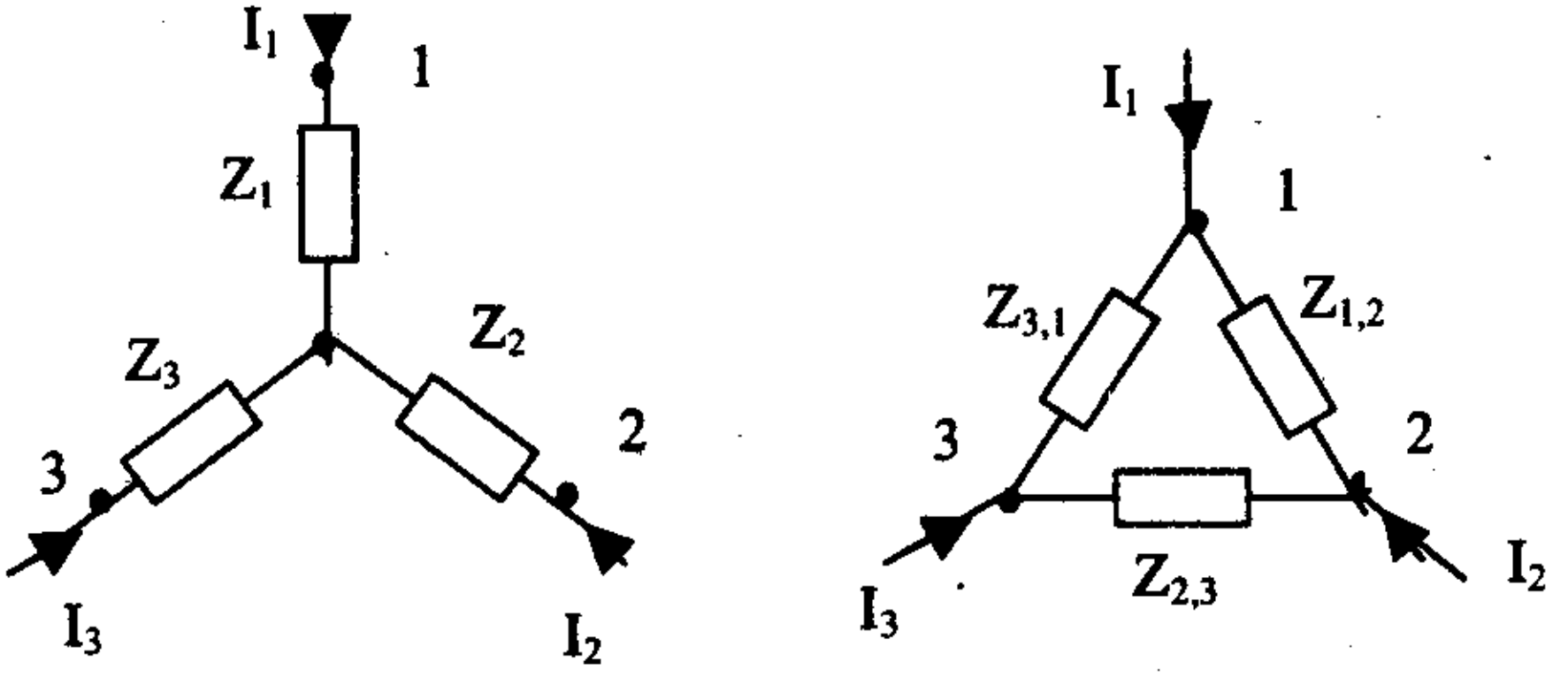


Рис. 38. Схемы соединения электрической цепи звездой и треугольником

Значения сопротивлений, согласно обозначениям на рис. 38, при переходе от «звезды» к «треугольнику» и от «треугольника» к «звезде»

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3}; \qquad Z_1 = \frac{Z_{12} Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}};$$

$$Z_{23} = Z_3 + Z_2 + \frac{Z_3 Z_2}{Z_1}; \qquad Z_2 = \frac{Z_{12} Z_{23}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}};$$

$$Z_{31} = Z_1 + Z_3 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2}; \qquad Z_3 = \frac{Z_{13} Z_{23}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}}.$$

Мощность трехфазной системы

В общем случае мощность трехфазного приемника равна сумме мощностей всех фаз $P = P_A + P_B + P_C$; $Q = Q_A + Q_B + Q_C$.

$$P_{3\Phi} = P_A + P_B + P_C = i_A \cdot u_A + i_B \cdot u_B + i_C \cdot u_C =$$
$$= I_{mA} \sin(\omega t + \psi_{iA}) \cdot U_{mA} \sin(\omega t + \Psi_{uA}) +$$
$$+ I_{mB} \sin(\omega t + \Psi_{iB}) \cdot U_{mB} \sin(\omega t + \Psi_{uB}) +$$
$$+ I_{mC} \sin(\omega t + \Psi_{iC}) \cdot U_{mC} \sin(\omega t + \Psi_{uC})$$

Для симметричной системы:

$U_{mA} = U_{mB} = U_{mC} = U_m$ и $I_{mA} = I_{mB} = I_{mC} = I_m$.

Принимая: $\Psi_{iA} = 0$ и $\Psi_u = \varphi$ и учитывая сдвиг фаз токов и напряжений во времени на угол 120^0, запишем:

$$P_{3\phi} = I_m U_m(\sin\omega t \cdot \sin(\omega t+\varphi) + \sin(\omega t-120^0)\cdot\sin(\omega t+\varphi-120^0) +$$

$$+\sin(\omega t+120^0)\cdot\sin(\omega t+\varphi+120^0)) =$$

$$=\frac{U_m I_m}{2}\begin{bmatrix}\cos\varphi-\cos(2\omega t+\varphi)+\cos\varphi-\cos(2\omega t+\varphi-120^0)\\ +\cos\varphi-\cos(2\omega t+\varphi+120^0)\end{bmatrix}=$$

$$=\frac{U_m I_m}{2}3\cos\varphi = 3UI\cos\varphi \ .$$

Получили значение мощности, не зависящее от времени и постоянное на всем его протяжении. Система, в которой мощность не зависит от времени, называется *уравновешенной*.

Докажем справедливость данного утверждения.

$$\dot{S}_{3\phi} = \dot{U}_A\dot{I}_A + \dot{U}_B I_B + \dot{U}_C\dot{I}_C$$

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0\text{, отсюда } \dot{I}_B = -(\dot{I}_A + \dot{I}_C).$$

Подставим значение тока фазы В в уравнение для мощности и после ряда перестановок получим, что $S_{3\phi}$ = $= U_{AB}I_A + U_{CB}I_C$, где первое слагаемое – это показания первого ваттметра, а второе – показания второго. В случае, если угол между напряжением и током равен 0 (активная нагрузка), будем иметь одинаковые показания двух ваттметров.

Мощность равна сумме показания приборов независимо от характера нагрузки , так как:

а) при индуктивной нагрузке

$$W_1 = U_л I_л \cos(\varphi+30^0) \text{ и } W_2 = U_л I_л \cos(\varphi-30^0);$$

$$P = W_1 + W_2 = U_л I_л[(\cos(\varphi+30^0) + \cos(\varphi-30^0)];$$

б) при емкостной нагрузке

$$W_1 = U_л I_л \cos(\varphi - 30^0) \text{ и } W_2 = U_л I_л \cos(\varphi + 30^0);$$

$$P = W_1 + W_2 = U_л I_л [\cos(\varphi + 30^0) + \cos(\varphi - 30^0)].$$

При симметричной нагрузке справедливы соотношения:

для схемы звездой

$$U_л = \sqrt{3} U_ф; \quad I_л = I_ф,$$

для схемы треугольником

$$I_л = \sqrt{3} I_ф; \quad U_л = U_ф.$$

Мощность при симметричной нагрузке:

$$P = \sqrt{3} U_л I_л \cos\varphi = 3 U_ф I_ф \cos\varphi;$$

$$Q = \sqrt{3} U_л I_л \sin\varphi = 3 U_ф I_ф \sin\varphi;$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} U_л I_л.$$

Измерение мощности в трехфазной сети

Метод двух ваттметров для измерения мощности однородной трехфазной нагрузки представлен на рис. 39. Для данной схемы независимо от соединения нагрузки можем записать:

$$P_{3ф} = W_1 + W_2; \quad Q_{3ф} = \sqrt{3}(W_1 - W_2).$$

По показаниям ваттметров при равномерной нагрузке можно определить угол φ нагрузки:

$$tg = \frac{Q}{P} = \sqrt{3} \frac{P_{w_2} - P_{w_1}}{P_{w_1} + P_{w_2}}.$$

При симметричной нагрузке (модули и фазы сопротивлений нагрузки равны между собой) измерение мощности можно производить одним ваттметром, включенным на фазное напряжение и фазный ток, $P_{3\phi} = 3W_1$.

При несимметричной нагрузке требуется измерение тремя ваттметрами, включаемыми в каждую фазу.

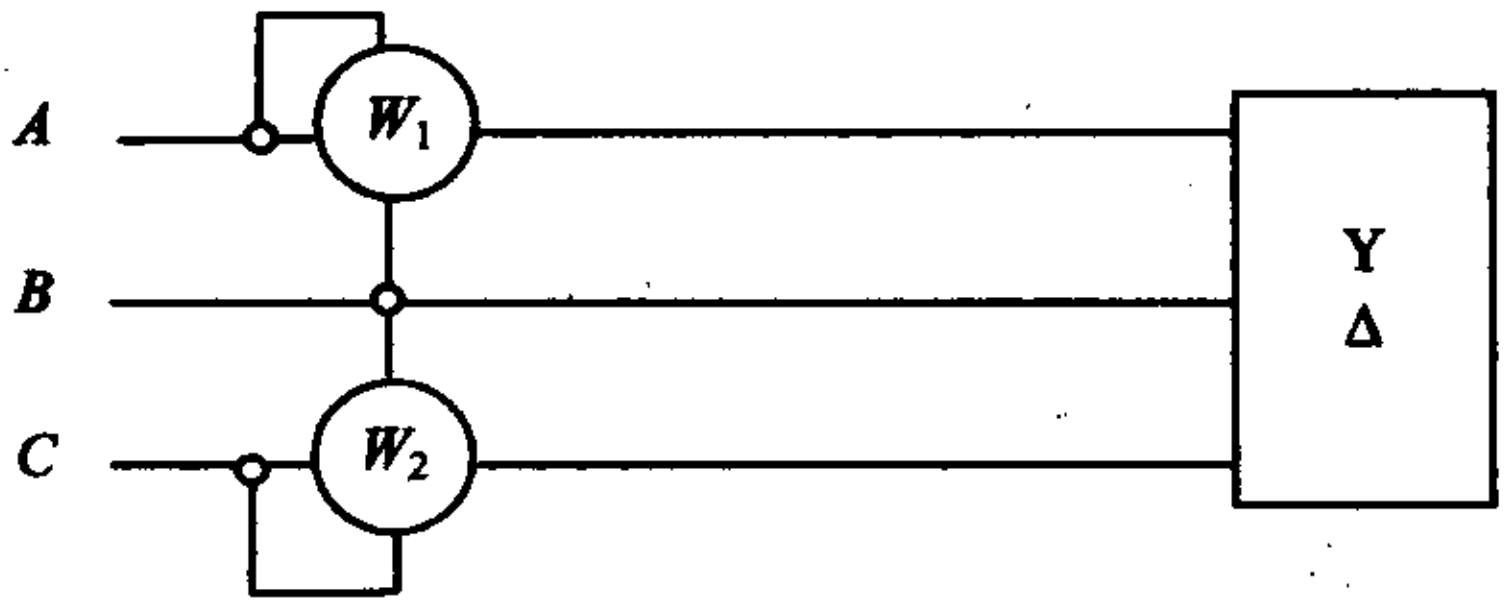


Рис. 39. Схема измерения мощности методом двух ваттметров

При симметричной нагрузке (модули и фазы сопротивлений нагрузки равны между собой) измерение мощности можно производить одним ваттметром, включенным на соответствующие фазное напряжение и фазный ток, $P_{3\phi} = 3W_1$.

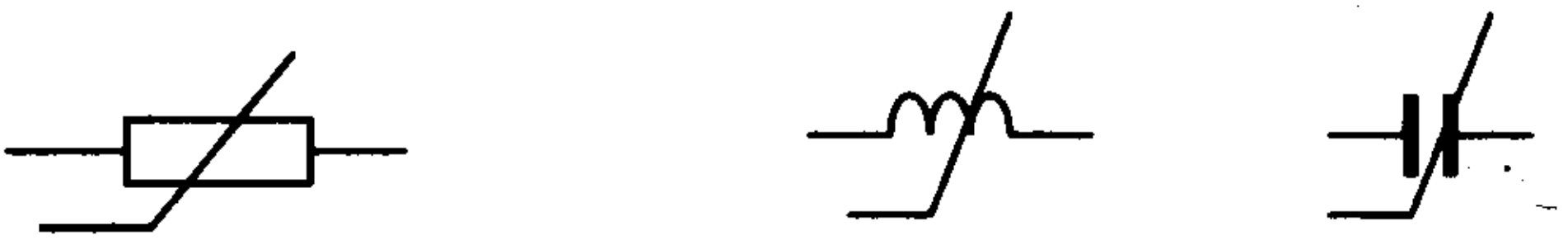
При несимметричной нагрузке требуется измерение тремя ваттметрами, включаемыми в каждую фазу.

8. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ

К нелинейным относятся цепи, содержащие нелинейные элементы (НЭ), у которых параметры R, L и C зависят от напряжения U, тока I и магнитного потока Ф.

В электрических схемах НЭ обозначаются как:

Резистор **Индуктивность** **Емкость**



Особенностью нелинейных элементов является наличие статического и динамического сопротивлений. Рассмотрим их на примере вольт-амперной характеристики (ВАХ) (рис. 40).

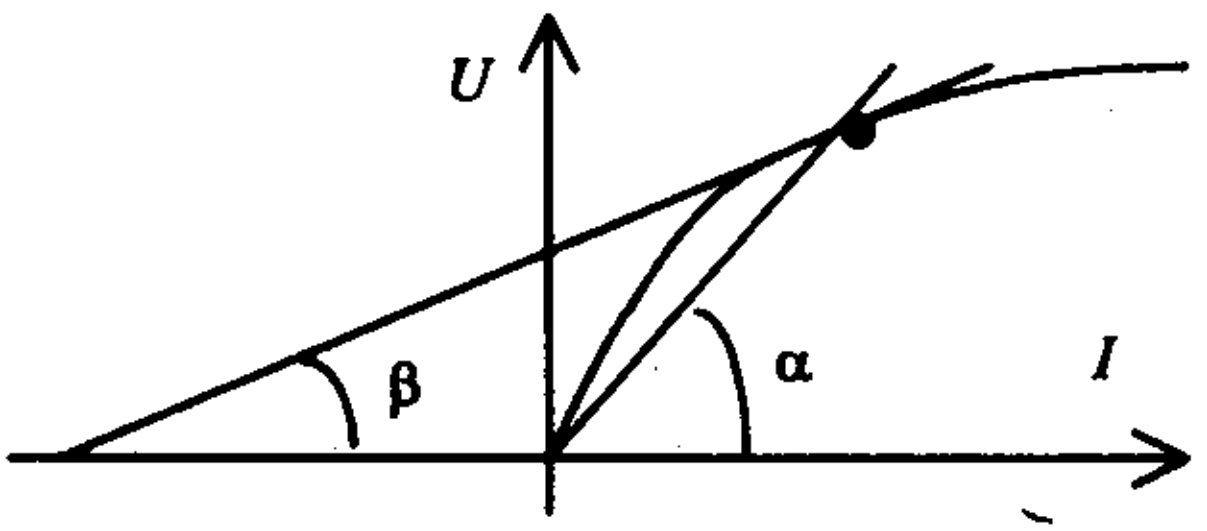


Рис. 40. Вольт-амперная характеристика (ВАХ)

Статическое сопротивление $R = \frac{U}{I} = \frac{m_u}{m_I} \operatorname{tg} \alpha$.

Динамическое сопротивление

$$R_д = \frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}I} \frac{m_u}{m_I} = \frac{m_u}{m_I} \operatorname{tg} \beta .$$

Как при постоянном, так и при переменном токе статические и динамические (дифференциальные) сопротивления в общем случае не равны друг другу (они могут совпадать по величине только в отдельных точках или на отдельных участках характеристики). При переходе с одно-

го участка вольт-амперной характеристики к другому статические и динамические сопротивления не остаются постоянными.

Динамическое сопротивление используется при нахождении общего решения системы уравнений электрического равновесия цепи.

Вольт-амперные характеристики делятся на симметричные и несимметричные относительно начала координат, на монотонные, если производная не меняет свой знак, и немонотонные при смене знака производной.

Если ВАХ НЭ проходит через начало координат, то это пассивный элемент, в котором происходят необратимые преобразования электрической энергии. В противном случае отрезки от начала координат до пересечения с ВАХ будут определять наличие источников энергии, которая отдается во внешнюю по отношению к нелинейному элементу часть цепи.

При несимметричной характеристике сопротивление нелинейного элемента зависит от знака приложенного напряжения.

В качестве примера нелинейных элементов можно назвать диод, стабилитрон и варистор.

НЭ могут быть управляемыми (тиристор, транзистор) и неуправляемыми (диод, стабилитрон).

В достаточно широком диапазоне частот многие нелинейные элементы (полупроводниковые диоды и др.) являются *безынерционными:* их нелинейная характеристика выражает зависимость между мгновенными значениями тока и напряжения. Если к такому элементу подвести синусоидальное напряжение, то вследствие нелинейности характеристики ток будет несинусоидальным и наоборот. Следовательно, нелинейный элемент обладает способностью преобразовывать спектр воздействующих на него колебаний.

Эта их особенность наряду с другими свойствами позволяет использовать нелинейные элементы как в автоматике, так и в радиотехнике.

Для расчета нелинейных цепей используют три метода:

1) графический;
2) аналитический;
3) графоаналитический.

В общем случае расчет цепей с нелинейными элементами представляет из себя сложную задачу, так как точная аппроксимация характеристик приводит к сложным математическим выражениям. На практике пользуются такими способами аппроксимации, как кусочно-линейная или степенной полином.

9. ПЕРИОДИЧЕСКИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

В промышленных сетях идеальных синусоид тока и напряжения практически не бывает. Возникающие искажения и пульсации напряжения, а также перекосы фаз связаны с несимметричной нагрузкой и присутствием нелинейных элементов (элементы со стальными сердечниками, выпрямительные установки, вентильные элементы, электрические дуговые печи) (рис. 41).

Несинусоидальные токи и напряжения можно представить в виде суммы синусоидальных напряжений и токов при помощи разложения в ряд Фурье с ограничением числа членов.

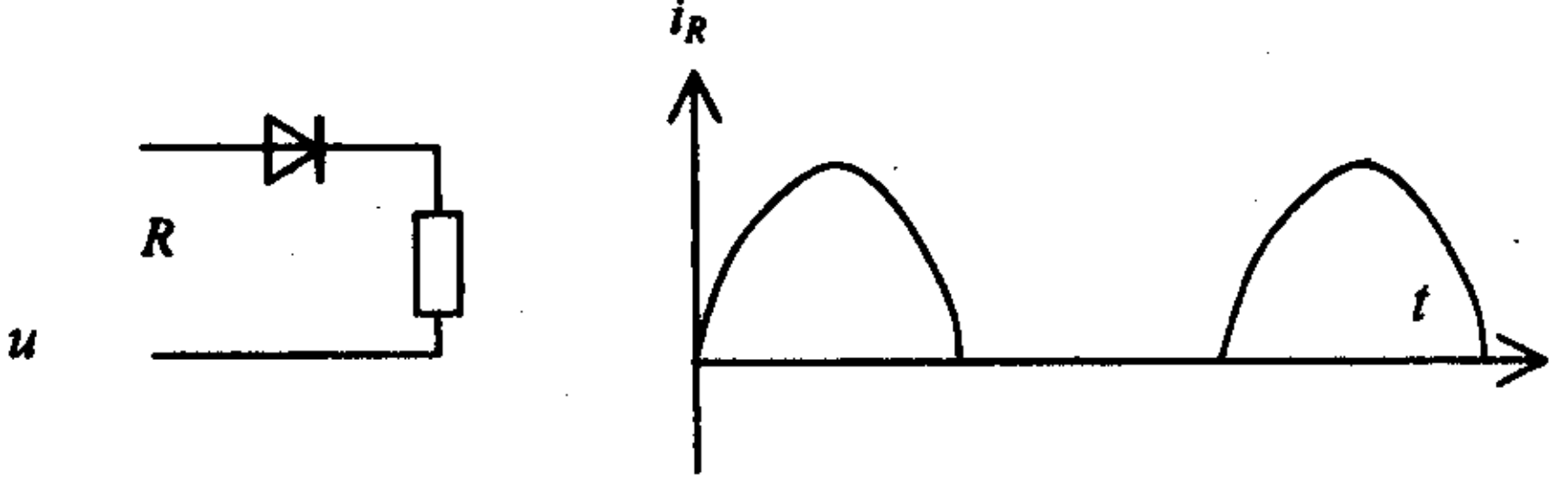


Рис. 41. Кривая несинусоидального тока на нагрузке при однополупериодном выпрямлении с использованием диода

В общем случае:

$$U(\omega t) = \frac{a_o}{2} + \sum_1^\infty a_k \cos k\omega t + \sum_1^\infty b_k \sin k\omega t = Uo + \sum_1^\infty U_{mk} \sin(k\omega t + \psi_k);$$

$$U_{mk} = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \qquad \psi_k = arctg\frac{a_k}{b_k};$$

$$u(t) = U_o + U_{1m} sin(\omega t + \psi_1) +$$

$$+ U_{2m} sin(2\omega t + \psi_2) + \cdots + U_{nm} sin(n\omega t + \psi_n),$$

где U_o – постоянная составляющая;

U_{1m}, U_{2m} – амплитуды гармонических составляющих;

ω – частота основной гармоники;

ψ_1 – начальные фазы гармоник.

На практике для выбора и оценки различных электротехнических устройств, при расчетах и измерениях в электрических цепях с периодическими токами и напряжениями любой формы в качестве одной из основных характеристик пользуются действующим значением.

Действующее значение ЭДС (напряжения) и тока:

$$E = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T e^2 dt}\,; \quad E = \sqrt{E_0^2 + E_1^2 + E_2^2 + \ldots}\,;$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \ldots}\,.$$

Средние значения мощности:

активной

$$P = P_0 + P_1 + P_2 + \ldots = E_0 I_0 + E_1 I_1 \cos\varphi_1 + E_2 I_2 \cos\varphi_2 + \ldots,$$

реактивной

$$Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 + \ldots. = E_0 I_0 + E_1 I_1 \sin\varphi_1 + E_2 I_2 \sin\varphi_2 \ldots,$$

полной $S = UI = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2 \sum_{k=0}^{\infty} I_k^2}$.

Примечание. В цепях периодического несинусоидального тока:

$$S \neq \sqrt{P^2 + Q^2}\,.$$

Для оценки отклонения формы несинусоидальных кривых тока и напряжения от синусоиды пользуются коэффициентами формы кривой, искажения и амплитуды.

Коэффициент формы определяется как отношение действующего значения тока или напряжения к его среднему по модулю значению, т.е.

$K_ф = U / U_{ср}$; $K_ф = I / I_{ср}$. Для синусоиды $K_ф = 1{,}11$.

Коэффициент искажения равен отношению действующего значения первой гармоники к действующему значению несинусоидального тока или напряжения $K_и = = U_1 / U$; $K_и = I_1 / I$. Для синусоиды $K_и = 1$.

Коэффициент амплитуды равен отношению максимального значения несинусоидального тока или напряжения к действующему

$K_a = U_{max} / U$; $K_a = I_{max} / I$. Для синусоиды $K_a = \sqrt{2}$.

Максимальное значение напряжений измеряют амплитудным электронным вольтметром.

Возможность разложения периодических несинусоидальных электрических величин в ряд Фурье позволяет свести расчет электрических цепей с линейными элементами при воздействии несинусоидальных ЭДС к расчету цепей с постоянными и синусоидальными токами.

Мгновенные значения искомых токов и напряжений определяют на основе принципа наложения путем суммирования постоянных и гармонических составляющих тока и напряжения, найденных в результате расчетов.

10. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

Электрический ток связан с магнитным полем. Основными величинами, характеризующими магнитное поле, являются: магнитный поток, магнитная индукция и напряженность магнитного поля.

Магнитный поток Ф измеряется в веберах, $\Phi = \int_S \bar{B}\, \mathrm{d}\, \bar{S}$. Для катушки индуктивности $\Psi = W\Phi = LI$.

Магнитная индукция B – интенсивность магнитного потока, $B = \Phi / S$ (где S – сечение магнитопровода).

Напряженность магнитного поля связана с магнитной индукцией соотношением $B = \mu H$.

Магнитная проницаемость вещества $\mu = \mu_0 \mu_r$.

Относительная магнитная проницаемость μ_r.

Магнитная проницаемость в вакууме $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$.

Все вещества по величине магнитной проницаемости делятся на: диамагнетики – $\mu < \mu_0$ (висмут); парамагнетики – $\mu > \mu_0$ (кислород); ферромагнетики – $\mu >> \mu_0$ (железо, кобальт, никель и их сплавы).

Кривая намагничивания (рис. 42) показывает связь между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля. У ферромагнетиков эта связь существенно нелинейна.

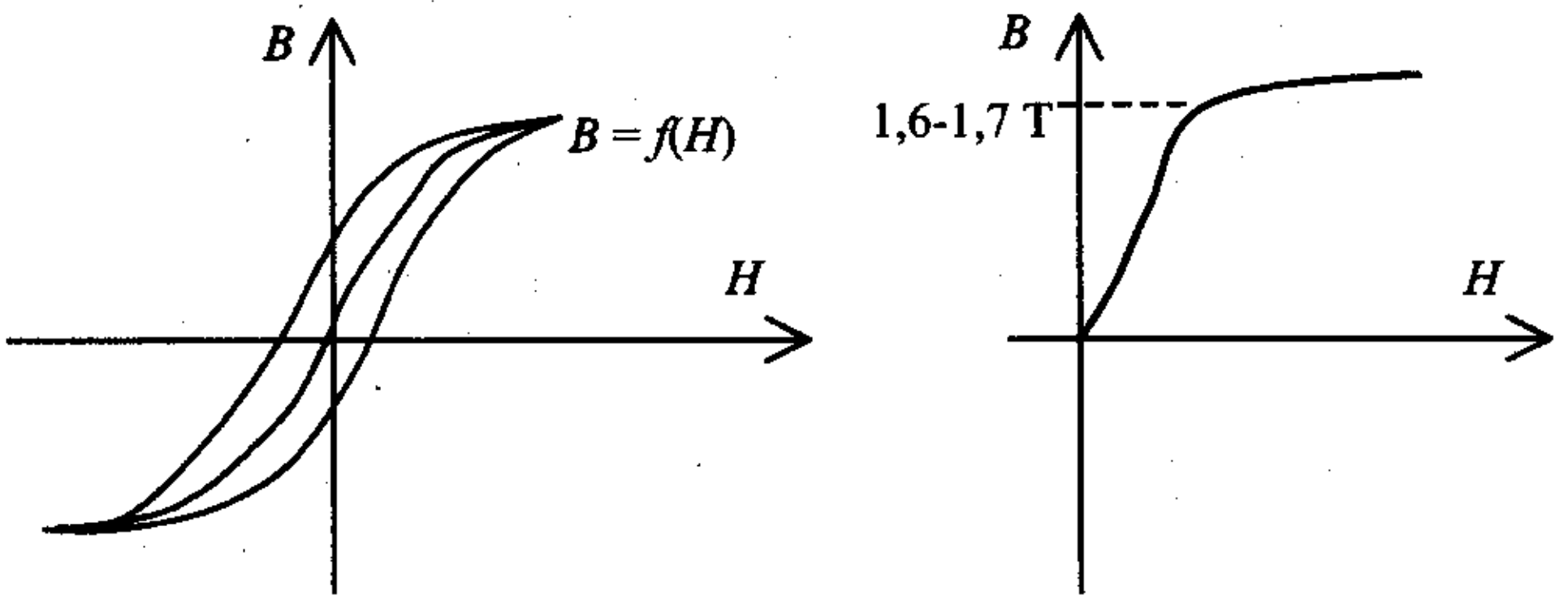


Рис. 42. Петля гистерезиса и кривая намагничивания

В стали потери на перемагничивание пропорциональны площади, ограниченной кривой намагничивания. Материалы с большой площадью кривой намагничивания называются магнитотвердыми, с малой площадью кривой намагничивания – магнитомягкими, например, электротехническая сталь. Материалы, имеющие прямоугольную петлю гистерезиса, используются в автоматике и вычислительной технике.

Магнитной цепью называется часть электротехнического устройства, предназначенная для создания в его рабо-

чем объеме магнитного поля заданной величины и конфигурации.

Магнитная цепь электрических реле, трансформаторов, электрических машин состоит из источников, возбуждающих магнитное поле, и магнитопровода, в котором магнитный поток концентрируется и практически весь замыкается.

При расчете магнитной цепи может быть поставлена задача определения намагничивающей силы (н.с.) при заданном магнитном потоке или индукции – это прямая задача. Обратная задача – определить магнитный поток по намагничивающей силе.

В обеих задачах должны быть известны размеры участков магнитной цепи и кривая намагничивания материала.

Расчет магнитной цепи производится на основании *первого закона Кирхгофа,* по которому алгебраическая сумма магнитных потоков в узле магнитной цепи равна 0:

$$\sum_{\kappa=1}^{m} \Phi_{\kappa} = 0,$$

и *второго закона Кирхгофа для магнитной цепи или закона полного тока.*

$$\oint \bar{H} dl = \sum_{k=1}^{n} I_k .$$

Циркуляция вектора напряженности магнитного поля H по замкнутому контуру равна алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром.

Если контур интегрирования охватывает *W* витков, то

$\oint \bar{H} dl = IW = F$ – намагничивающая сила или магнитодвижущая сила (МДС), измеряется в ампер-витках (ав).

$$Hl_{cp} = IW .$$

В общем случае $\sum Hl_{ср} = \sum IW$.

Закон Ома для участка магнитной цепи длиной $l_{ср}$ и площадью S. При напряжении $U_м$ между концами участка связь между напряженностью магнитного поля H и индукцией B выражается формулой:

$$\Phi = BS = \mu_o \mu_r HS = \mu_o \mu_r \frac{S}{\ell_{ср}} U_м .$$

В этом выражении Ф аналогичен току электрической цепи, а магнитное напряжение – электрическому напряжению.

Тогда магнитное сопротивление $R_м = \frac{\ell_{ср}}{\mu_o \mu_r S}$.

Магнитное сопротивление определяется воздушным зазором. При наличии воздушного зазора для создания соответствующей индукции требуется большой ток. При отсутствии воздушного зазора для создания соответствующей индукции требуется небольшой ток.

Нелинейность кривой намагничивания обусловливает нелинейность индуктивного сопротивления катушки на магнитном сердечнике.

Катушки индуктивности на ферромагнитном магнитопроводе считаются нелинейными элементами как в цепи постоянного тока, так и при синусоидальном напряжении.

Феррорезонанс

Для электрических цепей с нелинейным индуктивным и линейным емкостным сопротивлениями характерны явления феррорезонанса. При последовательном соедине-

нии различают феррорезонанс напряжений, а при параллельном – феррорезонанс токов.

Вольт-амперные характеристики электрической цепи при последовательном и параллельном соединениях элементов приведены соответственно на рис. 43а и 43б.

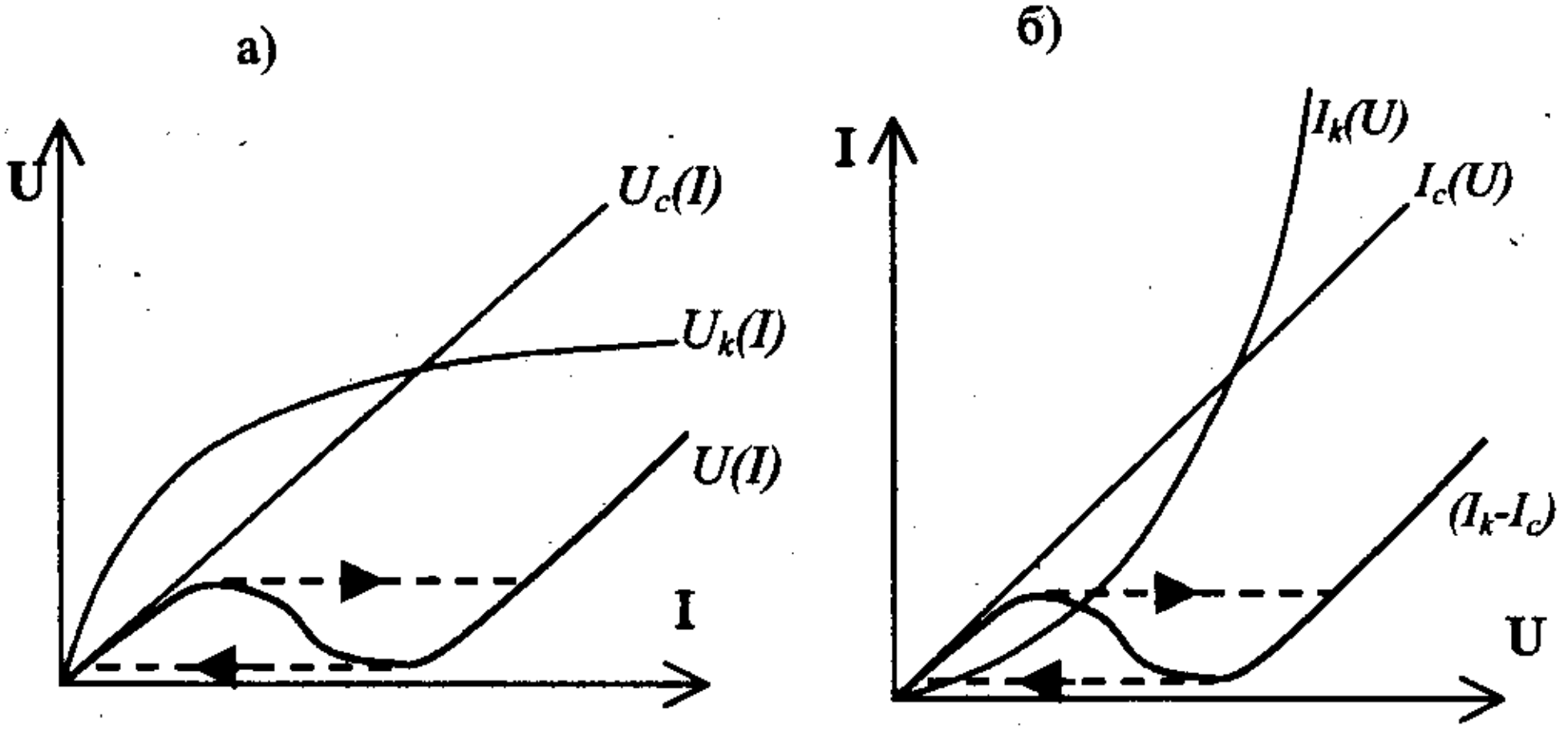


Рис. 43. Вольт-амперные характеристики электрической цепи при: а) последовательном и б) параллельном соединениях

Скачкообразное изменение величины тока и его фазы при последовательном включении рассматриваемых элементов и скачкообразное изменение величины напряжения при параллельном включении являются одной из особенностей таких цепей. Релейные свойства феррорезонансных цепей используются в устройствах автоматики.

Схема последовательного соединения может быть использована в качестве стабилизатора напряжения.

Для изменения индуктивного сопротивления катушки с ферромагнитным сердечником используют подмагничивание сердечника дополнительной катушкой, питаемой постоянным током. В этом случае она называется *дросселем*

насыщения и используется для регулирования скорости вращения двигателей, регулирования освещения, а также в выпрямительных установках с регулируемым напряжением.

11. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Измерением называется процесс нахождения опытным путем значения физической величины с помощью специальных технических средств. Электроизмерительные приборы широко используются при наблюдении за работой электроустановок, при контроле за их состоянием и режимами работы, при учете расхода и качества электрической энергии, при ремонте и наладке электротехнического оборудования.

Электроизмерительными приборами называют средства электрических измерений, предназначенные для выработки сигналов, функционально связанных с измеряемыми физическими величинами в форме, доступной для восприятия наблюдателем или автоматическим устройством.

По виду получаемой информации электроизмерительные приборы делятся на приборы для измерения электрических (ток, напряжение, мощность и др.) и неэлектрических (температура, давление и др.) величин;

по методу измерения – на приборы непосредственной оценки (амперметр, вольтметр и др.) и приборы сравнения (измерительные мосты и компенсаторы);

по способу представления измеряемой информации – на аналоговые и дискретные (цифровые).

Наибольшее распространение получили аналоговые приборы непосредственной оценки, которые классифицируются по следующим признакам: род тока (постоянный

или переменный), род измеряемой величины (ток, напряжение, мощность, сдвиг фаз), принцип действия (магнитоэлектрические, электромагнитные, электро- и ферродинамические), класс точности и условия эксплуатации.

Для расширения пределов измерения электрических приборов на постоянном токе используются шунты (для тока) и добавочные сопротивления $R_д$ (для напряжения). На переменном токе трансформаторы тока (тт) и напряжения (тн).

Измерение напряжения **осуществляется вольтметром (V), подключаемым *непосредственно* на зажимы исследуемого участка электрической цепи.**

Измерение тока **осуществляется амперметром (A), включаемым *последовательно* с элементами исследуемой цепи.**

Измерение мощности (W) и сдвига фаз **(φ) в цепях переменного тока производится с помощью ваттметра и фазометра. Эти приборы имеют две обмотки: неподвижную токовую, которая включается последовательно, и подвижную обмотку напряжения, включаемую параллельно.**

Для измерения *частоты переменного тока* (f) применяются частотометры.

Для измерения и учета *электрической энергии* – счетчики электрической энергии, подключаемые к измерительной цепи аналогично ваттметрам.

Основными характеристиками электроизмерительных приборов являются: погрешность, вариации показаний, чувствительность, потребляемая мощность, время установления показаний и надежность.

Основными частями электромеханических приборов являются электроизмерительная цепь и измерительный механизм.

Измерительная цепь прибора является преобразователем и состоит из различных соединений активного и реактивного сопротивлений и других элементов в зависимости от характера преобразования. Измерительный механизм преобразует электромагнитную энергию в механическую, необходимую для углового перемещения его подвижной части относительно неподвижной. Угловые перемещения стрелки α функционально связано с крутящим и противодействующим моментом прибора уравнением преобразования вида:

$$\alpha = \kappa X^n,$$

где κ – конструктивная постоянная прибора;

X^n – электрическая величина, под действием которой стрелка прибора отклоняется на угол α.

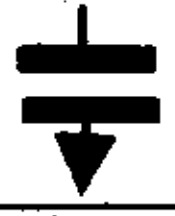
На основании данного уравнения можно утверждать, что если:

1. входная величина X в первой степени (n=1), то α будет менять знак при изменении полярности, и на частотах, отличных от 0, прибор работать не может;
2. n=2, то прибор может работать как на постоянном, так и на переменном токе;
3. в уравнение входит не одна величина, то в качестве входной можно выбирать любую, оставляя остальные постоянными;
4. две величины являются входными, то прибор можно использовать в качестве множительного преобразователя (ваттметр, счетчик) или делительного (фазометр, частотометр);
5. при двух или более входных величинах на несинусоидальном токе прибор обладает свойством избирательности в том смысле, что отклонение подвижной части определяется величиной только одной частоты.

Данные о приборах различных систем приведены в табл. 1.

Таблица 1

Данные аналоговых электроизмерительных приборов

Система	Обозначение системы	Тип	Уравнение преобразования	Род тока	Область применения	Расширение пределов измерения	Допустимая частота измер. величины
Магнитоэлектрическая		М	$\alpha = cI$	пост.	A, V,Ω	шунт, доб. сопр $R_д$	0
Электромагнитная		Э	$\alpha = cI^2dI/d\alpha$	пост. и перем.	A, V, f	тт, тн, $R_д$	0–5000
Электродинамическая		Д	$\alpha = cI_1I_2\cos\psi dM/d\alpha$	пост. и перем.	A, V,W	тт,тн, $R_д$	0–10000
Ферродинамическая		Д	$\alpha = cI_1I_2\cos\psi dM/d\alpha$	пост. и перем.	W,cosφ,φ, f	тт,тн, $R_д$	0–1000
Электростатическая		С	$\alpha = cU^2dC/d\alpha$	пост. и перем.	V	–	$0–10^8$
Индукционная		И	$\alpha = cI_1I_2\sin\psi$	перем.	счетчик	тт, тн,	50

Общими элементами являются: отсчетное устройство, подвижная часть измерительного механизма, устройства для создания вращающего, противодействующего и успокаивающего моментов.

Отсчетное устройство имеет шкалу и указатель. Интервал между соседними метками шкалы называют делением.

Цена деления прибора представляет собой значение измеряемой величины, вызывающее отклонение стрелки прибора на одно деление и определяется зависимостями:

$$C_v = \frac{Uн}{N} B/_{дел}; \; C_A = \frac{I_н}{N} A/_{дел};$$

$$C_W = \frac{U_н * I_н}{N} Bm/_{дел}.$$

Шкалы могут быть равномерными и неравномерными. Область между начальным и конечным значениями шкалы называют диапазоном показаний прибора.

Показания электроизмерительных приборов несколько отличаются от действительных значений измеряемых величин. Это вызвано трением в измерительной части механизма, влиянием внешних магнитных и электрических полей, изменением температуры окружающей среды и т.д. Разность между измеренным A_u и действительным $A_д$ значениями контролируемой величины называется *абсолютной погрешностью измерений:*

$$\Delta A = A_u - A_д.$$

Так как абсолютная погрешность не дает представления о степени точности измерений, то используют *относительную погрешность:*

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_д} \cdot 100 = \frac{A_u - A_д}{A_д} \cdot 100.$$

Поскольку действительное значение измеряемой величины при измерении неизвестно, для определения ΔA и Υ можно воспользоваться классом точности прибора.

Амперметры, вольтметры и ваттметры подразделяются на 8 классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Цифра, обозначающая класс точности, определяет наибольшую положительную или отрицательную основную приведенную погрешность, которую имеет данный прибор. Например, для класса точности 0,5 приведенная погрешность составит ±0,5%.

Принцип действия приборов *магнитоэлектрической системы* основан на взаимодействии поля постоянного магнита и проводников с током, а *электромагнитной* – на втягивании стального сердечника в неподвижную катушку при существовании в ней тока. Электродинамическая система имеет две катушки. Одна из катушек, подвижная, укрепляется на оси и располагается внутри неподвижной катушки.

Принцип действия прибора, возможность его работы в тех или иных условиях, возможные предельные погрешности прибора могут быть установлены по условным обозначениям, нанесенным на циферблат прибора.

Например: (А) – амперметр; (~) – переменный ток в пределах от 0 до 50А; (⊥) – вертикального положения, класс точности 1,0 и т.д.

Измерительные трансформаторы тока и напряжения имеют ферромагнитные магнитопроводы, на которых располагаются первичные и вторичные обмотки. Число витков вторичной обмотки всегда больше первичной.

Зажимы первичной обмотки трансформатора тока обозначают буквами $Л_1$ и $Л_2$ (линия), а вторичной – $И_1$ и $И_2$ (измерение). По правилам техники безопасности один из зажимов вторичной обмотки трансформатора тока, так же,

как и трансформатора напряжения, заземляют, что делается на случай повреждения изоляции. Первичную обмотку трансформатора тока включают последовательно с объектом, у которого проводят измерения. Сопротивление первичной обмотки трансформатора тока мало по сравнению с сопротивлением потребителя. Вторичная обмотка замыкается на амперметр и токовые цепи приборов (ваттметр, счетчик и т. д.). Токовые обмотки ваттметров, счетчиков и реле рассчитывают на 5А, вольтметры, цепи напряжения ваттметров, счетчиков и обмоток реле – на 100 В.

Сопротивления амперметра и токовых цепей ваттметра невелики, поэтому трансформатор тока работает фактически в режиме короткого замыкания. Номинальный ток вторичной обмотки равен 5А. Коэффициент трансформации трансформатора тока равен отношению первичного тока к номинальному току вторичной обмотки, а у трансформатора напряжения – отношению первичного напряжения ко вторичному номинальному.

Сопротивление вольтметра и цепей напряжения измерительных приборов всегда велико и составляет не менее тысячи Ом. В связи с этим трансформатор напряжения работает в режиме холостого хода.

Показания приборов, включенных через трансформаторы тока и напряжения, необходимо умножать на коэффициент трансформации.

Электронные аналоговые приборы представляют собой сочетание различных электронных преобразователей и магнитоэлектрического прибора и служат для измерения электрических величин. Они обладают высоким входным сопротивлением (малым потреблением энергии от объекта измерения) и высокой чувствительностью. Используются для измерения в цепях повышенной и высокой частоты.

Принцип действия *цифровых измерительных приборов* основан на преобразовании измеряемого непрерывного сигнала в электрический код, отображаемый в цифровой форме. Достоинствами являются малые погрешности измерения (0.1–0,01 %) в широком диапазоне измеряемых сигналов и высокое быстродействие от 2 до 500 измерений в секунду. Для подавления индустриальных помех они снабжены специальными фильтрами. Полярность выбирается автоматически и указывается на отсчетном устройстве. Содержат выход на цифропечатающее устройство. Используются как для измерения напряжения и тока, так и пассивных параметров – сопротивление, индуктивность, емкость. Позволяют измерять частоту и ее отклонение, интервал времени и число импульсов.

12. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ И МЕТОДЫ ЕЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ

К опасностям, связанным с неправильным применением электроэнергии, относятся:

- поражение электрическим током человека, случайно оказавшегося под напряжением. Токи через тело человека порядка 0,05–0,1 А опасны, большие значения могут быть смертельны;
- перегрев проводов или электрическая дуга между ними при коротких замыканиях, что приводит к ожогам человека или пожарам;
- перегрев поврежденных участков изоляции между проводами токами, утечки через изоляцию, что может привести к самовозгоранию изоляции;
- перегрев корпусов электрооборудования вследствие их перегрузки.

В связи с этим на горных предприятиях, например, применяются:

- **общепромышленное электрооборудование на открытых площадках и в помещениях с обычными условиями эксплуатации;**
- **специальное оборудование с жесткими условиями эксплуатации для открытых карьеров и в подземных выработках с высокой влажностью;**
- **рудничное взрывозащищенное оборудование в подземных выработках, где могут создаваться взрывоопасные воздушные среды за счет газа и угольной пыли.**

Для обеспечения безопасности необходимо:

- **исключить возможность прикосновения человека к токоведущим частям, что достигается заключением электрооборудования в закрытые корпусы и его отключением при ремонтах;**
- **по возможности применять безопасные низкие напряжения до 36 В при пользовании переносным электрооборудованием;**
- **поддерживать высокий уровень изоляции относительно земли;**
- **снижать влияние емкости проводов;**
- **использовать защитное заземление (заземляющий провод);**
- **применять общесетевые аппараты защиты от утечек в сетях с глухим заземлением нейтрали.**

В сети с занулением присоединение корпусов электрооборудования к отдельным заземлителям, не соединенным с нейтральным проводом, запрещено.

Действие электрического тока на организм человека и первая помощь пострадавшим

Действие электрического тока на организм человека проявляется в следующих видах: термическое, электролитическое, механическое, биологическое.

Термическое воздействие проявляется в виде токового и дугового ожогов.

Степени ожога: покраснение, появление пузырей, омертвение тканей, обугливание. При этом следует учитывать площадь поражения.

При поражении электрическим током человек может получить местные электротравмы либо электрический удар.

Местные электротравмы: ожог, металлизация кожи, электрические знаки, электроофтальмия.

Электролитическое воздействие проявляется в виде поражения внутренних органов вследствие электрохимических реакций в теле человека.

Механическое воздействие может быть прямым или косвенным. Прямое механическое воздействие проявляется в виде разрыва мышечных тканей и стенок кровеносных сосудов за счет превращения лимфы или крови в пар. Косвенное механическое воздействие проявляется в виде ушибов, вывихов, переломов при резких непроизвольных судорожных сокращениях мышц.

Биологическое воздействие проявляется в виде электрического удара – воздействия электрического тока на центральную нервную систему.

Электрический удар имеет несколько степеней:

1) легкая дрожь в суставах, слабая боль,
2) сильные боли в суставах,
3) потеря сознания и нарушение сердечной деятельности или дыхания,

4) потеря сознания и остановка сердца либо остановка дыхания,
5) потеря сознания, остановка сердца, остановка дыхания, т.е. состояние клинической смерти.

На степень поражения человека электрическим током существенно влияют: величина тока, длительность протекания тока через тело человека, путь протекания, состояние кожи.

По величине и действию тока на организм человека различают ток ощутимый и ток неотпускающий, при котором пострадавший не может самостоятельно разжать руку. Ощутимый ток – постоянный около 5–8 мА, переменный – порядка 1 мА. Величина неотпускающего тока – порядка 15 ÷ 30 мА. Токи более 30 мА считаются опасными.

Величина сопротивления тела человека в зависимости от внешних условий может меняться в широких пределах – от нескольких сотен Ом до десятков кОм. Особо резкое падение сопротивления наблюдается при напряжении до 40–50 В, когда сопротивление тела человека снижается в десятки раз. Однако при проведении расчетов на электробезопасность в сетях напряжением выше 50 В принято считать величину сопротивления тела человека 1000 Ом.

Длительность протекания тока и величина допустимого тока связаны эмпирической формулой $I_{доп} = \frac{114}{\sqrt{\Delta t}}$.

Чем меньше длительность протекания тока, тем больше величина допустимого тока. Если $\Delta t = 16$ мс, то величина допустимого тока 30 мА.

Такая величина тока определяет требования к изоляции. Так, например, для сети с фазным напряжением

220 В сопротивление изоляции должно быть не менее

$$Z_{из} = \frac{3U_{ф}}{I_{доп}} = \frac{3 * 220}{30 \cdot 10^{-3}} = 22000 \text{ Ом}.$$

При поражении человека электрическим током следует немедленно отключить электроустановку. Если выключатель далеко, пострадавшего необходимо немедленно освободить от действия электрического тока, оттаскивая его за одежду, либо оттолкнув его каким-либо токонепроводящим предметом (палкой, доской).

Запрещается хватать пострадавшего голой рукой за оголенные участки тела.

После освобождения пострадавшего от действия электрического тока следует немедленно вызвать медицинскую помощь.

В случае необходимости до прибытия медицинской помощи пострадавшему делают искусственное дыхание или массаж сердца, уложив его на спину на твердую поверхность.

Режимы нейтрали трехфазных электрических сетей и их влияние на уровень электробезопасности

Место соединения концов фаз источника питания (генератора или трансформатора) называется нейтралью (точка О на рис. 44).

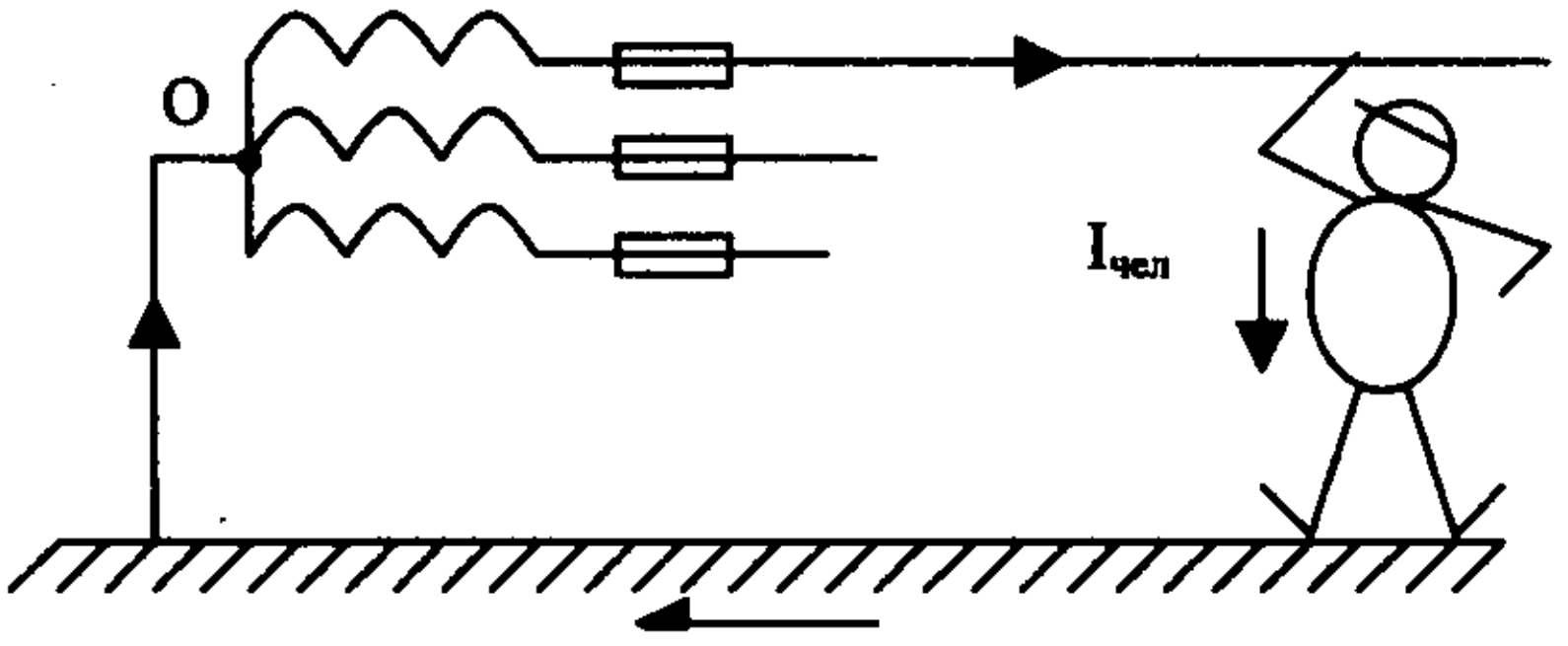


Рис. 44. Прикосновение человека к фазному проводу

Режимы нейтрали – заземленная нейтраль, изолированная нейтраль, компенсированная нейтраль.

Заземленная нейтраль

Ток однофазного короткого замыкания в сети с заземленной нейтралью достаточно велик и сопровождается возникновением дуги, что делает невозможным использование таких сетей в угольных шахтах и помещениях, опасных в отношении взрыва и пожара. Поэтому сети с заземленной нейтралью могут использоваться в помещениях, не опасных в отношении взрыва и пожара. Защита от короткого замыкания осуществляется плавкими вставками или реле максимальной токовой защиты, что удешевляет эксплуатационные расходы. Напряжение поврежденной фазы при однофазном замыкании падает до 0, напряжения неповрежденных фаз меняются незначительно, поэтому нет повышенных требований к изоляции.

На промышленных предприятиях используется наиболее распространенная система 220/380 В с заземленной нейтралью. В случае прикосновения к фазному проводу через тело человека будет протекать ток $I_{чел} = \frac{U_ф}{R_{чел}} = \frac{220}{1000} = 0{,}22\,A$**, что очень опасно.**

Прикосновение тела человека к фазному проводу в сети с заземленной нейтралью всегда опасно.

Изолированная нейтраль

При однофазном замыкании на землю в сети с изолированной нейтралью ток короткого замыкания определяется сопротивлением изоляции, которое, в свою очередь, определяется активным и емкостным сопротивлением. При хорошем состоянии изоляции и небольшой длине кабелей

(емкость кабеля невелика) сопротивление изоляции достаточно велико, ток однофазного замыкания небольшой – возможно возникновение искрения при отсутствии дугового разряда, что делает возможным применение таких сетей во взрывоопасных и пожароопасных помещениях.

Прикосновение к фазному проводу в сети с изолированной нейтралью (рис. 45) может быть безопасным при хорошем состоянии изоляции, так как ток через тело человека определяется сопротивлением изоляции.

Ток с одной из фаз проходит через тело человека, через сопротивление изоляции на другие фазы. В сети 220/380 В при сопротивлении изоляции 60 кОм ток через человека:

$$I_{чел} = \frac{U_л}{R_{чел} + Z_{изол}} = \frac{380}{1000 + \frac{60000}{3}} = 18 \text{ мА},$$

что безопасно.

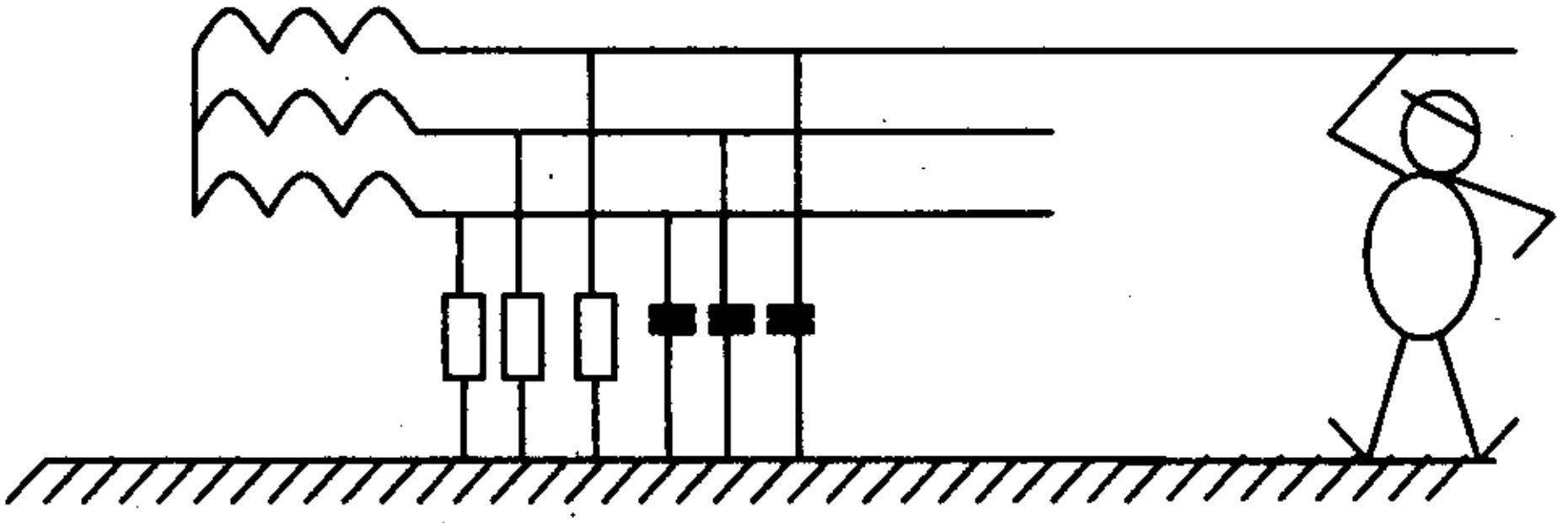


Рис. 45. Прикосновение человека к фазному проводу в сети с изолированной нейтралью

При большой длине кабельных линий суммарная емкость сети увеличивается, сопротивление изоляции снижается, прикосновение человека к фазному проводу может стать опасным. Кроме того, в случае пробоя изоляции одной из фаз и прикосновения к другой фазе на

тело человека воздействует линейное напряжение и в токовой цепи отсутствует сопротивление изоляции, что гораздо опаснее. Поэтому необходим непрерывный контроль изоляции и немедленное отключение участка сети при пробое одной из фаз или опасном снижении сопротивления.

Компенсированная нейтраль

Нейтральная точка соединяется с землей (рис. 46) через индуктивное сопротивление X_L, примерно равное емкостному сопротивлению изоляции X_C, что приводит к образованию «электрической пробки», при которой емкостная проводимость сравнивается с проводимостью индуктивной.

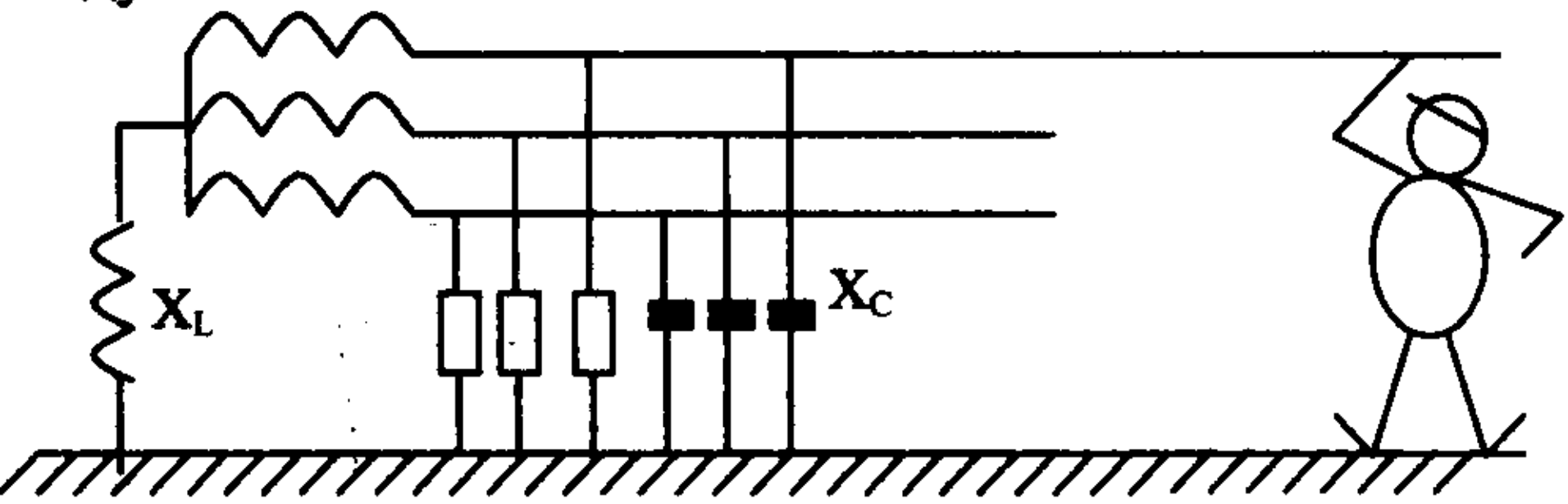


Рис. 46. Компенсированная нейтраль

Поскольку они соединены параллельно, суммарная проводимость становится равной примерно 0, а это соответствует бесконечно большому сопротивлению. Величина тока, протекающего через тело человека при прикосновении его к фазному проводу в сети с компенсированной нейтралью, существенно уменьшается.

Защитное заземление

Защитным заземлением называется преднамеренное соединение с землей всех нетоковедущих металлических

частей электроустановки, не находящихся под напряжением, но которые могут оказаться под напряжением в результате пробоя изоляции.

Следует различать рабочее заземление и защитное заземление. Рабочее заземление – соединение нейтрали с землей, определяющее режим заземленной нейтрали. Защитное заземление – соединение корпусов и других деталей с заземлителем. Заземлителями могут служить труба, уголковая сталь, швеллер, полосовая сталь, лист железа, помещенные во влажную землю (а также арматура железобетонных конструкций, стальные опоры ЛЭП и др.).

Переходное сопротивление устройства заземления должно быть не более 2 Ом в подземных условиях угольных шахт, в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных. В других случаях не более 4 Ом, на опорах ЛЭП не более 10 Ом.

Соединение корпусов с заземлителем осуществляется стальным проводом, сечением не менее 24 мм, в земле стальной шинкой сечением 50–120 мм, медным проводом сечением не более 25 мм.

При соединении предпочтительнее сварка.

Передвижные электроприемники заземляются через заземляющую жилу кабеля, питающего электроустановку.

Принцип действия защитного заземления – снижение напряжения прикосновения корпуса до безопасной величины за счет малого сопротивления заземлителя (рис. 47).

Напряжением прикосновения называется напряжение на какой-либо токопроводящй части электроустановки в момент прикосновения к ней человека. Напряжение прикосновения обусловливает величину тока через тело чело-

века. В аварийных ситуациях это напряжение может быть опасным $$I_ч = \frac{U_{прикосновения}}{R_{чел}}.$$

Для снижения напряжения прикосновения необходимо обеспечить эффективное заземление или зануление электроустановки.

$$U_{прикосновения} = I_{КЗ} R_З.$$

При малом сопротивлении заземления ($R_З$ = 2 Ом) напряжение на корпусе электроаппарата в случае пробоя изоляции будет невелико, большая часть тока замыкания $I_З$ пойдет через заземлитель, а не через тело человека ($R_ч$ = = 1000 Ом), включенного параллельно сопротивлению заземления.

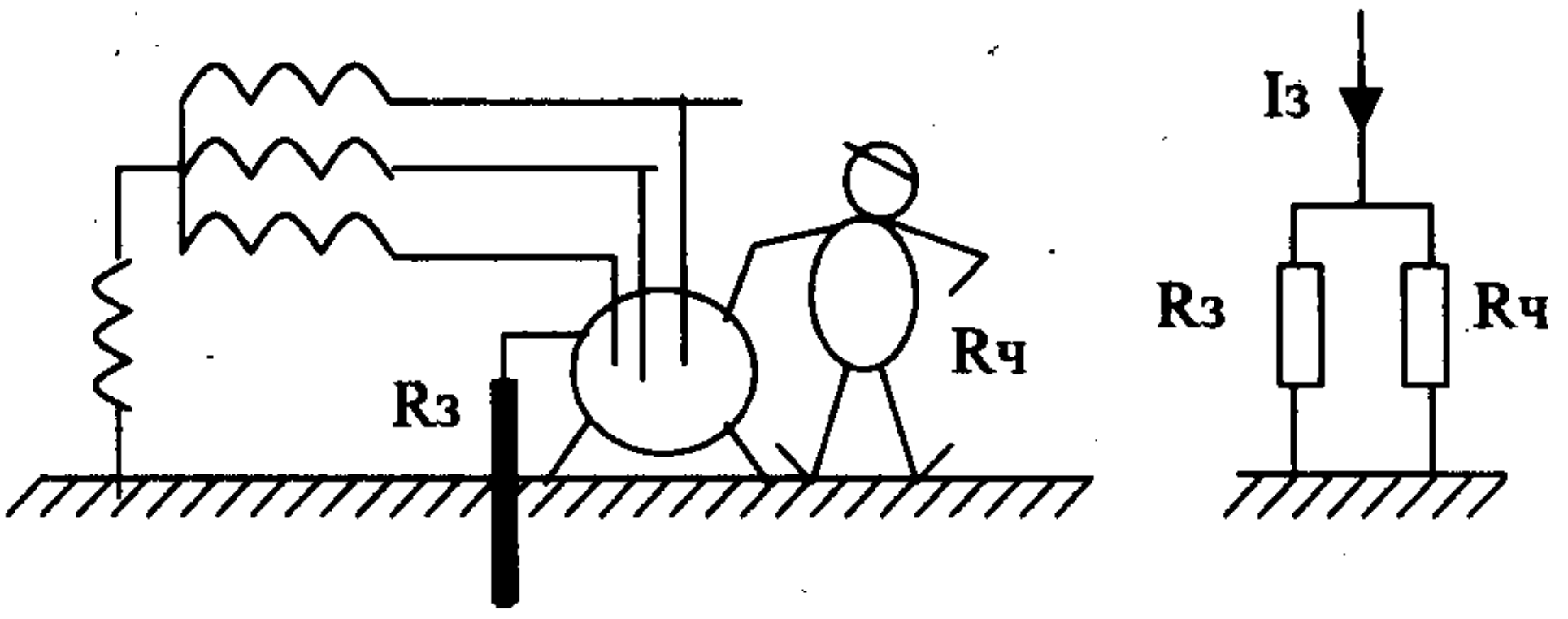


Рис. 47. Принцип действия защитного заземления

Защитное зануление. Принцип действия

Занулением называется преднамеренное электрическое соединение металлических нетоковедущих частей электроустановок с нулевым, многократно заземленным проводом.

Нулевой защитный провод имеет сечение в два раза меньшее, чем нулевой рабочий провод. Нулевой рабочий провод используется в четырехпроводных сетях с несимметричной нагрузкой (например, бытовой).

Назначение защитного зануления – устранение опасности поражения током в случае прикосновения к корпусу, оказавшемуся под напряжением.

Принцип действия – превращение замыкания на корпус в однофазное короткое замыкание и отключение его максимальной токовой защитой (плавкими вставками, автоматами и др.).

Зануление осуществляет 2 защитных действия:

1) быстрое автоматическое отключение поврежденного участка;
2) снижение напряжения прикосновения за счет заземления.

Область применения – трехфазные четырехпроводные сети до 1000 В с глухозаземленной нейтралью, в однофазных двухпроводных сетях переменного тока; в трехпроводных сетях постоянного тока – с глухозаземленной средней точкой.

Для схемы зануления необходимы: нулевой защитный проводник, глухое заземление нейтрали и повторное заземление нулевого защитного провода (рис. 48).

Нулевой защитный провод снижает сопротивление цепи короткого замыкания и обеспечивает тем самым достаточно большой ток замыкания для надежного срабатывания максимальной токовой защиты.

Глухое заземление нейтрали обеспечивает малое напряжение прикосновения.

Повторное заземление нейтрали обеспечивает малое напряжение прикосновения для удаленных электроприемников.

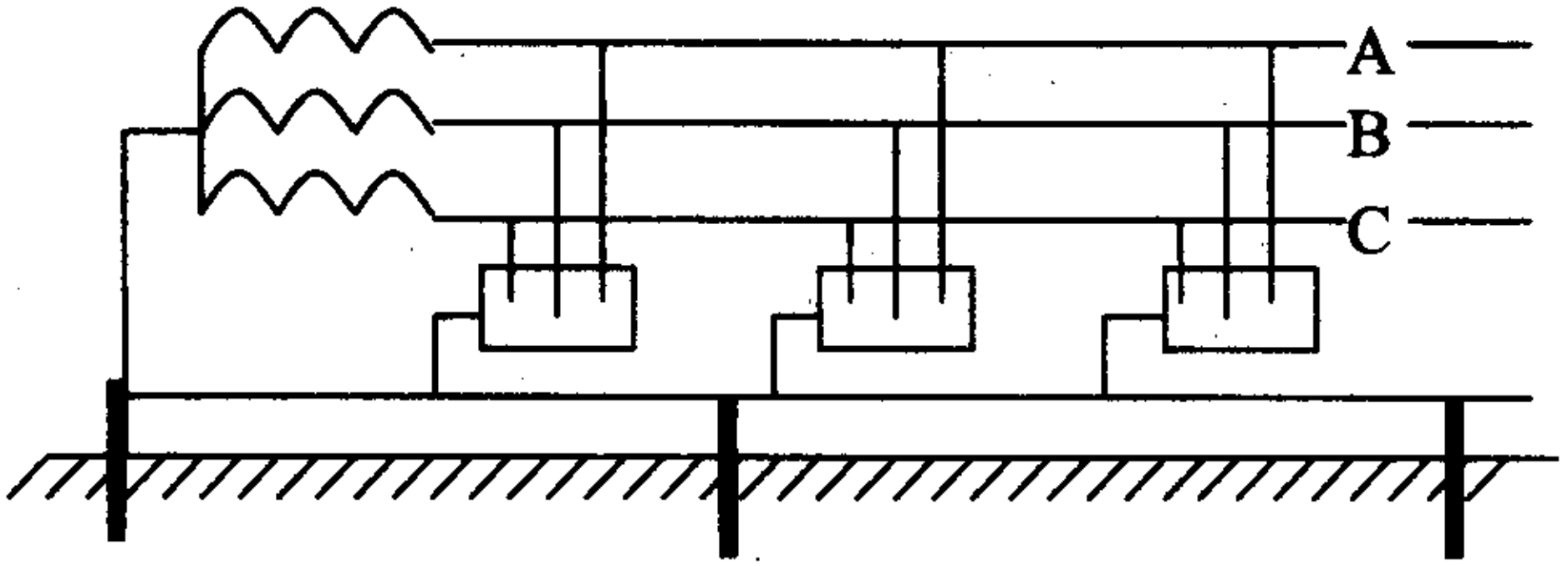


Рис. 48. Защитное зануление

Защитное отключение. Принцип действия

Назначение защитного отключения – обеспечение автоматического отключения электроустановки при возникновении в ней опасности поражения человека током. Меры защиты – быстрое отключение участка сети.

Устройство защитного отключения (УЗО) включает в себя прибор защитного отключения и исполнительный орган – автоматический выключатель.

Прибор защитного отключения – совокупность отдельных элементов, которые воспринимают входную величину, реагируют на ее изменение и при заданном ее значении дают сигнал на отключение выключателя.

Исполнительный орган – автоматический выключатель.

УЗО применяются в электроустановках, где по каким-либо причинам трудно обеспечить эффективное заземление или зануление, где высока вероятность прикосновения людей к токоведущим частям (передвижные электроустановки, ручной электроинструмент).

УЗО делятся на следующие типы, реагирующие на:

- потенциал корпуса,
- ток замыкания на землю,

- напряжение нулевой последовательности,
- ток нулевой последовательности,
- напряжение фазы относительно земли,
- оперативный ток,
- комбинационные устройства.

Устройства, реагирующие на потенциал корпуса

При возникновении опасных напряжений на корпусе электроустановки срабатывает реле напряжения РН (рис. 49), включенное между корпусом и землей, размыкает свой нормально замкнутый контакт РН в цепи питания отключающей катушки ОК, которая отключает электроустановку от сети.

В другом варианте (рис. 50) при появлении опасного напряжения на корпусе электроустановки срабатывает реле напряжения РН, замыкает свой контакт, вызывая короткое замыкание и перегорание предохранителя, обесточивая тем самым электроустановку.

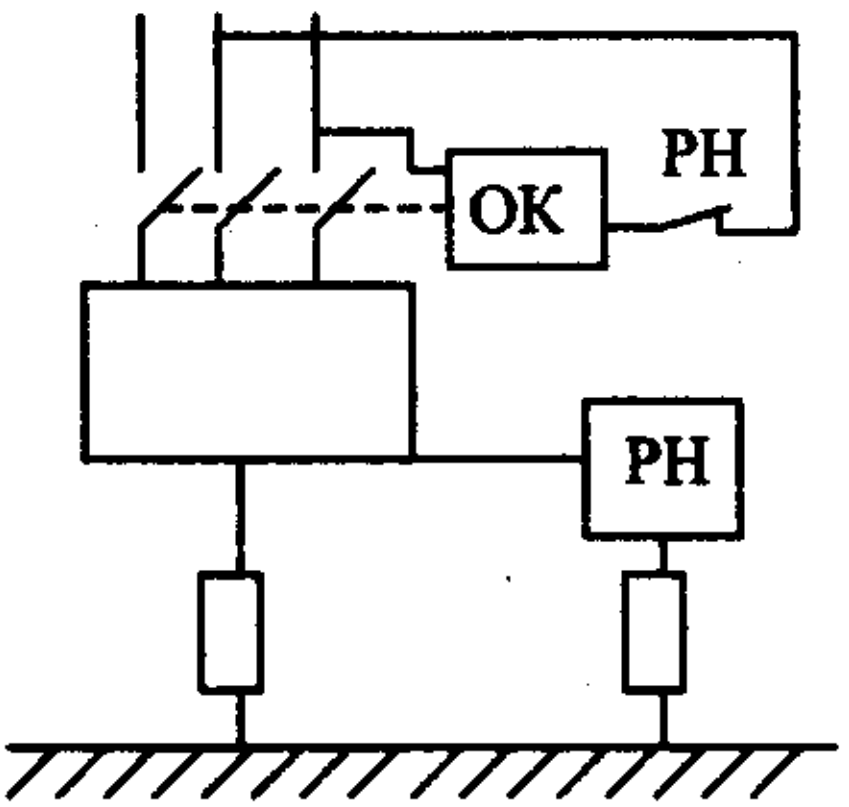


Рис. 49. УЗО с реле напряжения

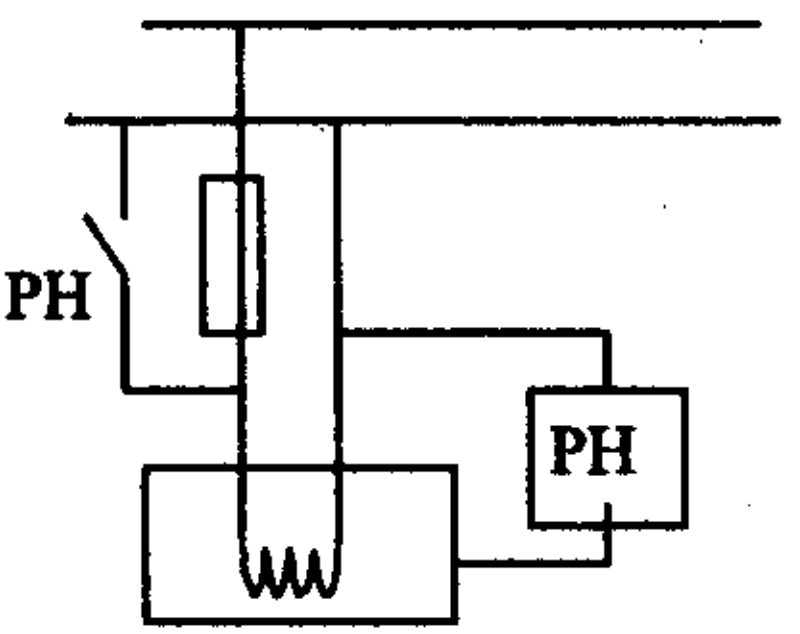


Рис. 50. УЗО с предохранителем

Устройства, реагирующие на ток замыкания на землю

При возникновении опасных напряжений на корпусе электроустановки (рис. 51) возникает ток утечки, срабатывает реле тока РТ, включенное между корпусом и землей, размыкает свой нормально замкнутый контакт в цепи питания отключающей катушки ОК, которая отключает электроустановку от сети.

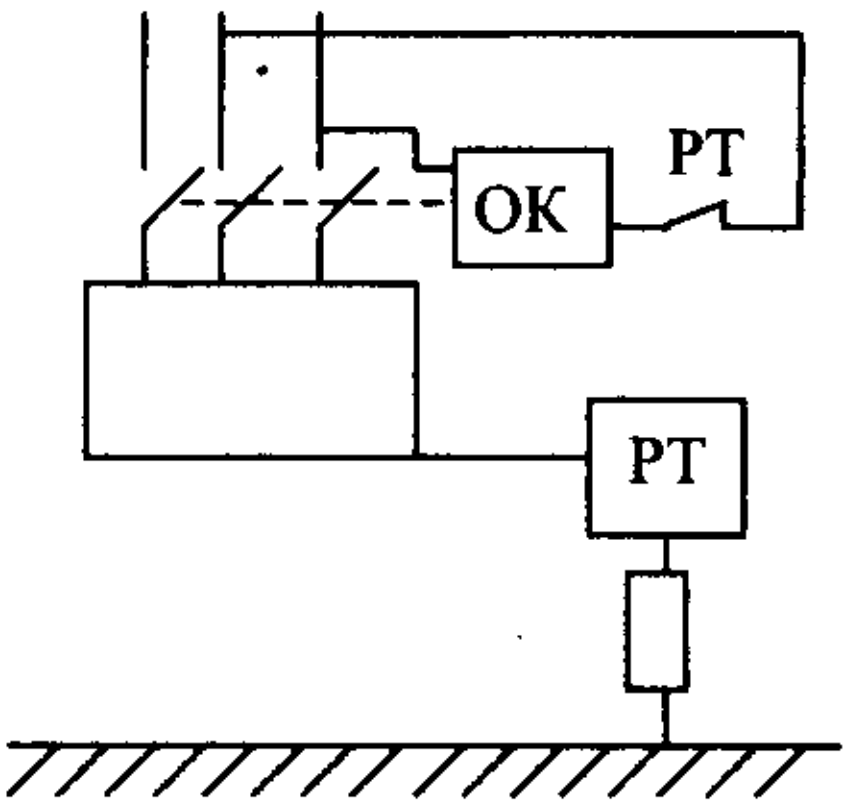


Рис. 51. УЗО с реле тока

Снижение сопротивления или пробой изоляции одной из фаз является причиной возникновения несимметричного режима токов и напряжений, появляется напряжение нулевой последовательности, которое можно использовать для отключения электроустановки. Реле напряжения РН включаются между землей и нулевой точкой, образованной либо тремя большими сопротивлениями (рис. 52а), либо тремя конденсаторами (рис. 52б).

Если вторичные обмотки трансформатора включить последовательно (рис. 52в), то реле напряжения РН, включенное в такую цепь, будет реагировать на напряжение нулевой последовательности, возникающее при несимметричном режиме.

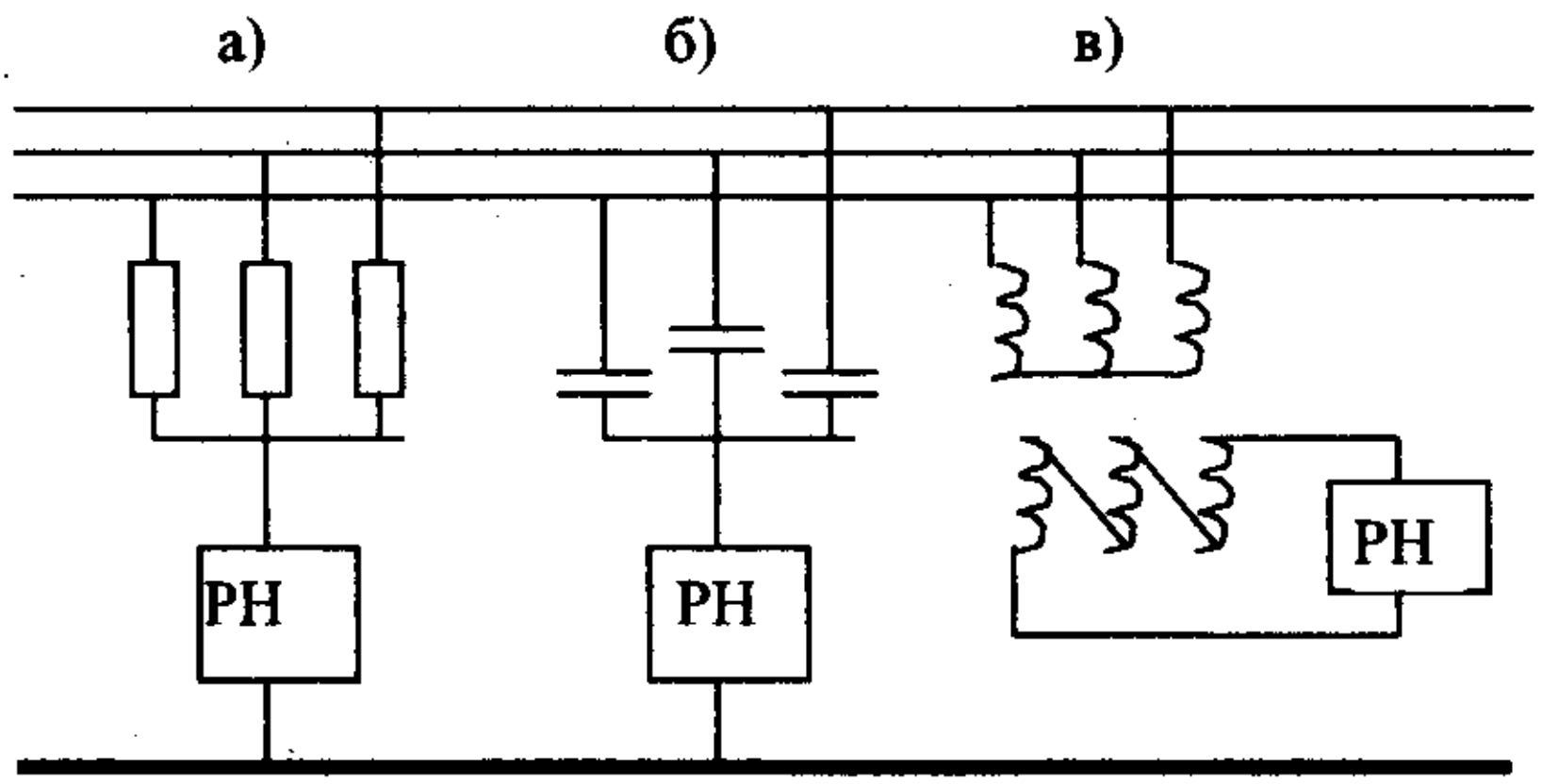


Рис. 52. УЗО, реагирующие на напряжение нулевой последовательности

Во вторичной обмотке трансформатора тока, охватывающего своим магнитопроводом все три фазы кабеля (рис. 53), протекает сумма токов фаз А, В и С с учетом коэффициента трансформации.

В симметричном режиме ток отсутствует, так как

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 .$$

В несимметричном режиме (снижение или пробой изоляции) возникает ток нулевой последовательности, срабатывает реле тока РТ, подается команда на отключение электроустановки.

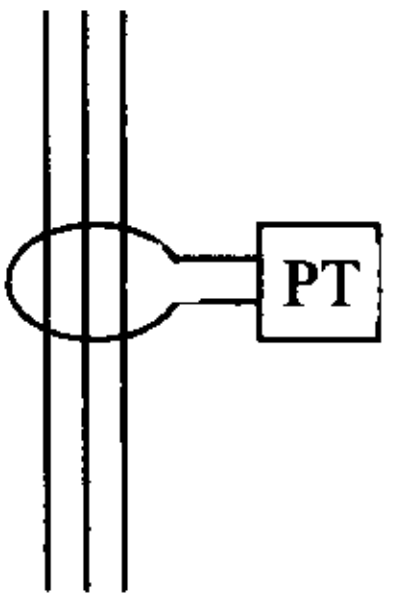


Рис. 53. УЗО, реагирующие на ток нулевой последовательности

Шаговое напряжение

Шаговым напряжением называется разность потенциалов на расстоянии одного шага $\varphi_1 - \varphi_2$ (рис. 54) на поверхности грунта вблизи заземлителя в момент протекания тока короткого замыкания. При больших токах короткого замыкания это напряжение может быть опасным для человека.

Для защиты от поражения шаговым напряжением устраивают заземляющий контур из большого числа заземлителей, близко расположенных друг от друга.

При обнаружении воздействия шагового напряжения необходимо удаляться от электроустановки мелкими шагами.

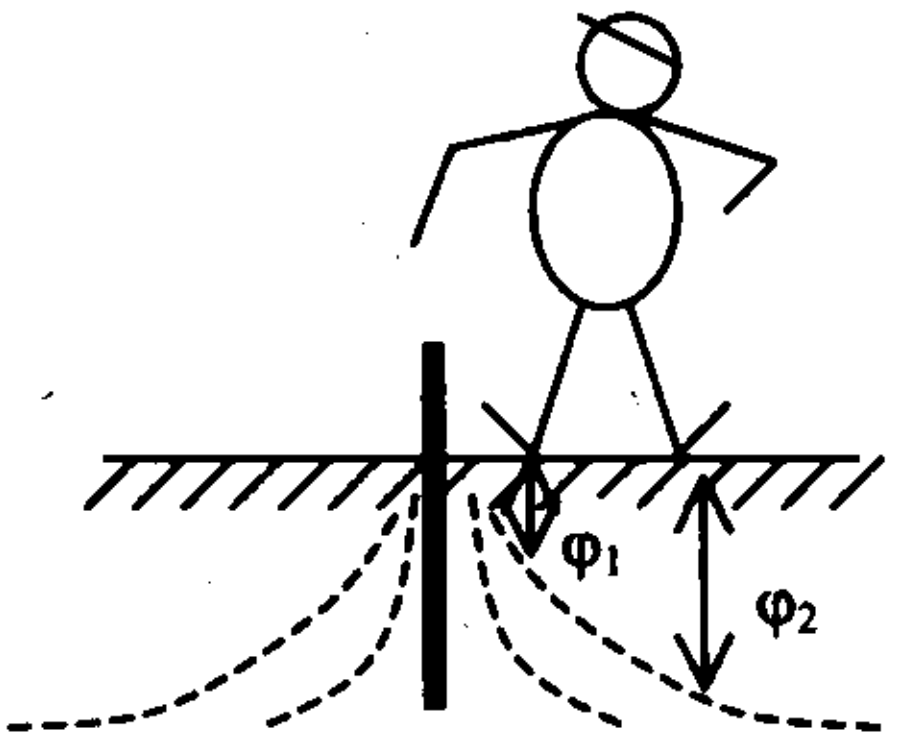


Рис. 54. Возникновение шаговых напряжений

Взрывобезопасное и искробезопасное электрооборудование

При коммутации электрических цепей (включении, выключении электроприемников) возникает либо искровой разряд, либо дуга между расходящимися контактами. Во взрывоопасной атмосфере (в угольной шахте – метан, угольная пыль) может произойти взрыв. Для исключения

такой возможности коммутационные аппараты помещают во взрывобезопасную оболочку. Взрывобезопасность обеспечивается мощным корпусом, способным выдержать взрыв внутри оболочки с выходом продуктов горения через щелевой лабиринт.

На корпусе электрооборудования выбивается буква В.

Например, РВ – исполнение рудничное, взрывобезопасное.

Искробезопасность цепей управления достигается использованием пониженных напряжений (18, 36 В), снижением величины тока в цепях управления – вторичная обмотка понижающего трансформатора выполняется высокоомным проводом. Энергия искры, которая образуется при размыкании контактов, должна быть меньше, чем необходимо для развития взрывной реакции.

На корпусах приборов в этом случае выбивается буква И – искробезопасное исполнение.

В силовых кабельных сетях используют опережающее защитное отключение, т.е. до того как возникнет дуговой разряд, напряжение на этом участке сети должно быть снято мгновенным закорачиванием тиристорными ключами всех трех фаз друг на друга как со стороны источника питания, так и со стороны двигателя.

Контроль изоляции электрических сетей. Реле утечки

Однофазное короткое замыкание в сети с изолированной нейтралью может остаться незамеченным, поскольку ток замыкания небольшой. Однако незамеченное и вовремя не отключенное однофазное замыкание может перерасти в двух- и трехфазное замыкание с дуговым раз-

рядом и взрывом пылегазовой смеси (угольные шахты). Кроме того, человек, прикоснувшийся к одной из фаз при наличии пробоя изоляции в другой фазе, попадает под воздействие линейного напряжения с тяжелыми последствиями.

Поэтому работа в сетях с изолированной нейтралью допускается только при наличии непрерывного контроля изоляции и немедленного отключения электроустановки при снижении сопротивления изоляции фазы или ее пробоя.

Контроль изоляции осуществляется блокировочными реле утечки (БРУ), устройствами автоматического контроля изоляции (УАКИ), реле утечки (РУ).

Принцип действия РУ, БРУ, УАКИ основан на контроле величины оперативного тока, протекающего через сопротивление изоляции.

БРУ встроено в пускатель и не дает возможности включить пускатель, если ток утечки больше нормы (следовательно, сопротивление изоляции ниже нормы). При включенном пускателе БРУ отключено, сопротивление изоляции не контролируется.

УАКИ содержит двухобмоточное реле, по одной обмотке которого протекает оперативный ток от собственного источника питания, по другой – ток утечки, зависящий от состояния сопротивления изоляции. В двухобмоточном реле эти токи создают магнитодвижущие силы, направленные встречно. При достижении разностного магнитного потока установки срабатывания реле УАКИ дает команду на отключение автоматического фидерного выключателя АФВ.

Реле утечки РУ имеет большую чувствительность, чем реле УАКИ.

Категории помещений в отношении электробезопасности

С точки зрения опасности поражения людей электрическим током, определены 3 класса помещений:

- *без повышенной опасности*
- *с повышенной опасностью*
- *особо опасные.*

К *помещениям без повышенной опасности* относятся сухие помещения (относительная влажность < 60%), влажные (длительно влажность < 75%), с токонепроводящими полами, с токонепроводящей пылью, нежаркие (t < 30^0), без возможного прикосновения к металлическим частям здания и одновременно к корпусам электрооборудования.

К *помещениям с повышенной опасностью* относятся сырые помещения (влажность > 75%), с токопроводящими полами, с токопроводящей пылью, жаркие (t > 30^0C), с возможностью прикосновения к металлическим частям здания и одновременно к корпусам электрооборудования.

К *особо опасным помещениям* относятся сырые (влажность 100%), с химически активной средой, если имеются одновременно два или более условий из перечисленных для помещений с *повышенной опасностью.*

Большая часть помещений на производстве относится к последним двум.

Требования к переносному электроинструменту

К работе с электроинструментом допускается персонал с группой 2 и выше.

При проведении работ в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных применяются светильники напряжением не выше 42 В. Если условия особо небла-

гоприятные – 12 В. Нельзя использовать автотрансформаторы.

Перед началом работ следует проверить комплектность, произвести внешний осмотр, проверить четкость работы выключателя, проверить работу на холостом ходу.

Прикосновение проводов и кабелей к металлическим горячим или влажным поверхностям не допускается.

Запрещается передавать электроинструмент другим лицам, разбирать и производить ремонт, оставлять включенными в электросеть без надзора.

Категории работ в отношении электробезопасности. Технические мероприятия при подготовке работ

Все работы в электроустановках по степени опасности разделены на 4 группы: выполняемые при полном снятии напряжения, при частичном снятии напряжения, на токоведущих частях, находящихся под напряжением или вблизи них; без снятия напряжения вдали от токоведущих частей, находящихся под напряжением.

К *первой группе* относится работа в электроустановках, где со всех токоведущих частей снято напряжение и где нет незапертого входа в соседнюю электроустановку, находящуюся под напряжением.

Ко *второй группе* относится работа в электроустановке, где напряжение снято только с того присоединения, на котором ведется работа, или оно снято полностью, но открыт доступ в соседнее помещение, где токоведущие части находятся под напряжением.

К *третьей группе* относится работа, выполняемая непосредственно на токоведущих частях, находящихся под напряжением или вблизи от них. Данные работы выполня-

ются только при наличии острой производственной необходимости, а также при измерениях токов и напряжений.

К *четвертой группе* относится работа в электроустановке, при которой исключено случайное приближение работающих людей и инструмента к токоведущим частям на опасное расстояние.

Для обеспечения безопасности работающих требуется выполнение технических и организационных мероприятий.

Технические мероприятия осуществляют при проведении работ с полным или частичным снятием напряжения.

Подготовку рабочего места осуществляют в следующем порядке:

- отключают необходимые токоведущие части и принимают меры, исключающие ошибочную подачу напряжения;
- на отключенных коммутационных аппаратах вывешивают запрещающие плакаты «Не включать – работают люди», «Не включать – работа на линии»;
- ограждают неотключенные токоведущие части;
- к заземляющему устройству присоединяют зажим переносного заземления;
- проверяют отсутствие напряжения на отключенной части установки, накладывают переносное заземление или включают заземляющие ножи;
- рабочее место ограждают переносными ограждениями и вывешивают предостерегающие плакаты «Стой – высокое напряжение!», «Работать здесь», «Не влезай – убьет!».

Нарушение последовательности перечисленных операций может стать причиной несчастного случая.

Группы по электробезопасности персонала, обслуживающего электроустановки

1-я группа – неэлектротехнический персонал. Стаж работы не нормируется.

2-я группа – неэлектротехнический персонал со стажем работы 2 месяца или административно-технический персонал, не имеющий среднего образования, со стажем работы 1 месяц, то же со средним образованием.

3-я группа – неэлектротехнический персонал со стажем работы 12 месяцев или административно-технический, дежурный, оперативно-ремонтный и ремонтный персонал, не имеющий среднего образования, со стажем работы 2 месяца в предыдущей группе, то же со средним образованием.

4-я группа – административно-технический, дежурный, оперативно-ремонтный и ремонтный персонал, не имеющий среднего образования, со стажем работы 6 месяцев в предыдущей группе, со средним образованием 3 месяца в предыдущей группе.

5-я группа – административно-технический, дежурный, оперативно-ремонтный и ремонтный персонал, не имеющий среднего образования, со стажем работы 24 месяца в предыдущей группе, со средним образованием 12 месяцев в предыдущей группе.

Порядок действий и меры безопасности при наложении заземлителей

Отсутствие напряжения проверяется указателем напряжения, исправность которого перед применением должна быть установлена с помощью специальных приборов.

В электроустановках выше 1000 В пользоваться указателем напряжения необходимо в диэлектрических перчат-

ках. В электроустановках 35 кВ и выше для проверки напряжения можно пользоваться изолирующей штангой (нет искрения – нет напряжения).

Обслуживающий персонал, работающий в электроустановках до 1000 В, должен иметь группу 3, выше 1000 В – группу 4.

Устанавливать заземление на токоведущие части необходимо *непосредственно после проверки* отсутствия напряжения.

Переносное заземление сначала надо присоединить к заземляющему устройству, а затем, после проверки отсутствия напряжения, установить на токоведущие части.

Снимать переносное заземление следует в обратном порядке.

Установка и снятие переносных заземлителей должны выполняться в диэлектрических перчатках, в установках выше 1000 В используется изолирующая штанга.

Индивидуальные средства защиты и сроки их проверки

К индивидуальным средствам защиты относятся защитные очки, рукавицы, противогазы, респираторы, каски, монтерские пояса, страховочные канаты.

Основные изолирующие средства – диэлектрические перчатки, изолирующие штанги, изолирующие клещи, указатели напряжения, инструмент с изолированными ручками.

Дополнительные изолирующие средства – диэлектрические коврики, изолирующие подставки, боты, галоши, диэлектрические колпаки.

Основные изолирующие средства, предназначенные для работы в сетях от 1 кВ до 110 кВ, испытывают

3-кратным линейным напряжением, но не ниже 40 кВ; выше 110 кВ – 3-кратным фазным.

Нормы и сроки электрических испытаний

Изолирующие штанги ..... 1 раз в год

Измерительные штанги..... в сезон измерений 1 раз в 3 месяца

Изолирующие клещи ..... 1 раз в год

Электроизмерительные клещи ..... 1 раз в год

Указатели напряжений ..... 1 раз в год

Диэлектрические перчатки ..... 1 раз в 6 месяцев

Диэлектрические боты ..... 1 раз в 36 месяцев

Диэлектрические галоши ..... 1 раз в 12 месяцев

Изолирующие накладки ..... 1 раз в 12 месяцев

Инструмент с изóлирующими рукоятками ..... 1 раз в 12 месяцев

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Электрические машины

Электрические машины относятся к электротехническим устройствам, служащим как для преобразования электрической энергии (трансформатор), так и для привода в действие различных промышленных и бытовых механизмов.

1. ТРАНСФОРМАТОР

Основным преобразовательным устройством является трансформатор. Трансформатором называется электротехническое устройство, служащее для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Трансформаторы делятся по назначению: силовые, специальные, измерительные и радиотехнические. К силовым относятся трансформаторы, передающие потребителю электрическую энергию, к специальным – сварочные и выпрямительные, к измерительным – трансформаторы тока и напряжения, служащие для подключения электроизмерительных приборов, к радиотехническим – маломощные трансформаторы и трансформаторы, работающие на повышенной частоте. Кроме этого, они делятся по роду тока на однофазные и трехфазные и по способу охлаждения – на масляные, сухие и с твердым наполнителем.

Конструкция трансформатора состоит из двух основных частей – магнитопровода и обмоток. Магнитопровод набирается из тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга. Часть магнитопровода, на котором располагается обмотка, называется стержнем, а часть, замыкающая стержни, ярмом. По своему устройству магнитопровод подразделяется на **П**-образный и **Ш**-образный.

Обмотка трансформатора наматывается медным изолированным проводом с дополнительной изоляцией между слоями. Обмотка трансформатора с большим числом витков называется обмоткой высшего напряжения (ВН), а с меньшим – низшего (НН).

Принцип работы трансформатора рассмотрим на примере однофазного трансформатора, схематически представляющего собой магнитопровод с двумя обмотками W_1 и W_2 (рис. 55). При подключении первичной обмотки к источнику синусоидального напряжения $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ по обмотке течет ток $i_1 = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, создающий намагничивающую силу $i_1 w_1$, под действием которой возникает магнитный поток $\Phi = \Phi_m \sin(\omega t + \psi_\Phi)$.

По закону электромагнитной индукции во вторичной цепи индуцируется электродвижущаяся сила

$$e_2 = -\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t} = -W_2 \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = W_2 \Phi_m \omega \cos(\omega t + \psi_\Phi) =$$

$$= E_{2m} \sin(\omega t + \psi_\Phi - \frac{\pi}{2}) .$$

ЭДС отстает от магнитного потока на угол 90°, а $E_{2m} = W_2 \Phi_m \omega$.

Действующее значение $E_2 = E_{2m} / \sqrt{2} = W_2 \Phi_m 2\pi f / \sqrt{2}$, где f – частота сети; $E_2 = 4{,}44\, W_2 \Phi_m f$. Аналогичная ЭДС возни-

кает и в первичной обмотке, так как магнитный поток пронизывает витки и первичной обмотки. Поэтому отношение E_1 / E_2 будет определять коэффициент трансформации по напряжению: если $K_{тр} > 1$, $E_1 > E_2$ – трансформатор понижающий; $K_{тр} < 1$, $E_1 < E_2$ – повышающий; $K_{тр} = 1$, $E_1 = E_2$ – разделительный.

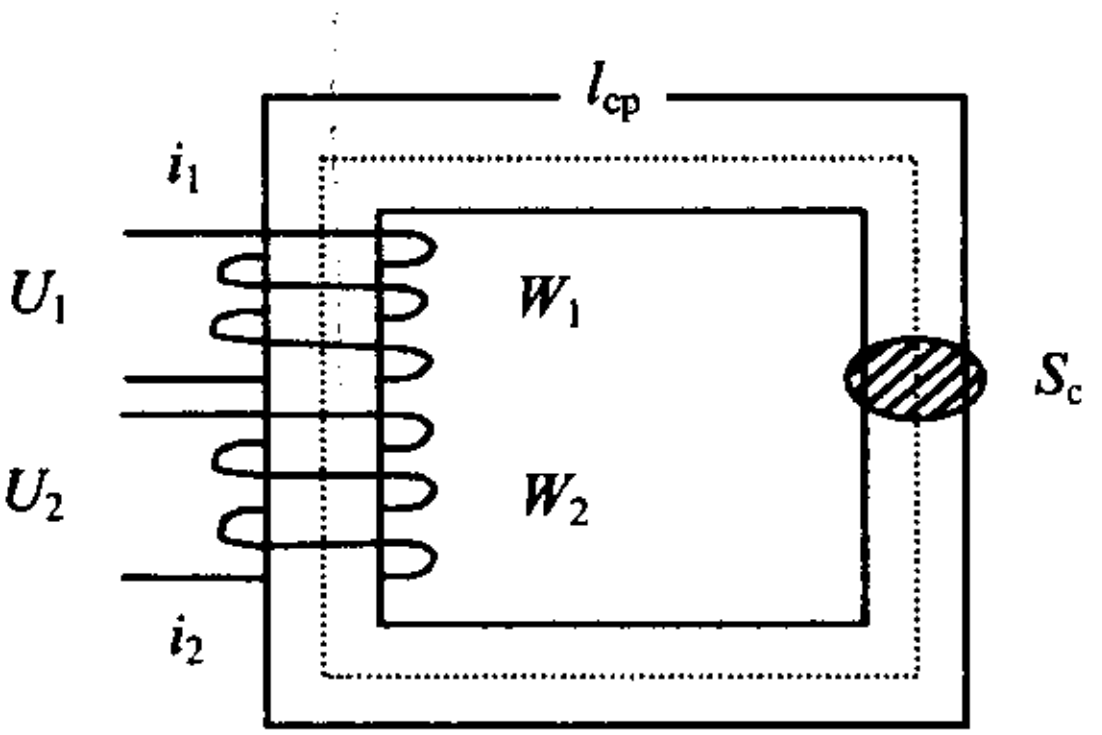


Рис. 55. Упрощенная схема
однофазного трансформатора

Изображение трансформатора на электрической схеме приведено на рис. 56.

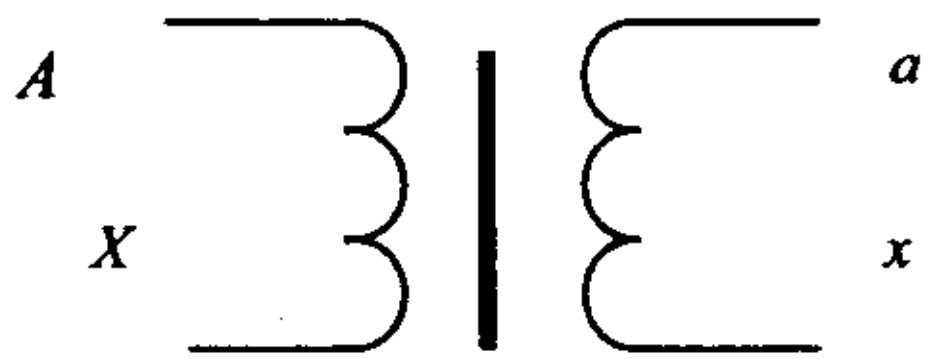


Рис. 56. Изображение
трансформатора на схемах

В работе трансформатора можно выделить три режима: *холостого хода*, когда вторичная обмотка разомкнута, *короткого замыкания*, когда вторичная обмотка замкнута накоротко, и *рабочий режим* под нагрузкой.

В режиме холостого хода $I_2 = 0$, $U_{2x} = E_2$, ток в первичной обмотке $I_{10} = U_1/Z_{10}$, сопротивление $Z_{10} = R_{10} + jX_{10}$. Ток I_{10} составляет 3-10 % номинального (рабочего) тока трансформатора $I_{1н}$.

Ввиду малости первичного тока потери мощности в первичной катушке составляют не более одного процента от номинальной мощности трансформатора и их можно принять равными нулю так же, как и во вторичной $P_{10} \to 0$, $P_2 = 0$. В режиме холостого хода потери мощности наблюдаются только в магнитопроводе и связаны с перемагничиванием и вихревыми токами, определяемыми магнитным материалом $P_{10} = P_{ст} = P_в + P_г$.

Если первичное напряжение не изменяется, то потери в стали постоянны и пропорциональны значению магнитной индукции B в степени угла магнитного запаздывания $-\alpha$. Значение угла составляет 5–10 электрических градусов.

В этом случае $K_{тр} = W_1/W_2 = E_1/E_2 \approx U_{10}/U_{20}$; $I_{10}R_1$ и $I_{10}X_1 << E_1$, тогда параметры холостого хода определяют параметры магнитной системы:

$$R_м = \frac{\Delta P_{10}}{I_{10}}; \; Z_м = \frac{U_{10}}{I_{10}}; \; X_м = \sqrt{Z^2_м - R^2_м}\,.$$

Векторная диаграмма в режиме холостого хода (рис. 57) может быть построена на основании уравнения для первичной обмотки:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + I_{1o}(R_1 + jX_1)\,.$$

Режим короткого замыкания для трансформатора является аварийным, так как при $U_2 = 0$ и $Z_н = 0$ ток в первичной обмотке будет в 15–20 раз больше тока номинального рабочего режима. Поэтому опыт короткого замыкания производят только с целью определения параметров первичной и вторич-

ной обмоток при $U_{1к} << U_{1н}$.Опыт производят при условии $I_{2к} = I_{2н}$, тогда $I_{1к} = I_{1н}$ и $U_{1к} << U_{1н}$. Напряжение короткого замыкания для первичной обмотки задается в паспортных данных трансформатора в процентах от номинального напряжения $U_{1к} = (U_{1к} / U_{1н}) \cdot 100\,\%$ и составляет примерно 5 % для трансформаторов с масляным охлаждением и 2–2,5 % для трансформаторов с воздушным охлаждением.

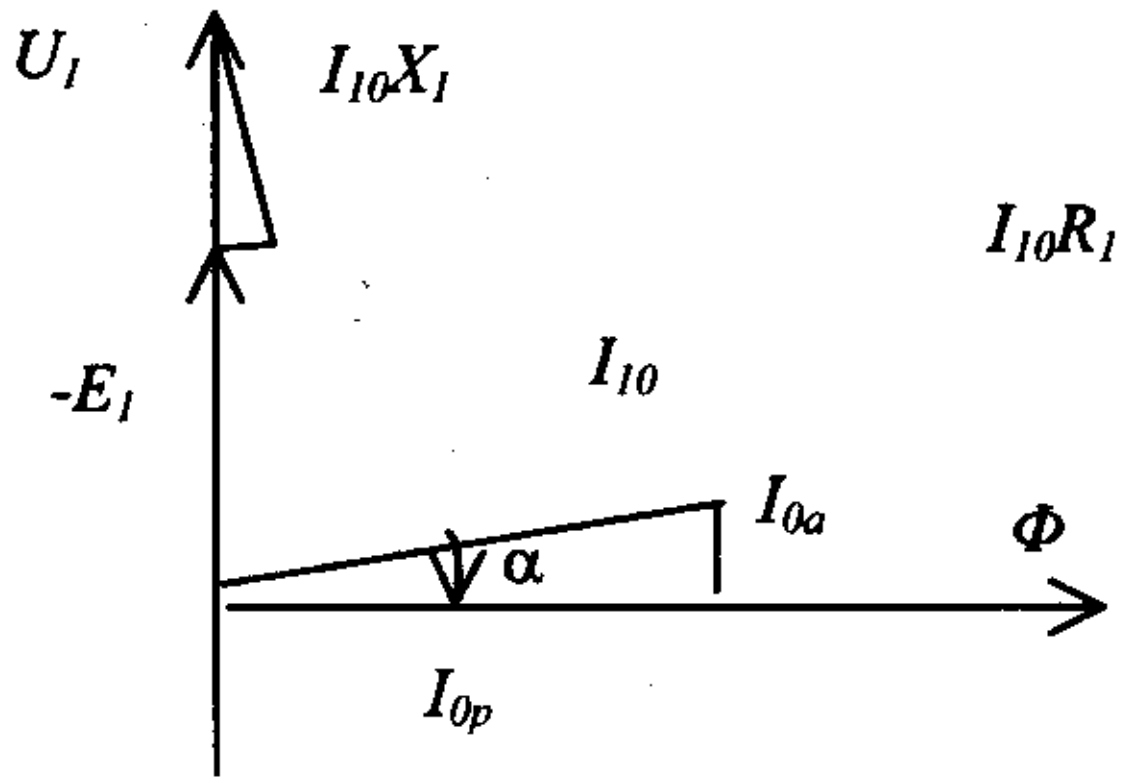


Рис. 57. Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода

Так как напряжение короткого замыкания в первичной обмотке во много раз меньше номинального, то $U_1 \cong 4{,}44 W_1 \Phi_m f$ и $\Phi_{mк.з} << \Phi_{mн}$. Потери в стали будут стремиться к нулю.

Мощность при коротком замыкании рассеивается только в обмотках трансформатора и идет на нагрев меди в них,

$$P_{кз} = P_{мн} = P_{м1н} + P_{м2н} = I_{1н}^2 R_1 + I_{2н}^2 R_2 = I_{1н}^2 R_{к.з}.$$

Общее сопротивление короткого замыкания $Z_{к.з}$ определится из отношения $U_{1к} = I_{1н} R_{к.з} = P_{к.з} / I_{1н}$; $\cos\varphi = R_{к.з} / Z_{к.з}$; $K_{тр} \approx I_{2н} / I_{1н}$.

Векторная диаграмма трансформатора в режиме короткого замыкания (рис. 58) имеет вид в соответствии с уравнением: $\dot{U}_{1кз} = \dot{I}_{1н} Z_{кз} + \dot{I}_{1н}(R_{кз} + jX_{кз})$.

Для составления схемы замещения и удобства расчета рабочих режимов используют метод приведения параметров вторичной обмотки трансформатора к первичной. Тогда $W_1 = W'_2$, где W'_2 – число витков обмотки приведенного трансформатора; $W'_2 = K_{тр} W_2$; $E'_2 = E_2 K_{тр}$; $U'_2 = U_2 K_{тр}$.

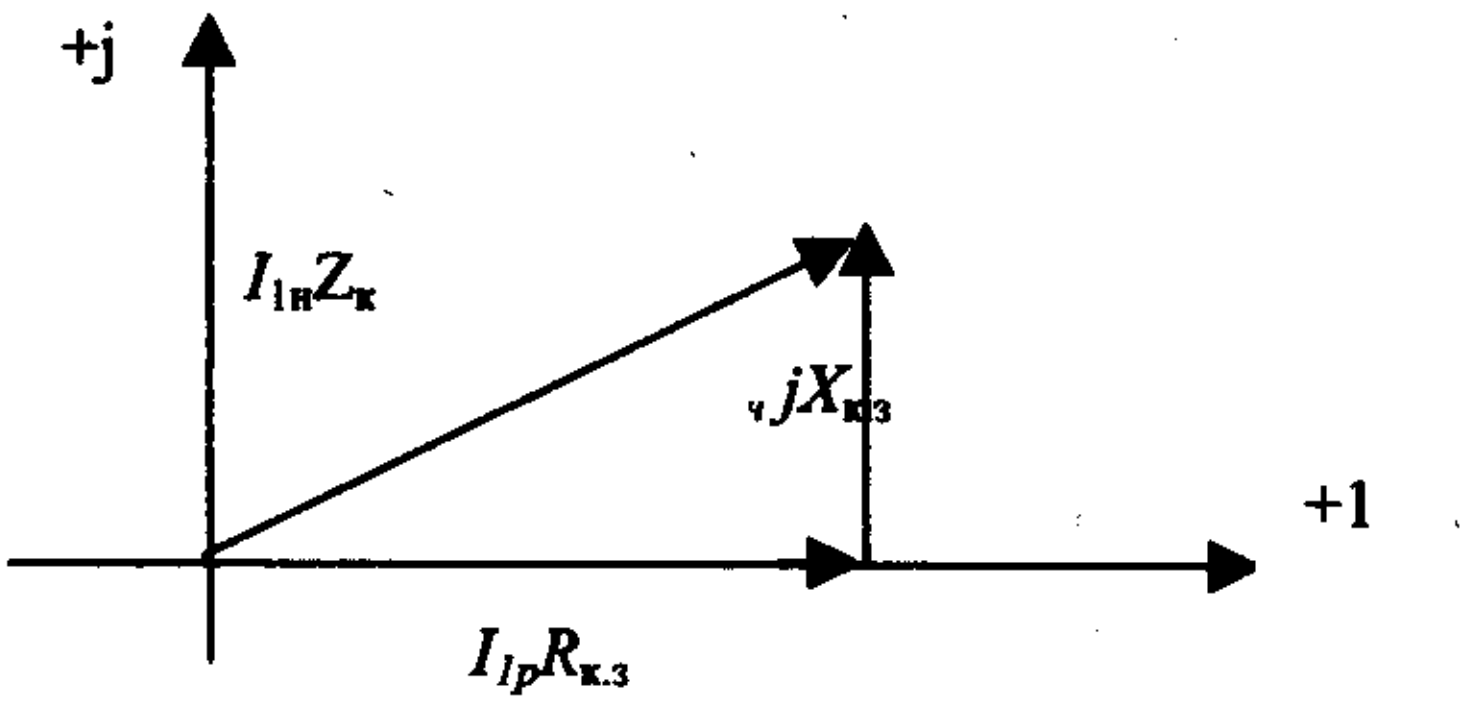


Рис. 58. Векторная диаграмма трансформатора в режиме короткого замыкания

Условием приведения является постоянство энергетических характеристик (мощности и потерь) $S_2 = S_2$ и $P_{м2} = P'_{м2}$. Тогда $I'_2 = I_2(1/K_{тр})$; $R'_2 = R_2 K_{тр}^2$; $X'_2 = X_2 K_{тр}^2$ и $Z'_2 = Z_2 K_{тр}^2$.

Для расчетов режимов работы трансформатора используют Т-образную (рис. 59а) и Г-образную (рис. 59б) схемы замещения. Уравнения цепи для Т-схемы имеют вид:

$$\dot{I} = \dot{I}_{1o} - \dot{I}_2;$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + I_{1o}(R_1 + jX_1);$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(R_2 + jX_2).$$

Рабочие свойства трансформатора в нагрузочном режиме характеризуются зависимостями вторичного напряжения U_2 от тока во вторичной обмотке I_2 и КПД от коэффициента загрузки β.

Зависимость напряжения от тока называется нагрузочной или внешней характеристикой (рис. 60а). Кривая 1 (см. рис. 60а) соответствует режиму емкостной нагрузки, cosφ < 1, кривая 2 – активной нагрузке, cosφ = 0, кривая 3 – индуктивной нагрузке, cosφ < 1.

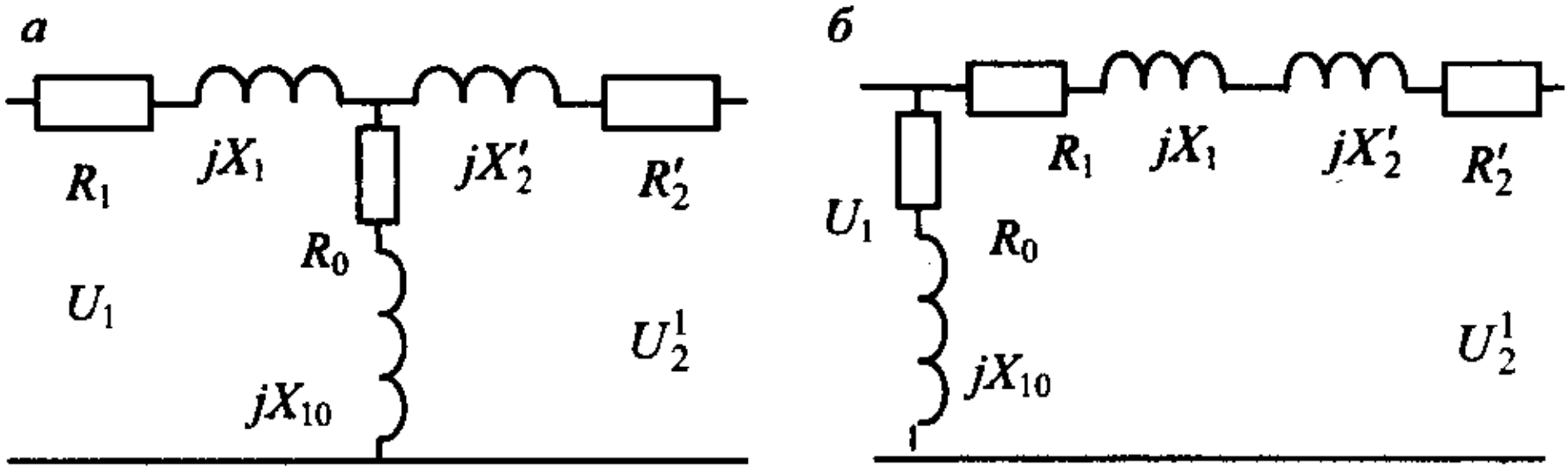


Рис. 59. Схемы замещения трансформатора

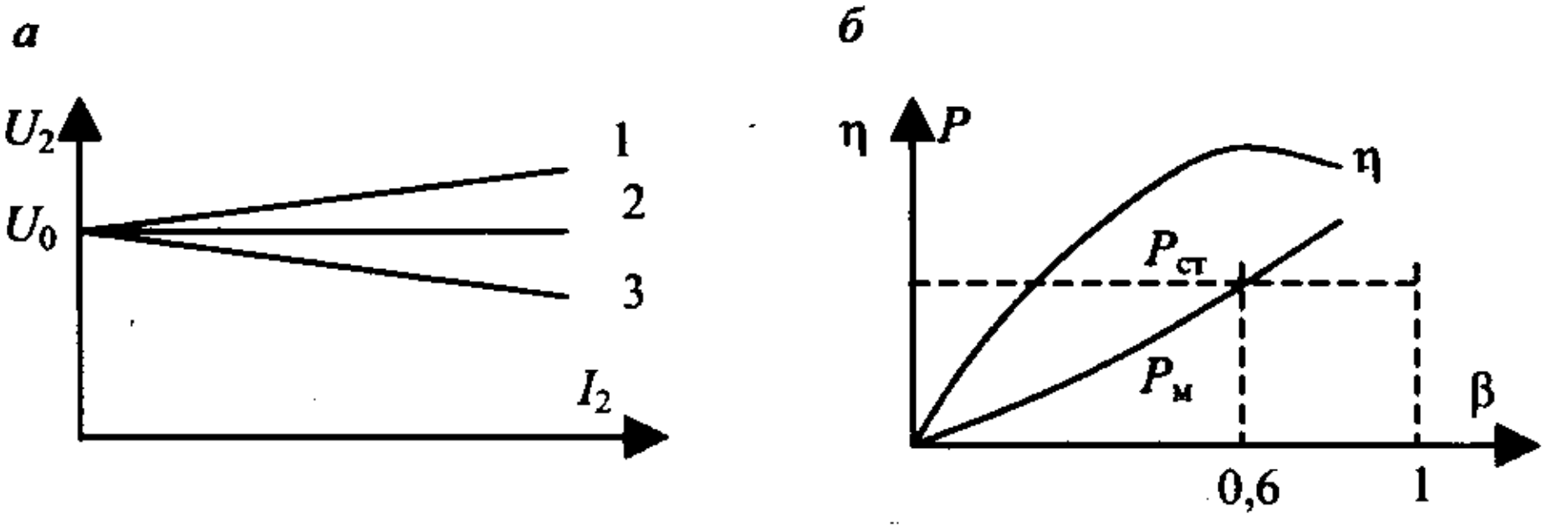


Рис. 60. Нагрузочные (*а*) и рабочие (*б*) характеристики трансформатора

Максимальный коэффициент полезного действия трансформатора составляет 0,98 и находится из соотношения полезной мощности на нагрузке к мощности, потребляемой из сети:

$$\eta = P_2/P_1,$$

$$P_1 = P_2 + P_{хх} + P_{к.з};\quad P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi = \beta S_н \cos\varphi_2 ,$$

где $\beta = I_2/I_{2н}$ – коэффициент загрузки трансформатора; S – полная мощность трансформатора.

Из графика (рис. 60б) видно, что потери в стали $P_{ст}$ не зависят от нагрузки и являются постоянными. Потери в меди $P_м$ обмоток растут и изменяются по нелинейному закону. Коэффициент полезного действия имеет максимальное значение при равенстве указанных потерь и коэффициенте загрузки, равном 0,6.

2. АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Асинхронный двигатель наиболее распространен в качестве электропривода различных механизмов благодаря своей простоте и надежности. Более 60 % всей вырабатываемой в мире энергии преобразуется в механическую, в основном, с помощью асинхронных двигателей. Созданы они были 100 лет назад русским ученым М.О.Доливо-Добровольским. В настоящее время по международному стандарту разработана единая унифицированная серия асинхронных двигателей АИ и 5А. Мощность двигателей колеблется от десятков ватт до сотен киловатт.

Асинхронный двигатель изготавливается в однофазном, двухфазном и трехфазном исполнении.

Асинхронный двигатель состоит из статора и ротора. Статор представляет собой литой корпус (стальной или чугунный) цилиндрической формы. Внутри статора располагается магнитопровод с вырубленными пазами, в которые укладывается статорная обмотка. Концы обмоток выводятся в клеммную коробку и могут быть соединены как треугольником, так и звездой. Корпус статора с торцов закрыт подшипниковыми щитами, в которые запрессовываются подшипники вала ротора. Ротор состоит из стального вала с напрессованным на него магнитопроводом.

По конструкции роторов двигатели делятся на две группы. Первая – с короткозамкнутым ротором и вторая – с фазным. У двигателя с короткозамкнутым ротором в пазы заливаются алюминиевые стержни и накоротко замыкаются по торцам. У фазового ротора имеются три обмотки, соединенные в звезду. Выводы обмоток присоединены к кольцам, закрепленным на валу. К кольцам при пуске прижимаются неподвижные щетки, к которым подключаются сопротивления. В начальный момент пуска ротор находится в заторможенном состоянии, затем сопротивление уменьшается и двигатель плавно запускается, что позволяет снизить пусковой ток.

К обмоткам статора подводится трехфазное напряжение, а ротор вращается посредством вращающегося магнитного поля, создаваемого системой трехфазного тока.

Рассмотрим вращающееся поле переменного тока трехфазной цепи короткозамкнутого асинхронного двигателя с тремя обмотками, сдвинутыми по окружности на 120° и соединенными звездой (рис. 61).

Обмотки статора питаются симметричным трехфазным напряжением. Начальную фазу тока в обмотке *A-x* принимаем равной нулю. Тогда:

$$i_A = I_m \sin\omega t, \quad i_B = I_m \sin(\omega t - 120°),$$
$$i_C = I_m \sin(\omega t + 120°).$$

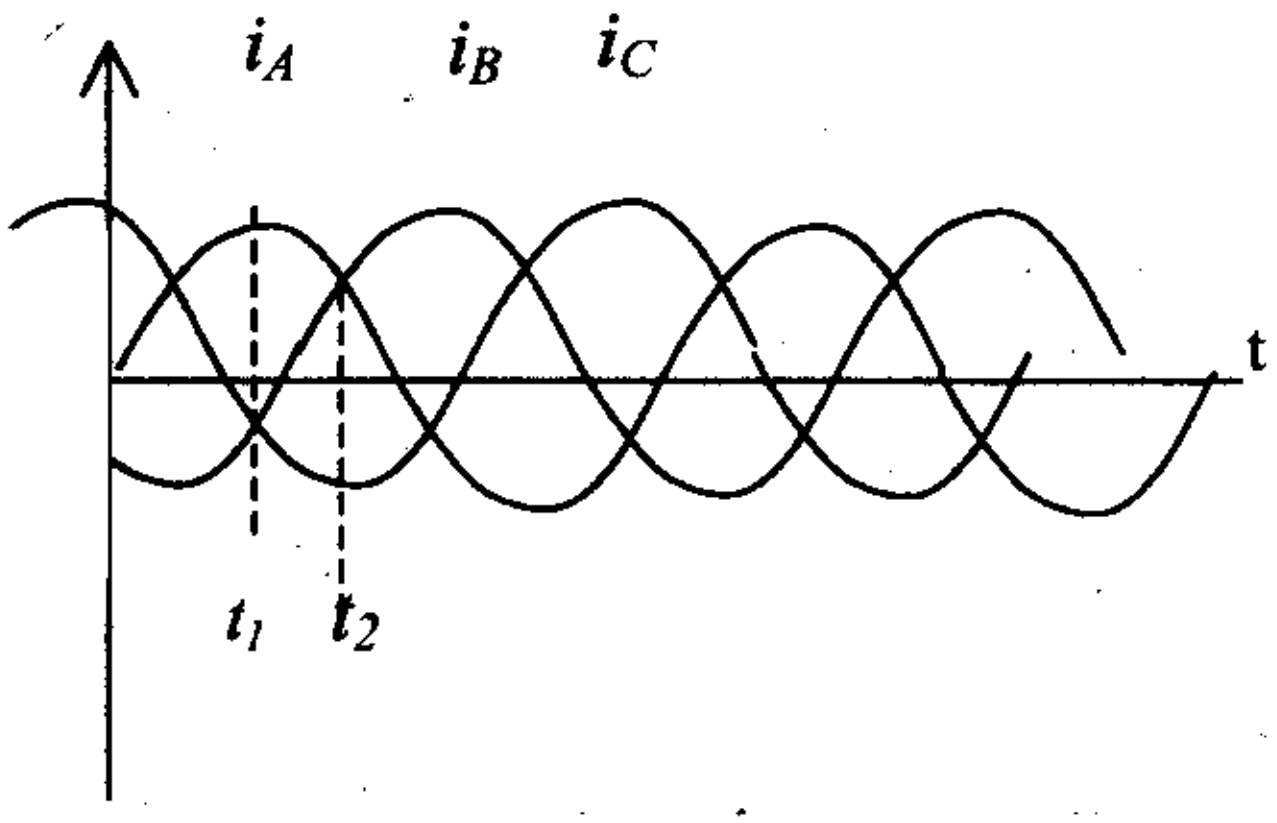


Рис. 61. Трехфазная система токов

В момент времени t_1: $i_A > 0$, i_B, $i_C < 0$. Если ток фазы *A* положителен, т.е. течет от начала к концу, то, пользуясь правилом правоходового винта, можно найти картину распределения магнитного поля для времени t_1.

В момент времени t_2 вектор результирующей магнитной индукции B_m развернется на угол α_1 и далее по часовой стрелке с периодом обращения 360°. Для данного примера угол $\alpha_1 = 60°$.

Таким образом, магнитная индукция представляет собой вращающееся поле с амплитудой $B_{m\,рез} = 3/2B_m \sin(\omega t - \alpha)$ (рис. 62). За период поле делает один оборот, $\alpha_T = \omega T = 2\pi f$, $\omega = 60 f$, (где $f = 50$ Гц), и является промышленной частотой питающего переменного напряжения и тока.

При синусоидальном характере вращающегося поля его скорость n_0 равна отношению $\alpha f/p$ (где p – число пар полюсов). В рассматриваемом примере $p = 1$ и частота вращения равна соответственно 3000 оборотам в минуту. Если число катушек в каждой фазе увеличить в два раза, а сдвиг фаз между токами сохранить 120°, то частота вращения уменьшится в два раза за счет увеличения числа пар полю-

сов. Особенностью короткозамкнутого асинхронного двигателя является наличие постоянной частоты вращения поля статора, определяемой числом пар полюсов.

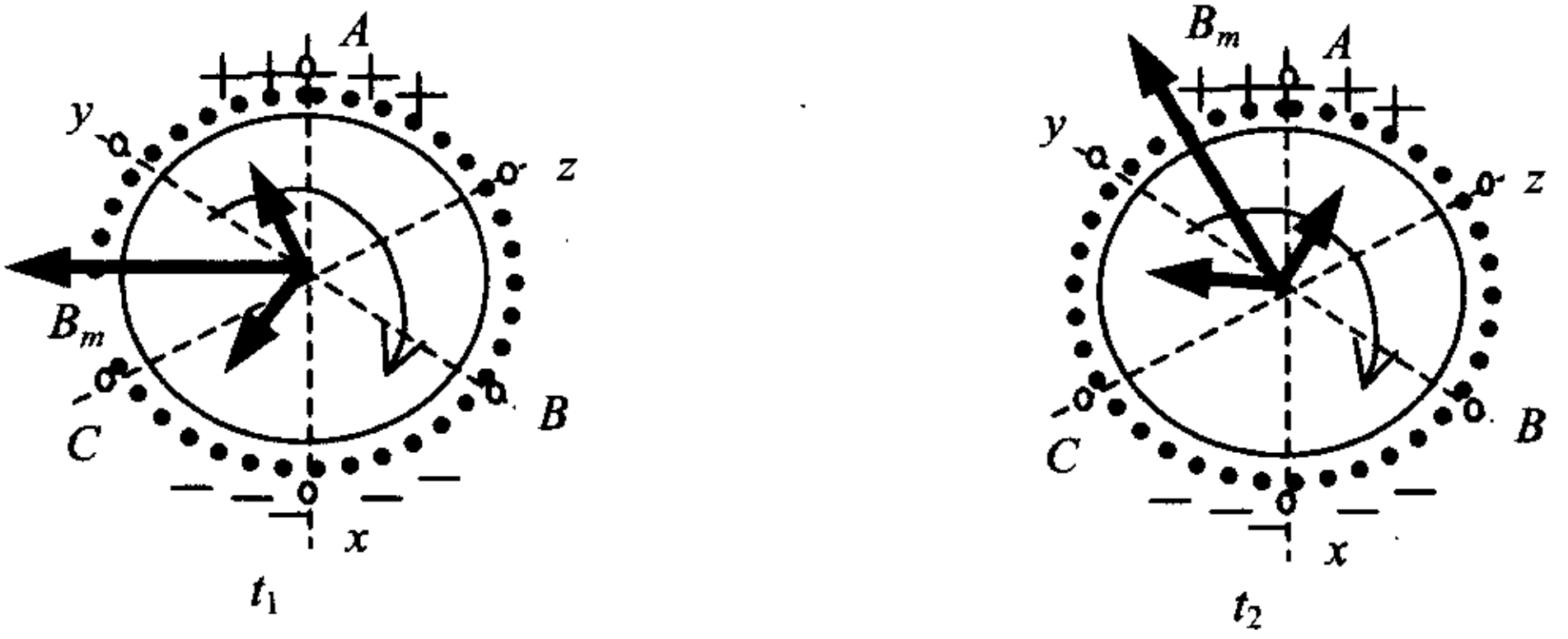


Рис. 62. Получение вращающегося магнитного поля статора

Если поменять местами любые две фазы, то возникнет поле обратной последовательности и ротор начнет вращаться в другую сторону. Еще одной особенностью асинхронных двигателей является разность частоты вращения полей статора n_0 и ротора n, что делает возможным их электромагнитное взаимодействие. При этом поле ротора будет как бы скользить относительно поля статора,

$$s = n_s / \mathrm{n}_0, \quad n_s = n_0 - n,$$

где s – скольжение, при номинальной мощности двигателя скольжение составляет 0,01–0,03.

Основное вращающееся магнитное поле индуцирует в обмотках статора и ротора ЭДС, аналогично трансформатору, так как при разомкнутом роторе асинхронный двигатель представляет собой трансформатор в режиме холостого хода,

$$\mathrm{E}_{1s} = 4{,}44\, f_1 \mathrm{K}_{\text{обм1}} \mathrm{W}_1 \Phi; \quad \mathrm{E}_{2s} = 4{,}44\, f_2 \mathrm{K}_{\text{обм2}} \mathrm{W}_2 \Phi,$$

где индекс 1 относится к параметрам статора, а 2 – к параметрам ротора; $К_{обм}$ – обмоточные коэффициенты, определяемые способом укладки обмоток (петлевая или волновая). $К_{обм} = 0{,}92\text{-}0{,}98$; $E_{2s} = E_2 s$; E_2 – действующее значение ЭДС неподвижного ротора при $s = 1$; $f_2 = f_1 s$.

В асинхронном двигателе кроме основного магнитного потока создаются потоки рассеяния. Один охватывает проводники статора, другой – ротора. Потоки рассеяния характеризуются соответствующими индуктивными сопротивлениями X_1 и X_{2s}.

Уравнения электрического состояния фаз обмоток статора и ротора:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1); \quad \dot{E}_{2s} = \dot{I}_{2s}(R_2 + jX_{2s}).$$

Потери делятся на потери в статоре и в роторе. Потери в статоре состоят из электрических потерь в обмотке $P_{э1}$ и потерь в стали $P_{ст}$, а потери в роторе – из электрических $P_{э2}$ и механических $P_{мех}$ плюс добавочные потери на трение и вентиляцию $P_{доб}$.

$$P_{э1} = 3I_1^2 R_1; \quad P_{э2} = 3I_2^2 R_2';$$

$$P_{доб} = 0{,}005 P_н; \quad P_{мех} = K(n_0 \cdot 10^{-3})^2 (D_1 \cdot 10^{-2})^3,$$

где $K = 2{,}9\text{-}3{,}6$ определяется диаметром статора D_1.

Потери в стали в рабочем режиме во много раз меньше электрических потерь в роторе и ими обычно пренебрегают.

Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя приведена на рис. 63. КПД асинхронного двигателя составляет от 0,75 до 0,95.

Вращающий электромагнитный момент двигателя в соответствии с законом электромагнитных сил

$$M = C_м \Phi I_{2s} \cos\varphi_{2s},$$

где $C_м$ – конструктивная постоянная; φ_{2s} – фазовый сдвиг между током и магнитным потоком.

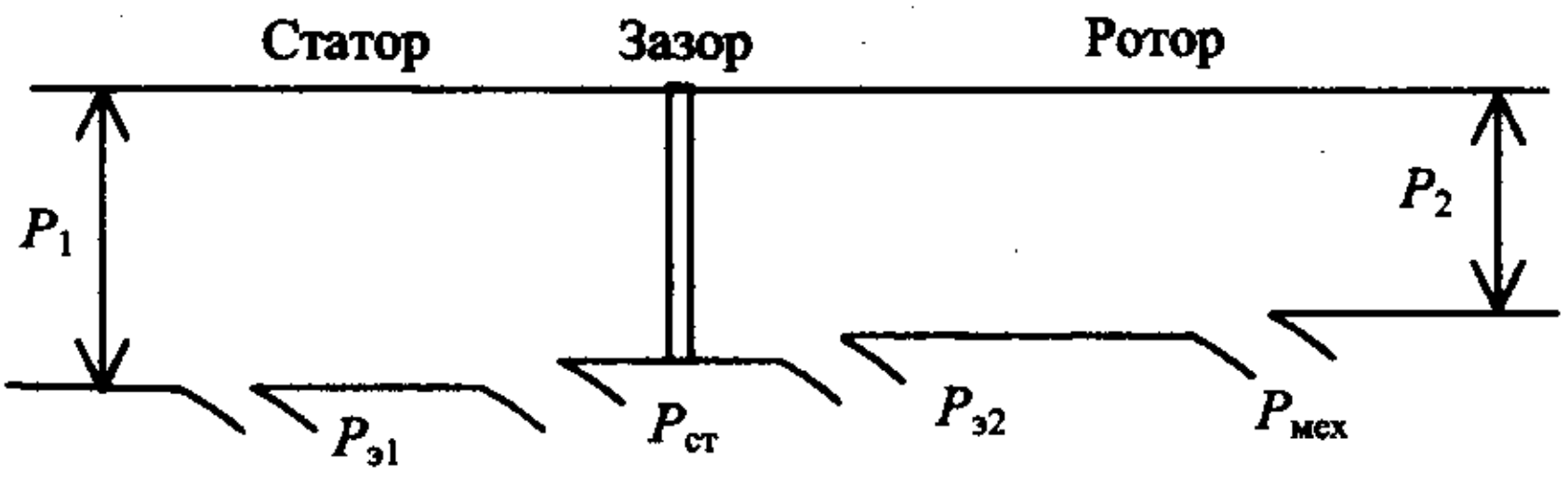


Рис. 63. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Отношение максимального момента M_{max} к номинальному $M_н$ определяет перегрузочную способность двигателя и составляет 2,0–2,2 (дается в каталожных данных). Максимальный момент соответствует критическому скольжению $s_к$, определяемому активными и индуктивными сопротивлениями двигателя, и пропорционален активному сопротивлению цепи ротора.

Рабочий момент двигателя пропорционален *квадрату напряжения*, что необходимо учитывать при включении двигателя в протяженных распределительных сетях. Номинальному моменту соответствует номинальное скольжение, а пусковому – $s_п$.

Зависимость момента двигателя от скольжения $M = f(s)$ приведена на рис. 64.

На участке от 0 до M_{max} двигатель работает в устойчивом режиме, а участок от $s_к$ называется режимом опрокидывания двигателя, при котором двигатель в результате перегрузки останавливается и не может вернуться в рабочий режим без очередного запуска. Пусковые свойства двигателя определяются соотношением пускового момента $M_п$ и номинального, в соответствии с каталожными данными оно

составляет 1,6–1,7. При пуске асинхронного двигателя cosφ очень мал и пусковой ток в обмотке статора может возрастать в 5–7 раз по сравнению с номинальным. Ограничение его осуществляется изменением частоты питающего напряжения для двигателя с короткозамкнутым ротором и увеличением активного сопротивления в цепи ротора для двигателя с фазовым ротором.

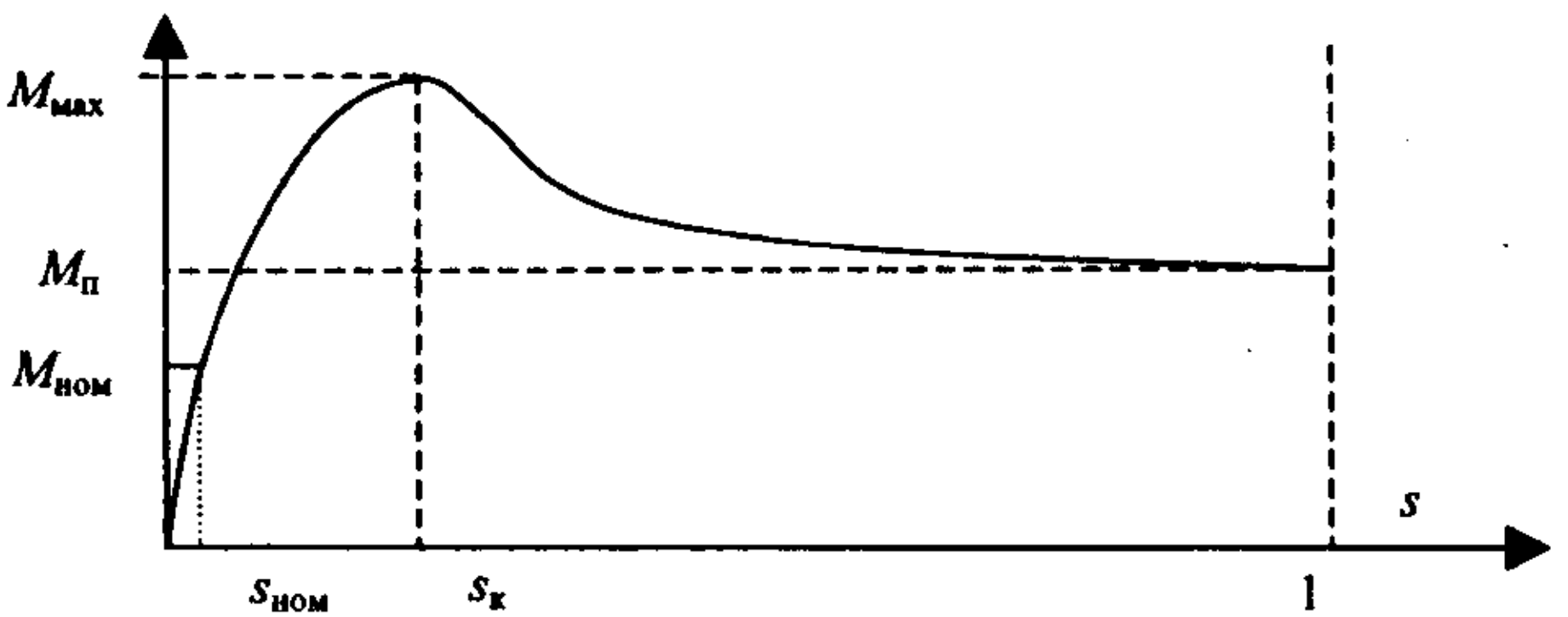


Рис. 64. Зависимость момента двигателя от скольжения

Для механизмов, имеющих тяжелые условия пуска, где желательно использовать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, применяются двигатели с улучшенными пусковыми свойствами: с большим пусковым моментом и меньшим пусковым током, чем у двигателей общего назначения.

Зависимость скорости вращения от нагрузки на валу двигателя называется *механической характеристикой асинхронного двигателя* (рис 65).

Участок АВ механической характеристики соответствует устойчивому режиму работы асинхронного двигателя. Увеличение нагрузки (тормозного момента) ведет к некоторому снижению частоты вращения ротора, что вызывает увеличение вращающего момента. При превышении тор-

мозным моментом критического двигатель останавливается. Точка В на графике соответствует точке критического или *опрокидывающего момента.*

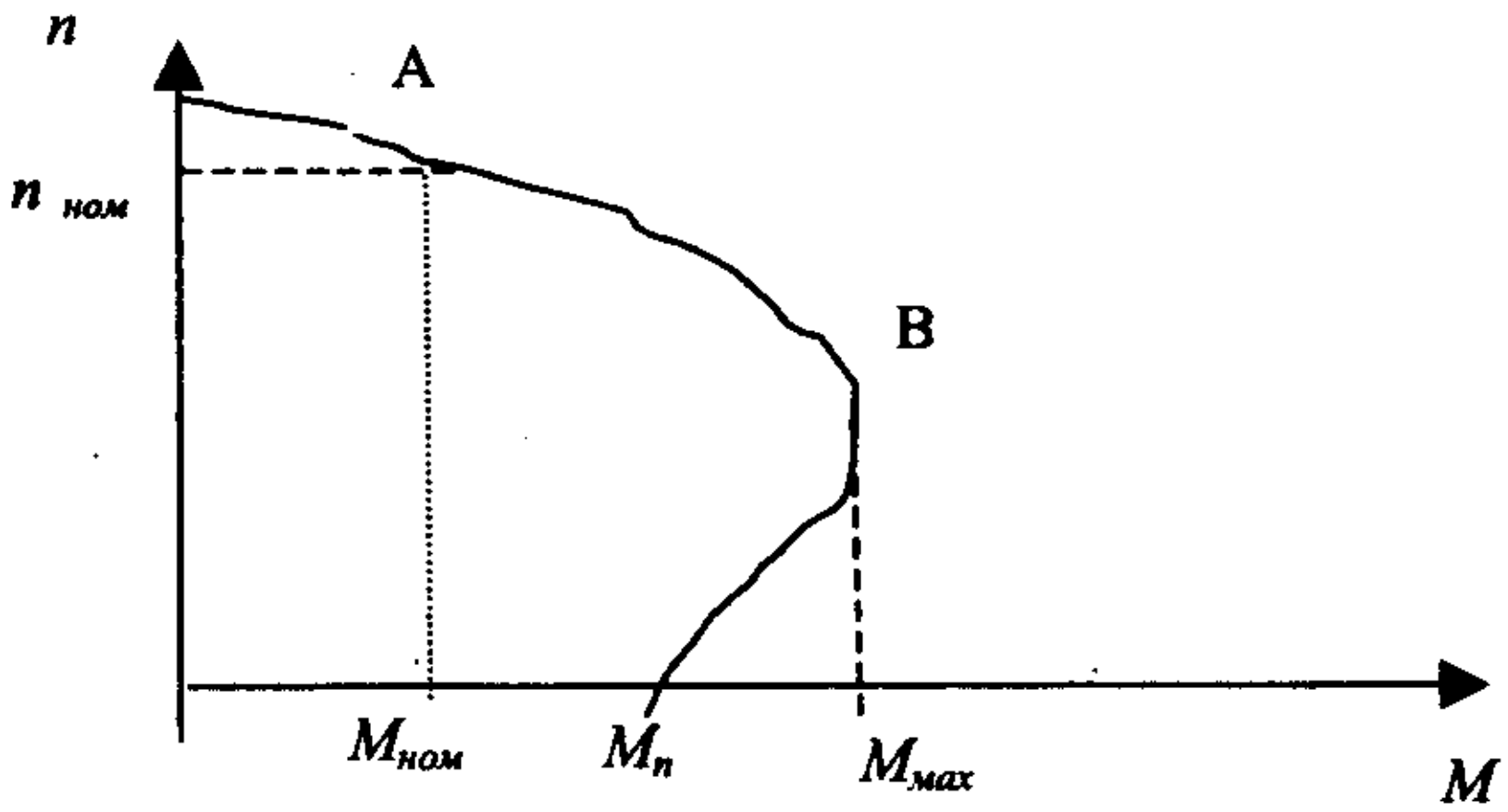


Рис. 65. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Регулирование частоты вращения может быть осуществлено тремя способами: изменением частоты питающего напряжения, переключением числа пар полюсов и изменением скольжения.

Для регулирования частоты вращения двигателей с короткозамкнутым ротором в настоящее время широко используются частотные преобразователи с микропроцессорным управлением.

Тормозные режимы возникают в машине при определенных условиях или создаются искусственно с целью ускорения процесса остановки двигателя. Торможение может быть:

- генераторное с отдачей энергии в сеть,
- противовключением
- динамическое.

Генераторным тормозным режимом называется режим работы двигателя, когда под действием внешнего

момента ротор двигателя вращается в том же направлении, что и магнитное поле, но с большей скоростью.

Тормозной режим противовключения возникает в том случае, когда под действием внешнего момента, приложенного к валу двигателя, ротор вращается в противоположную сторону относительно вращающегося магнитного поля.

Динамический тормозной режим получается при отключении обмотки статора от сети трехфазного тока и подключении ее на время торможения к источнику энергии постоянного тока.

Рабочими характеристиками асинхронного двигателя являются зависимости от мощности на валу P_2 таких параметров, как момент, частота вращения, ток статора, КПД и cosφ (рис. 66).

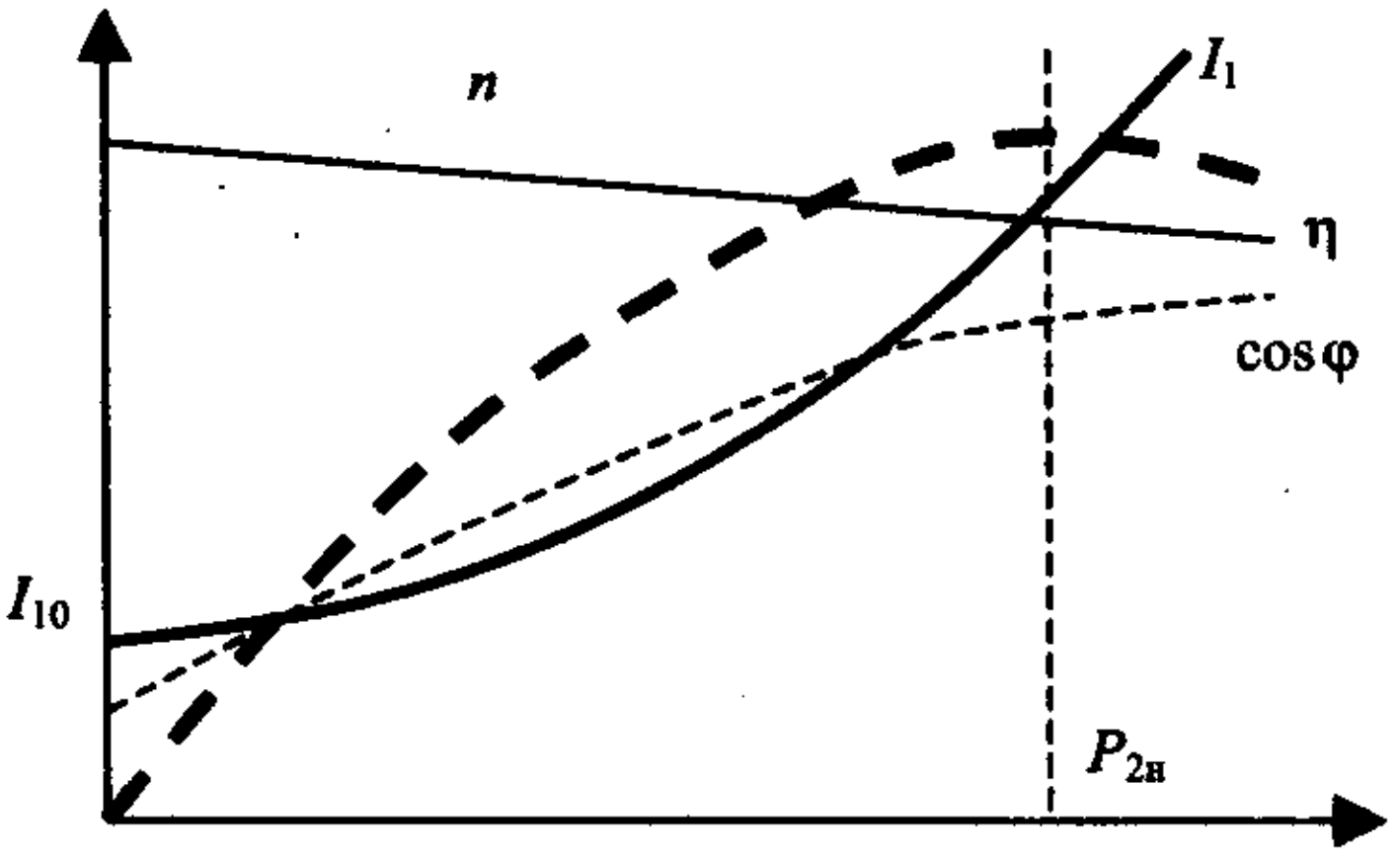


Рис. 66 . Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Анализ характеристик показывает, что частота вращения ротора падает с увеличением нагрузки, а момент пропорционален ей. Ток статора изменяется по нелинейному закону, что связано с магнитной системой двигателя и

при $P_2 = 0$ определяется током холостого хода, составляющего до 40% его номинального значения.

Расчетные формулы для выбора двигателя имеют вид:

$$M = P_2/n; \quad P_1 = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos\varphi; \quad P_2 = \eta P_1.$$

Выбор двигателя по каталогу осуществляется следующим образом. По заданному моменту рабочего механизма и частоте вращения определяется необходимая мощность. После этого определяются условия окружающей среды, выбирается исполнение по типу монтажа и высоте оси рабочего вала двигателя. Зная эти параметры, по каталогу проверяют необходимую перегрузочную способность, КПД, массу и момент инерции.

Для шахтных условий используются двигатели взрывозащищенного исполнения, для крановых механизмов – двигатели с повышенным скольжением и т.д.

В бытовых приборах используются однофазные двигатели. Однофазный двигатель отличается от трехфазного тем, что его статорная обмотка подключается к однофазному источнику питания. Ротор выполняется короткозамкнутым. На статоре размещаются две обмотки, оси которых смещены друг относительно друга на 90 электрических градусов. Одна называется рабочей, а другая – пусковой.

В системах управления используются двигатели, в которых одна из обмоток статора постоянно подключена к сети переменного тока (обмотка возбуждения), а ко второй (обмотка управления) подводится напряжение управления. Такие двигатели относятся к классу микромашин.

Микромашины используются также в информационных системах, где они выполняют функции первичных преобразователей для вычислительных операций в системах автоматики и телемеханики.

Одним из примеров является сельсин, предназначенный для передачи на расстояние угловых перемещений валов, механически не связанных друг с другом. По конструкции сельсины делятся на контактные и бесконтактные. Контактные сельсины выполняются в двух вариантах. В одном обмотка возбуждения располагается на роторе, а трехфазная обмотка, называемая обмоткой синхронизации, в пазах статора. В другом варианте наоборот. При включении обмотки возбуждения сельсина на однофазное напряжение ток создает пульсирующее магнитное поле, которое индуцирует в каждой фазе обмотки синхронизации переменную ЭДС. Действующее значение ЭДС каждой фазы зависит от расположения осей этих фаз относительно оси потока возбуждения.

В простейшем случае схема дистанционной передачи угловых перемещений состоит из двух одинаковых сельсинов, у которых одноименные зажимы обмоток синхронизации соединены проводами линии связи, а на обмотки возбуждения подается напряжение сети. Один из сельсинов называют *сельсин-датчиком*, другой – *сельсин-приемником.*

3. СИНХРОННАЯ МАШИНА

Синхронные машины используются в качестве источников электрической энергии (генераторов), электродвигателей и синхронных компенсаторов.

Синхронные генераторы гидроэлектростанций вращаются с помощью гидротурбин и носят название гидрогенераторов. Кроме электростанций синхронные генераторы находят применение в установках, требующих автономного источника питания.

Синхронные двигатели переменного тока используются с механизмами средней и большой мощности при редких пусках, требующих постоянного рабочего момента. К таким механизмам относятся компрессоры, вентиляторы, насосы и т.д.

Синхронный компенсатор предназначается для улучшения коэффициента мощности электротехнических установок (компенсации индуктивной реактивной мощности).

Конструктивно синхронная машина состоит из статора и ротора. Статор аналогичен статору асинхронной машины, а ротор представляет собой постоянный магнит, поле которого создается обмоткой возбуждения, по которой пропускается постоянный ток. Питание обмотки возбуждения осуществляется через скользящий контакт между контактными кольцами и неподвижными щетками. Особенностью синхронной машины является возможность работы как в режиме двигателя, так и в режиме генератора.

Частота ЭДС переменного тока в синхронной машине не зависит от частоты вращения ротора и числа пар полюсов, $f_1 = pn/60$. Действующее значение ЭДС, индуцируемой в проводниках, $E = 4{,}44 f K_{обм} W \Phi_0$.

Взаимодействие вращающегося поля статора и поля постоянного магнита ротора вызывает появление вращающего момента, вследствие чего ротор вращается в том же направлении, что и поле статора ($n = n_1$). Скольжение синхронной машины равно нулю.

Схема замещения синхронного двигателя и векторная диаграмма имеют вид, приведенный на рис. 67.

На рис. 67 X_c – синхронное индуктивное сопротивление; θ – угол нагрузки

В соответствии со схемой уравнение имеет вид:

$$\dot{U} = \dot{E}_o + jX_c\dot{I}\,.$$

Характеристика зависимости момента двигателя от угла нагрузки имеет вид синусоиды и выражает работу как двигательного, так и генераторного режима.

Областью устойчивой работы двигателя является участок $\theta = 0\text{-}\pi/2$, где выполняется условие положительности производной момента по углу нагрузки. С целью получения запаса устойчивости за номинальный момент синхронного двигателя принимается $M_н = 0{,}5M_н$, которому соответствует угол $\theta = 30°$.

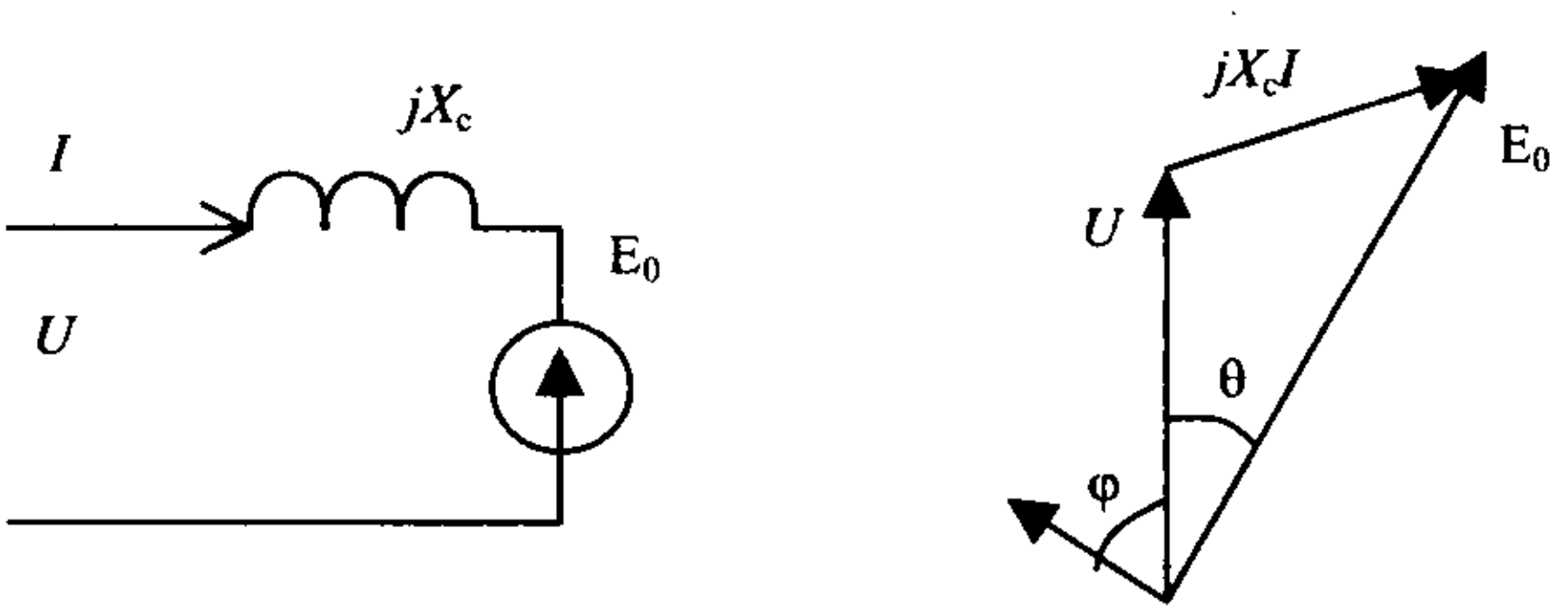


Рис. 67. Схема замещения и векторная диаграмма синхронного двигателя

Важным преимуществом синхронного двигателя является способность регулировать потребляемую из сети реактивную мощность путем изменения тока возбуждения.

Рассмотрим зависимости тока статора двигателя от тока возбуждения $I = f(I_в)$ (рис. 68).

При перевозбуждении $I_{дв}$ имеет емкостной характер, а при недовозбуждении – индуктивный. Таким образом, синхронный двигатель может быть использован в качестве компенсирующего устройства для регулирования реактивной мощности.

Зависимости тока статора от тока возбуждения при различных мощностях называются U-образными характеристиками. Характеристики имеют границу устойчивости, вдоль которой уменьшение тока возбуждения приведет к опрокидыванию двигателя или «выпаданию из синхронизма». Граница устойчивости соответствует режиму $M_{дв} = M_{ген}$.

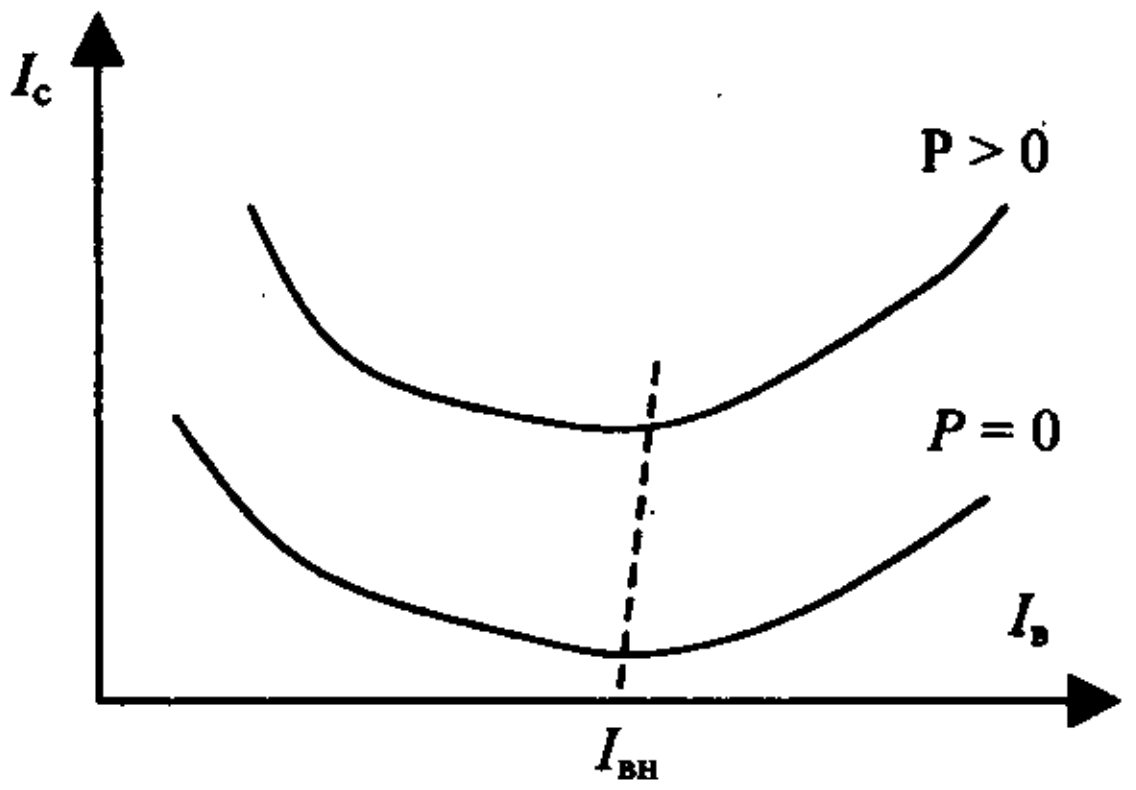


Рис. 68. V-образные характеристики синхронного двигателя

Недостатком синхронного двигателя является необходимость возбудителя для запуска, так как при равенстве синхронной частоты вращения поля статора и частоты вращения поля ротора пусковой момент отсутствует. Наиболее распространен асинхронный запуск. В этом случае на полюсах двигателя размещается короткозамкнутая обмотка. При пуске статор подключают к сети. Возникающее магнитное поле индуцирует в этой обмотке ЭДС и токи, в результате чего создается электромагнитный момент, как и у асинхронного двигателя. При этом обмотка возбуждения отключена от источника постоянного тока, но замкнута на активное сопротивление с целью уменьшения напряжения на ее зажимах при пуске. При достижении двигателем частоты вращения, близкой к синхронной, обмотка возбуждения пе-

реключается на источник постоянного тока. В этом случае говорят, что двигатель «втянулся в синхронизм».

Так как выражения электромагнитной мощности и момента у синхронной машины аналогичны и в двигательном и в генераторном режимах, то достаточно рассмотреть генераторный режим синхронной машины.

При работе синхронной машины в качестве генератора можно регулировать магнитный поток Φ_0 и пропорциональную ему E_0, изменяя ток возбуждения. Зависимость $E_0 = f(I_в)$ (рис. 69) называется характеристикой холостого хода генератора. Остаточная ЭДС у синхронного генератора равна 5–10 В.

При включении статора на сопротивление нагрузки по обмотке пойдет ток, который создаст поле, вращающееся относительно статора и неподвижное относительно поля возбуждения основного потока ротора Φ_0. Совпадение токов в проводниках по фазе с ЭДС будет только при активной нагрузке, при индуктивной ток отстает на 90°, при емкостной опережает на 90°. Рост напряжения при емкостной нагрузке связан с подмагничивающим действием реакции якоря (статора), а снижение при индуктивной нагрузке – размагничиванием.

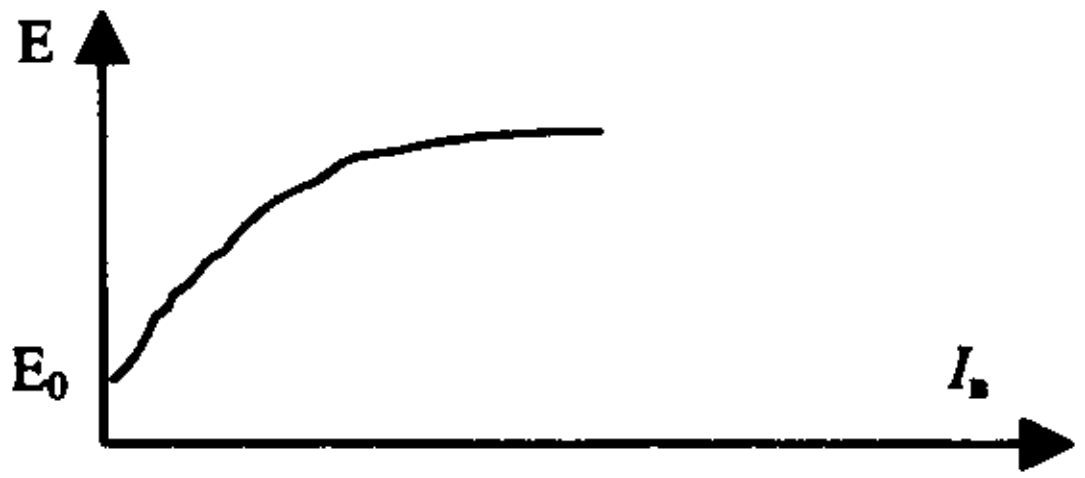


Рис. 69. Характеристика холостого хода генератора

Упрощенное уравнение электрического состояния одной фазы синхронного генератора без учета поля рассеяния якоря Φ_σ имеет вид:

$$\dot{U} = \dot{E}_o + jX_c\dot{I},$$

где E_0 – ЭДС холостого хода.

Данному выражению соответствуют схема замещения и векторная диаграмма (рис. 70). Из диаграммы следует, что E_0 соответствует магнитному потоку ротора Φ_0, а напряжение U – результирующему магнитному потоку Φ. Отсюда следует, что в генераторном режиме Φ_0 опережает Φ на угол θ.

Основной режим работы генератора нагрузочный. Пренебрегая потерями в сопротивлении обмотки якоря, получим из векторной диаграммы значение $\cos\psi$ между напряжением и E_0:

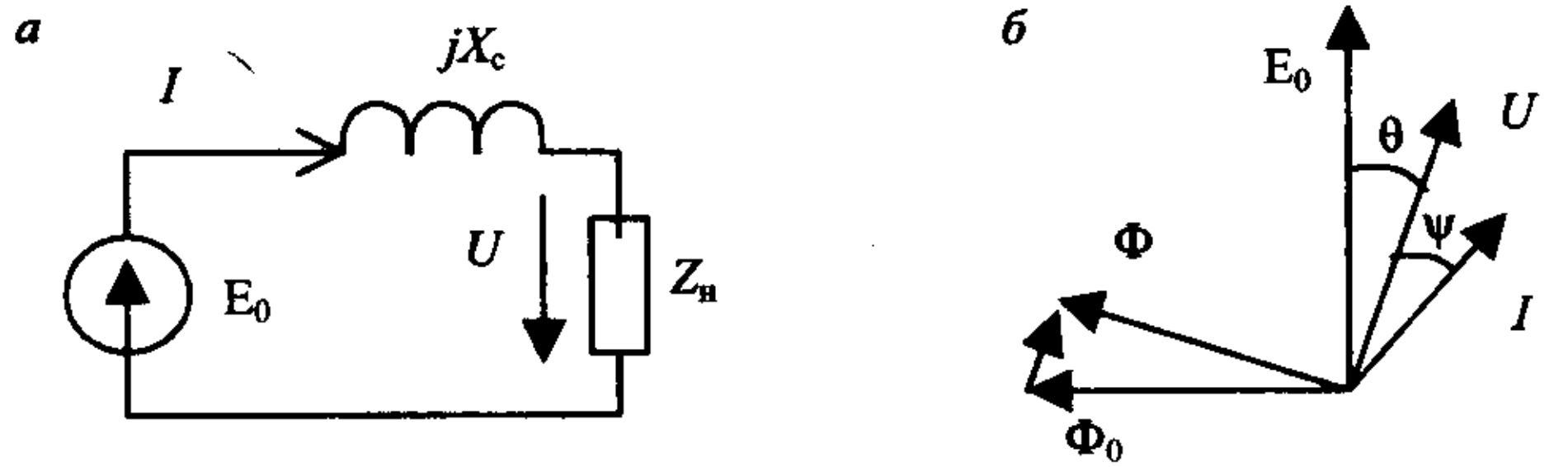


Рис. 70. Схема замещения (*а*) и векторная диаграмма (*б*) синхронного генератора

$$\cos\psi = U\sin\theta / X_c I.$$

С учетом этого выражения получим зависимость для определения электромагнитной мощности:

$$P_{эм} \cong P = 3E_0 I\cos\psi = 3(U/X_c)E_0\sin\theta.$$

Момент равен отношению мощности к частоте вращения:

$$M = P/\omega = (3UE_0/\omega X_c)\sin\theta.$$

Выражение в скобках соответствует максимальному моменту M_{max}, причем $M_{max} \equiv U$.

Зависимости электромагнитной мощности и момента синхронной машины при различных токах возбуждения показаны на рис. 71.

В синхронном генераторе с активно-реактивной нагрузкой при определении электромагнитного момента необходимо учитывать фазовый сдвиг тока относительно магнитного потока или напряжения. Тогда выражение для момента $M = C_м Φ i \cos φ$.

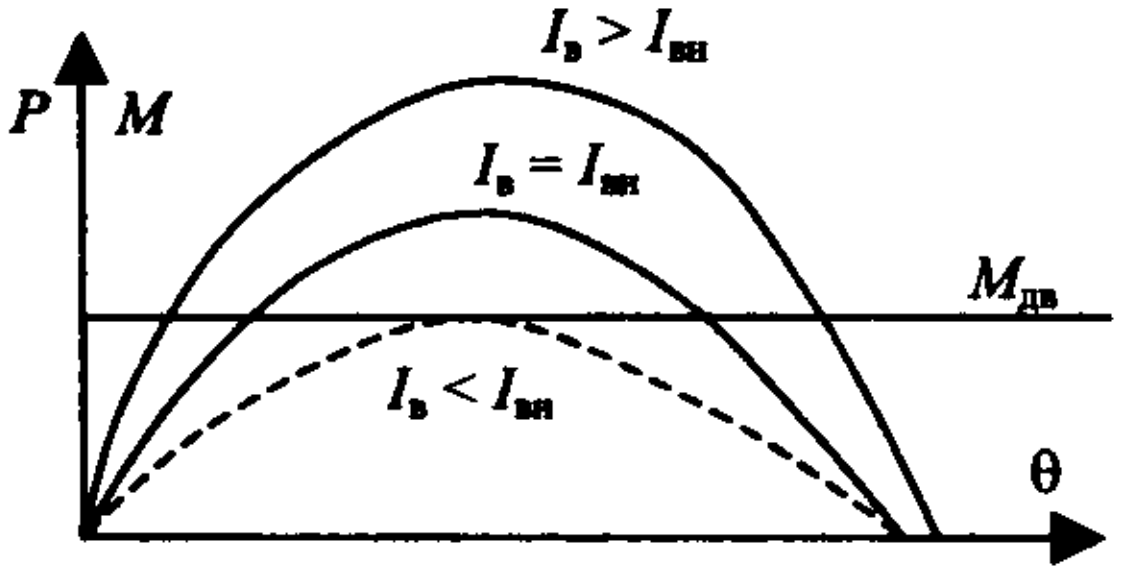


Рис. 71. Зависимость мощности и момента от угла θ

Синхронный генератор в качестве источника электрической энергии переменного тока включают в распределительную сеть параллельно. При параллельной работе генератора с системой большой мощности его частота и напряжение, а также угловая скорость должны оставаться неизменными при любых изменениях как нагрузки, так и тока возбуждения и момента первичного двигателя. Активную мощность, отдаваемую генератором в сеть, можно регулировать только изменением момента первичного двигателя, а реактивную – изменением тока возбуждения.

4. МАШИНА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрические машины постоянного тока предназначены для преобразования электрической энергии как в механическую, так и обратно. Поэтому в первом случае они называются двигателем, а во втором – генератором.

Устройство генераторов и двигателей одинаково. Неподвижная часть машины, называемая статором, состоит из

массивного стального корпуса, к которому крепятся главные и дополнительные полюсы. Главные полюсы собираются из стальных листов, что обеспечивает уменьшение потерь мощности от вихревых токов, а дополнительные изготавливаются массивными. На главных полюсах размещаются катушки обмоток возбуждения. На дополнительных полюсах – обмотки дополнительных полюсов.

Схема замещения машины постоянного тока в соответствии с уравнением $E = U \pm IR_я$ показана на рис. 72.

В режиме генератора электромагнитный момент $M_{эм}$ противодействует вращению. Он уравновешивается моментом приводного двигателя $M_{дв}$ (турбина, дизель и т.п.). В режиме двигателя момент действует по направлению вращения. При равномерном вращении ему противодействует момент сопротивления M_c приводимого в движение механизма (станок, вентилятор, насос и т.п.).

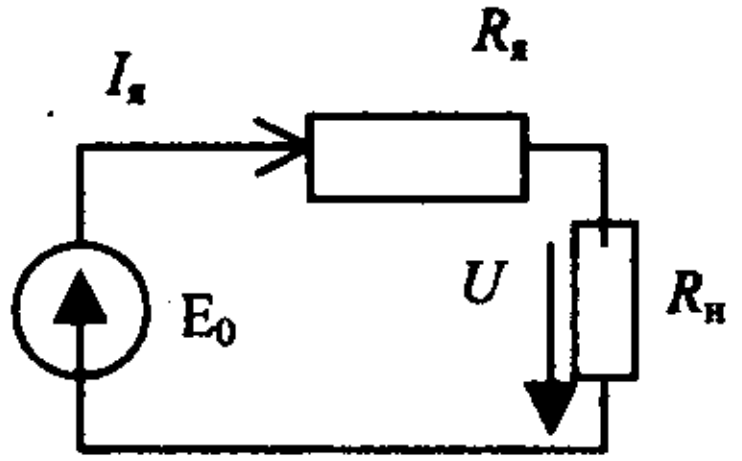


Рис. 72. Схема замещения машины постоянного тока

Основное магнитное поле в электрических машинах называется полем возбуждения и создается с помощью обмоток возбуждения, получающих питание от источников постоянного тока. Преобразование электрической энергии (рис. 73) возможно в электрических машинах лишь при наличии силового взаимодействия между магнитными полями статора и ротора, последние должны быть неподвижны относительно друг друга при любой частоте вращения ротора. Это достигается с помощью коллекторно-щеточного механизма.

Коллектор представляет собой цилиндр, состоящий из ряда изолированных друг от друга и корпуса медных

пластин, по которым скользят угольные щетки. Число пластин равно числу секций обмотки, которая укладывается в пазы. В машинах постоянного тока ЭДС:

$$E = C_e \Phi n,$$

где $C_e = pN / 60a$ – конструктивная постоянная; p – число пар полюсов; N – число проводников; a – число параллельных ветвей соединенных проводников (обмотки бывают двух- и трехслойные).

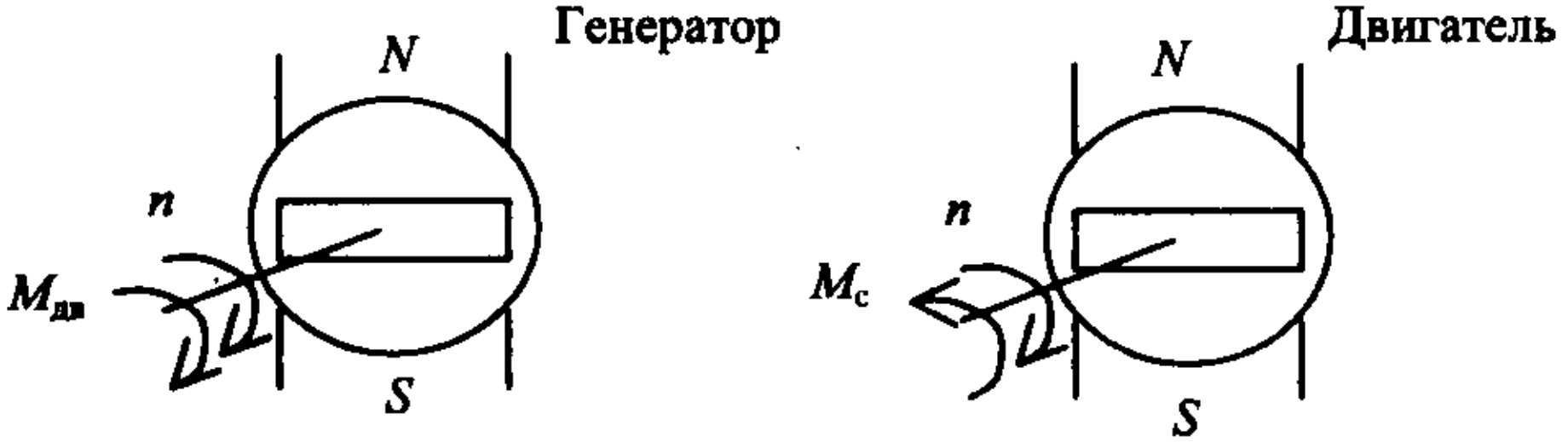


Рис. 73. Схемы преобразования энергии в машинах постоянного тока

В режиме генератора на холостом ходу поток Ф и соответствующая ему ЭДС зависят только от тока возбуждения. Зависимость $E = f(I_в)$ (рис. 74) называется характеристикой холостого хода. Если характеристику снимать, сначала увеличивая ток возбуждения, а затем уменьшая его, то получится петля гистерезиса. Обычно в каталогах дается средняя линия.

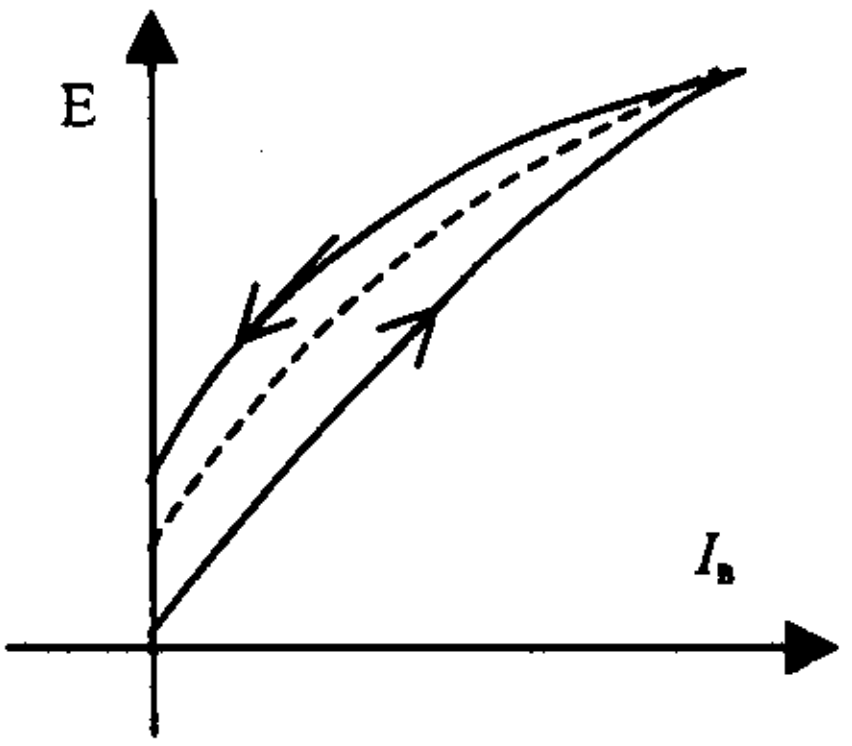


Рис. 74. Характеристика холостого хода

При отсутствии тока возбуждения в якоре наводится ЭДС, равная примерно 2–3% от напряжения якоря.

В режиме нагрузки якорь нагружается на внешнее сопротивление проводника, ток в котором совпадает по направлению с ЭДС. Ток обмотки якоря создает свое поле, воздействующее на поле собственно машины. Данное явление называется реакцией якоря. Результирующий магнитный поток машины Ф равен сумме магнитного потока цепи возбуждения $Ф_в$ и цепи якоря $Ф_я$. При больших значениях тока якоря вследствие насыщения части полюсов результирующий магнитный поток несколько уменьшается. В этом случае реакция якоря называется поперечной.

Электромагнитный момент определяется из выражения

$$M = 0{,}5D(pNIФ/\pi a) = C_м Ф I, \quad C_м = DpN / \pi a ,$$

где D – диаметр якоря; $C_м$ – постоянная по моменту.

Внешняя характеристика генератора $U_я = f(I_я)$ приведена на рис. 75.

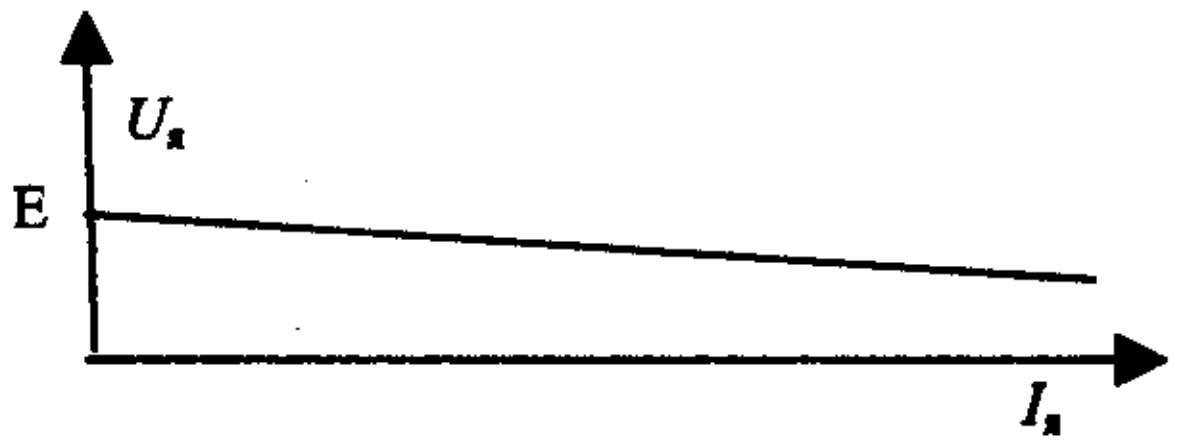


Рис. 75. Внешняя характеристика генератора

У генератора различают три режима работы: при независимом возбуждении (обмотка возбуждения питается от отдельного источника напряжения); самовозбуждение (обмотка возбуждения включается параллельно якорю); смешанное возбуждение (при наличии двух обмоток возбуждения – последовательной и параллельной). На рис. 76 приве-

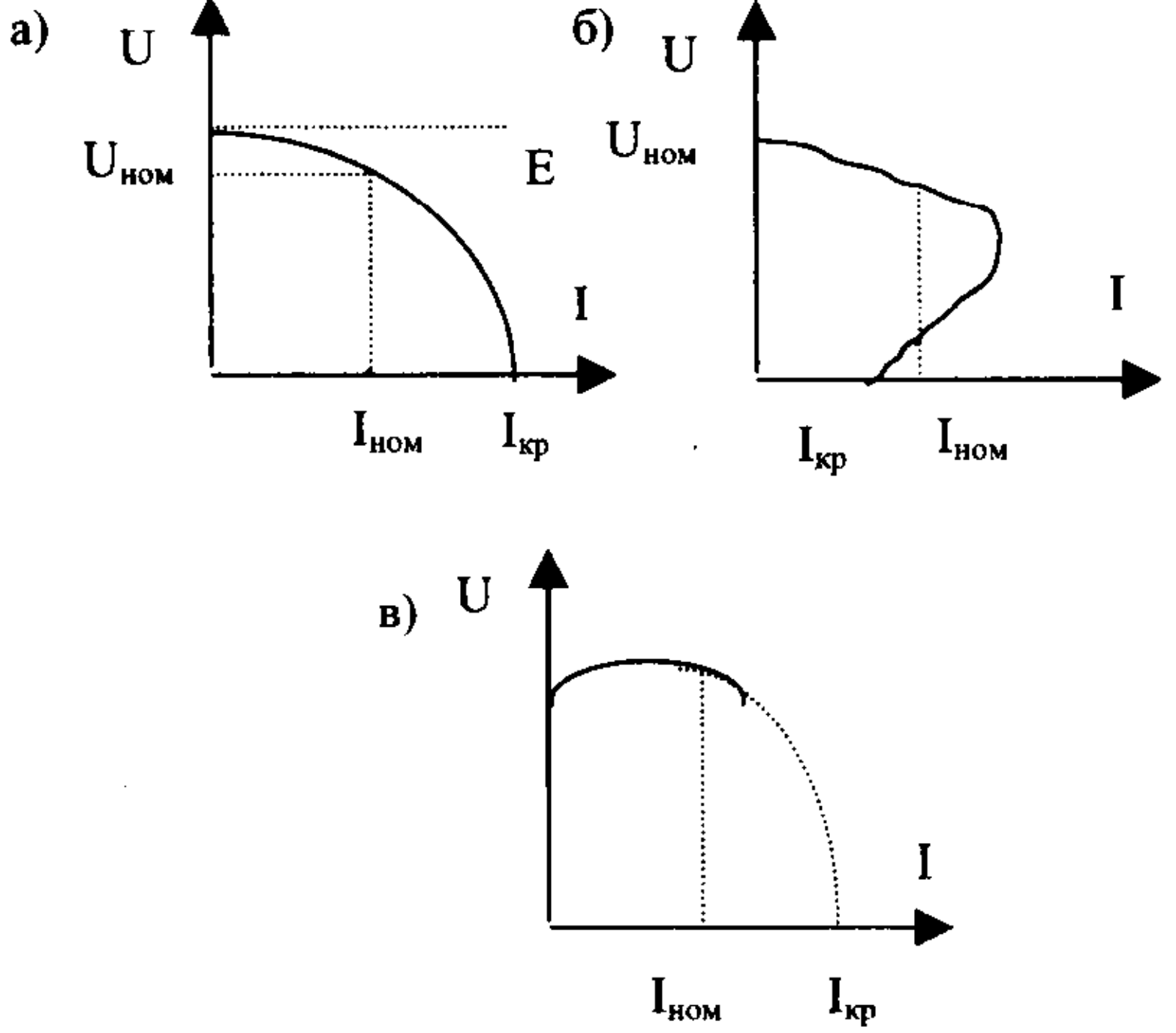


Рис. 76. Зависимости напряжения якоря от тока генератора при: а) независимом возбуждении; б) параллельном; в) смешанном

дены характеристики зависимостей напряжения якоря от тока, соответствующие этим режимам работы генератора.

Основной рабочей характеристикой двигателя постоянного тока является зависимость частоты вращения от момента на валу.

Подставим в уравнение двигателя $U_я = E + R_я I_я$ значения ЭДС и момента и получим зависимость:

$$n = \frac{E}{C_e \Phi} = \frac{U_я}{C_e \Phi} - \frac{R_я M}{C_e C_м \Phi^2}.$$

При отсутствии добавочного сопротивления в цепи якоря или нагрузки характеристика $n = f(M)$ называется естественной, а с сопротивлением – искусственной.

Регулирование частоты вращения двигателя может осуществляться тремя способами: изменением напряжения; магнитного потока (применимо только к двигателям параллельного и смешанного возбуждения) и добавочного сопротивления в цепи якоря (рис. 77).

Наиболее экономичный способ – регулирование напряжения на зажимах якоря.

В момент пуска ЭДС якоря равна нулю и $I_п = U_я / R_я$, что в 10–30 раз больше номинального тока. Поэтому для ограничения тока на время пуска в цепь якоря включают добавочное сопротивление, называемое пусковым. Так как с ростом скорости ток снижается, то в качестве пускового сопротивления используется регулировочный реостат, имеющий ряд ступеней.

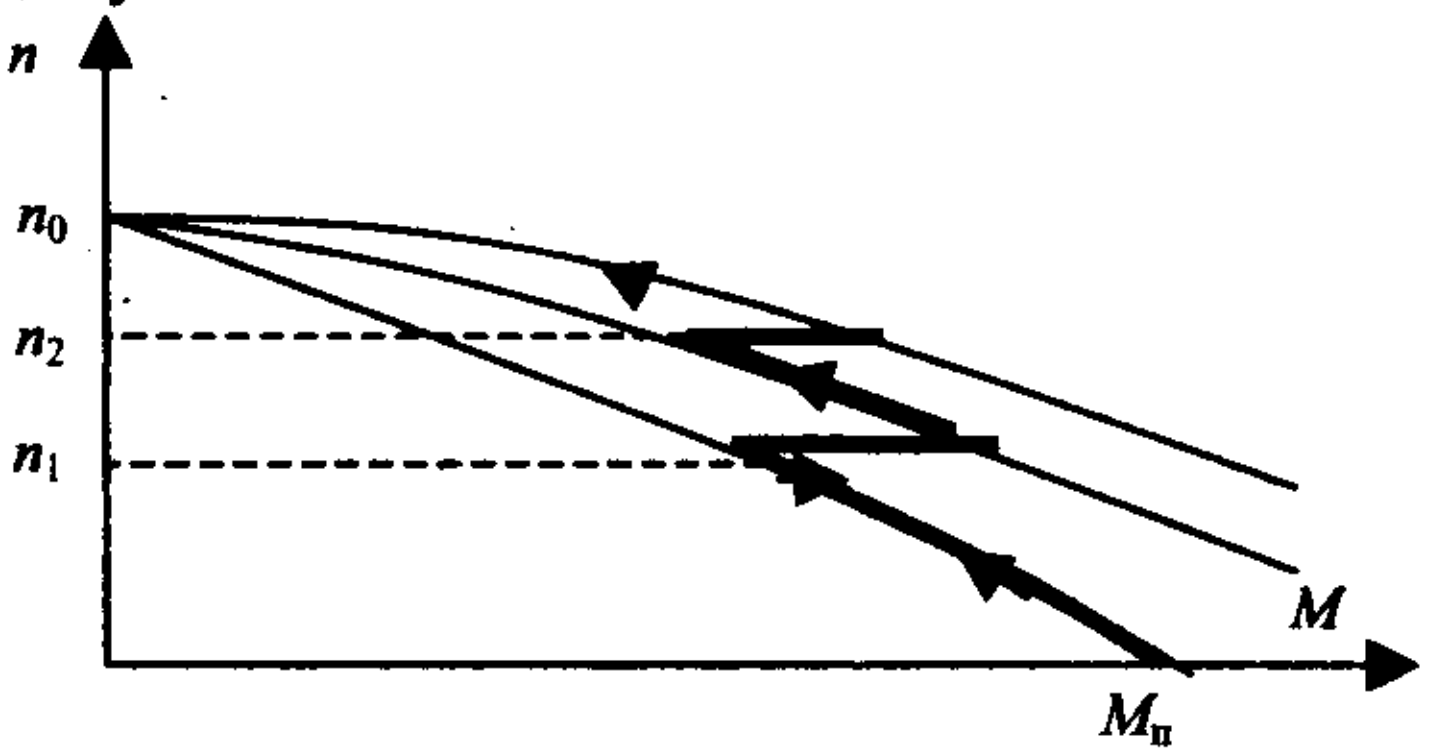


Рис. 77. Реостатный пуск двигателя

Направление вращения двигателя можно поменять переключением полярности якоря или обмотки возбуждения.

Повысить обороты двигателя выше номинальных можно ослаблением магнитного потока, зона регулирования ограничивается возрастанием тока возбуждения.

Совместное регулирование частоты вращения двигателя напряжением на якоре и током возбуждения позволяет получить режим работы при постоянной мощности.

Свойства и характеристики двигателей постоянного тока существенно зависят от того, как меняется магнитный поток при изменении механической нагрузки двигателей. Характер магнитного потока определяется способом возбуждения.

В машинах постоянного тока различают четыре системы возбуждения:

- параллельное или шунтовое;
- последовательное или сериесное;
- смешанное или компаундное;
- независимое.

Механические характеристики различных систем возбуждения приведены на рис. 78.

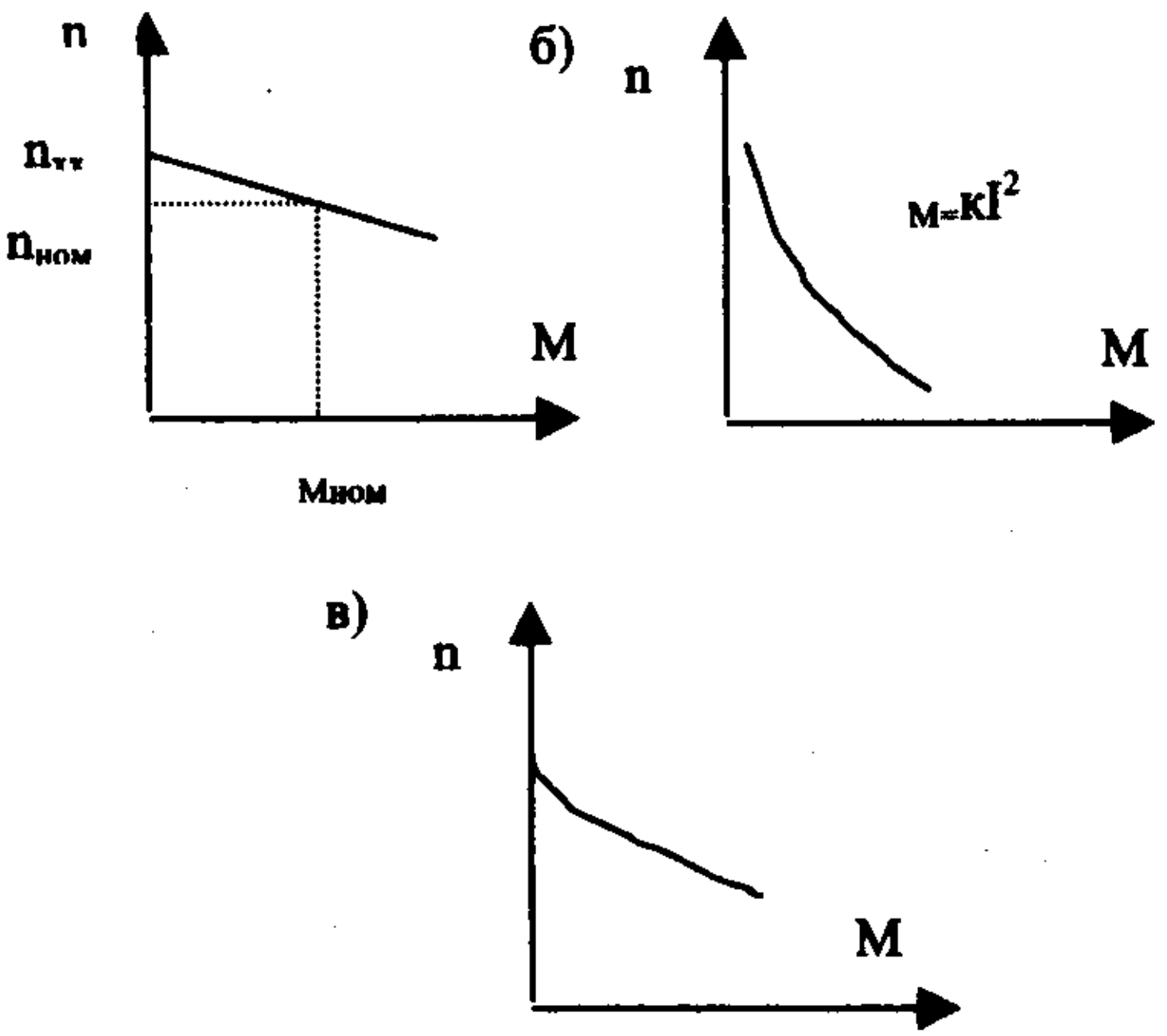


Рис. 78. Механические характеристики двигателя при:
а) параллельном возбуждении; б) последовательном; в) смешанном

В машинах постоянного тока различают следующие основные виды потерь:

- потери мощности в цепи якоря или переменные потери, зависящие от нагрузки;
- потери мощности в стали;
- механические потери;
- потери мощности в цепях возбуждения.

Когда машина работает вхолостую, полезная мощность и соответственно КПД равны нулю.

Кроме рассмотренных машин переменного и постоянного тока существует ряд электрических машин специального назначения, такие как преобразователи частоты и числа фаз переменного тока, переменного тока в постоянный и т.д. Такие машины называют электромашинными преобразователями.

5. ВИДЫ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Электрическая защита и распределение энергии между приемниками электрической энергии осуществляются с помощью электрических аппаратов.

Защита осуществляется автоматическим отключением поврежденного участка системы или подачей сигнала о нарушении нормального режима. Каждый элемент системы кроме основной защиты реагирующей на нарушения режима элемента системы может снабжаться резервной защитой, которая должна реагировать при отказах основной.

К защите предъявляются следующие требования:

- быстродействие;

- селективность;
- надежность;
- чувствительность.

Быстродействие определяется временем срабатывания t_c. Различают защиты: мгновенного действия $t_c \leq 0{,}05$с, быстродействующие $0{,}05 \leq t_c \leq 0{,}5$с и замедленного действия $t_c \geq 0{,}5$с.Селективность обеспечивается соответствующим выбором типа защиты, ее параметрами и временем срабатывания..Чувствительность характеризуется коэффициентом $K_ч$. Для максимальной защиты $K_ч = X_{min}/X_c$,, для минимальной $K_ч = X_c / X_{max}$. X_c – параметр срабатывания, X_{min} и X_{max} – соответственно, минимально и максимально возможные значения контролируемого параметра в аварийном режиме.

Для общепромышленного электрооборудования предусматриваются: максимально токовая защита (для быстрого отключения при коротком замыкании), защита от перегрузок для отключения цепи при длительном превышении номинального; защита минимального напряжения для отключения двигателей при опасном для них снижении напряжения; нулевая защита, предохраняющая от самозапуска двигателя, остановившегося после случайного перерыва в электроснабжении.

По назначению электрические аппараты делятся на четыре группы:

- коммутирующие, производящие отключение и включение силовых электрических цепей в системах, генерирующих, передающих и распределяющих электрическую энергию;
- аппараты управления (контакторы, пускатели, контроллеры, командоаппараты), управляющие работой электротехнического устройства;

- реле и регуляторы, осуществляющие защиту и управление работой устройств с использованием логических задач;
- датчики, создающие электрические сигналы (ток, напряжение), соответствующие определенным параметрам технологических процессов.

Коммутирующие аппараты можно разделить на три группы:

1. Автоматические выключатели.
2. Плавкие предохранители, выполняющие только разовое отключение при недопустимых нарушениях режима работы электротехнического устройства.
3. Неавтоматические выключатели (рубильники, пакетные выключатели и переключатели) выполняющие только ручное включение и отключение.

Коммутирующие аппараты классифицируются: по роду тока (переменный и постоянный) и уровням тока и напряжения (слаботочные – до 5А, сильноточные выше 5А, низкого напряжения – до 1000В и высокого выше 1000В); по числу разрываемых контактов – одно-, двух- и трехполюсные.

Автоматические выключатели классифицируются по выполняемым функциям защиты: минимального и максимального тока; минимального напряжения; обратной мощности. Средством защиты в автоматах является электромагнитный или биметаллический элемент, срабатывающий, при нагревании с некоторой выдержкой времени.

Предохранители состоит из плавкого металлического элемента – вставки в виде тонкой проволоки или пластины и корпуса с контактным устройством. Плавкая вставка

допускает длительное протекание тока, а при перегрузках или коротких замыканиях нагревается до температуры плавления металла и, расплавляясь, разрывает электрическую цепь. При токах выше 10А корпус предохранителя заполняется дугогасительным средством (фибра, кварцевый песок и др.)

Защитные свойства определяются типом предохранителя и номинальным током плавкой вставки. Время срабатывания – время плавления плавкой вставки. Полное время отключения цепи $t_{отк} = t_с + t_д$. $T_д$ – время гашения дуги, обычно от1мс до 10 мс.

По конструкции предохранители делятся на трубчатые и пробочные.

Реле защиты и управления осуществляют прерывистое управление при достижении какой либо величины заданного значения. Различают реле: тока, напряжения, тепловое, временное, положения, давления и т.д.

Реле состоят из трех функциональных органов: *чувствительного*, воспринимающего входную величину и преобразующего ее в электрическую; *сравнения* преобразованной величины с эталоном и передачи воздействия на исполнительный орган; *исполнительного,* который воздействует на управляемую электрическую цепь.

Реле содержит цепь, воспринимающую действие, и цепь, исполняющую действие, т.е. цепи оперативного тока. Цепь воспринимающая действие получает сигнал в виде повышения или падения сигнала. После чего реле срабатывает и замыкает цепь оперативного тока.

Так тепловое реле предназначено для защиты двигателя от перегрузки. При прохождении по нагревательному элементу (бимиталическая пластина, состоящая из двух пластин с различным температурным коэффициентом расширения) большого тока происходят его

нагрев и изгибание, что приводит в действие защелку, разрывающую контакты оперативного тока. Тепловые реле имеют значительную тепловую инерцию и не могут мгновенно отключать электрическую цепь при коротких замыканиях. Поэтому последовательно с ними включают плавкие предохранители или реле максимального тока.

Кроме защиты от перегрузок, возникающих в симметричных режимах, реле максимального тока используется при защите от коротких замыканий.

В качестве защитных аппаратов в настоящее время широкое распространение получили бесконтактные электрические аппараты.

Бесконтактные электрические аппараты

Бесконтактные электрические аппараты воздействуют на электрическую цепь без физического разрыва. Основными их преимуществами являются:

- быстродействие, высокая скорость переключения;
- долговечность; срок службы определяется в основном старением компонентов, из которых они состоят;
- отсутствие контактов подвижных частей.

Принцип действия бесконтактных электрических аппаратов управления основан на использовании элементов с нелинейной вольт-амперной характеристикой: ферромагнитные сердечники с обмотками (нелинейные индуктивности); активные нелинейные сопротивления, которыми обладают полупроводниковые приборы при сравнительно невысоких частотах электрического тока.

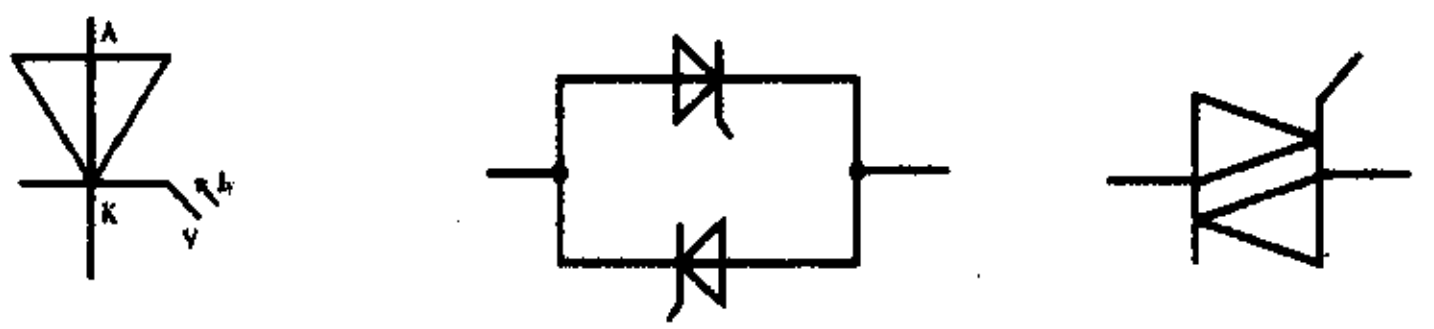
Нелинейные элементы включаются между источником питания и нагрузкой (управляемой цепью). Управление осуществляется изменением сопротивления нелинейных элементов электрическому току от минимального до максимального значения. Управляемая мощность в цепи нагрузки достигает при этом больших значений.

Указанное свойство, т.е. возможность с помощью сравнительно небольшой мощности в цепи управления управлять большой мощностью в управляемой цепи (нагрузке), характеризует бесконтактные аппараты как усилители.

5.1. Тиристорные ключи

Полупроводниковые приборы – тиристоры, транзисторы, диоды применяются в электрических аппаратах для повышения износостойкости контактов. Известно, что при обычной дуговой коммутации, при большом числе коммутаций в час возрастает износ контактов.

Тиристор является управляемым полупроводниковым вентилем. На рис. 79а показано условное обозначение тиристора: *А* – анод; *К* – катод; *У* – управляющий электрод. На управляемый электрод подается положительный потенциал относительно катода.



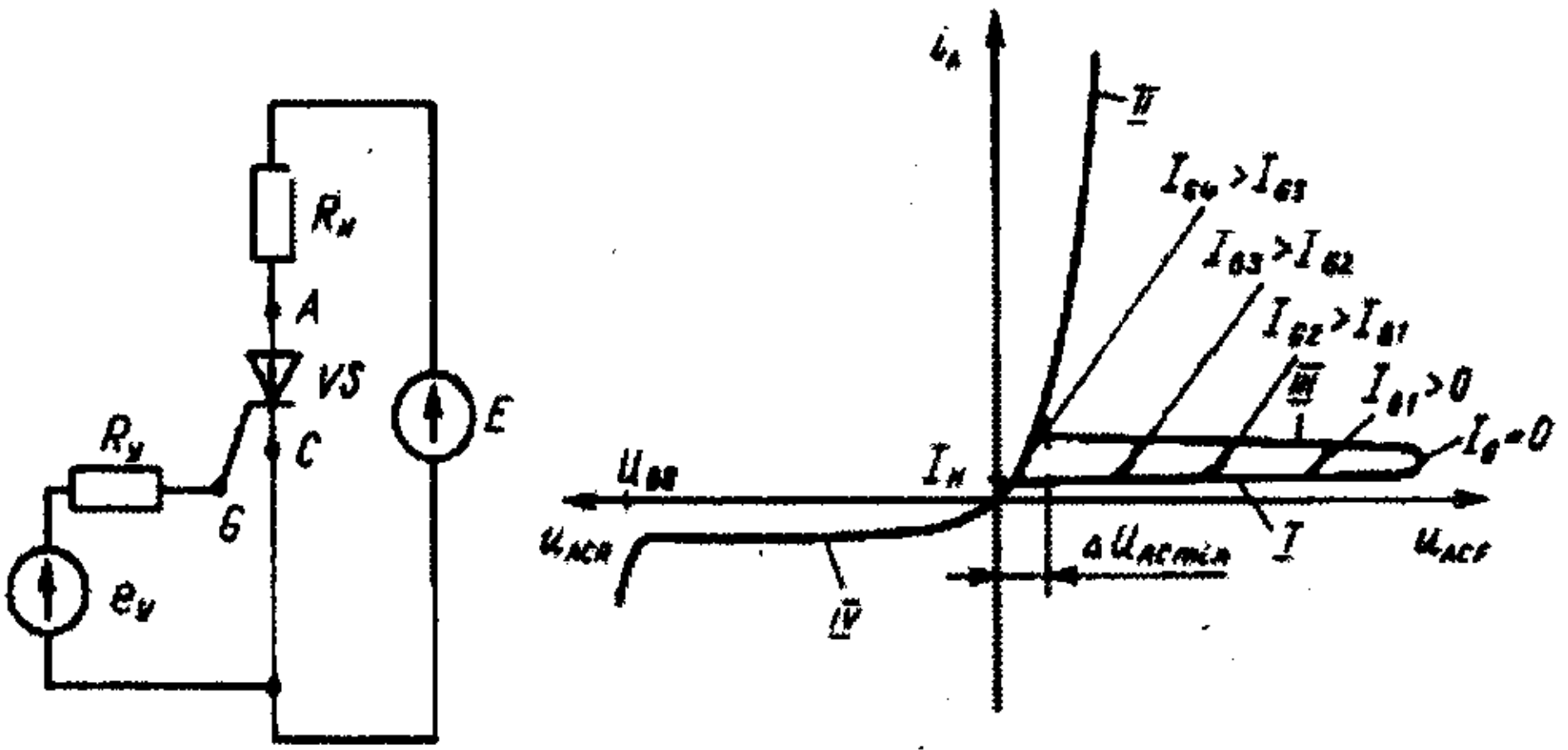
а) *б*) *в*)

Рис. 79. Схематическое изображение полупроводниковых приборов: *а* - тиристор, *б* - электронный ключ, *в* - симистор

На рис. 79б показаны два тиристора, включенные в цепь переменного тока параллельно.

На рис. 79в изображен симистор, обладающий свойствами двух тиристоров по схеме рис. 79б.

Схема включения и семейство выходных статических вольтамперных характеристик тиристора при разных токах управления представлены на рис. 80а, б.



а) *б)*

Рис. 80. Характеристики тиристора: а – схема включения, б – выходная ВАХ

Предельное прямое напряжение, которое выдерживается тиристором без его включения, имеет максимум при I_G=0. При увеличении тока I_G прямое напряжение, выдерживаемое тиристором, снижается. Включенному состоянию тиристора соответствует ветвь II, выключенному – ветвь I, процессу включения – ветвь III.

Удерживающий ток I_H равен минимальному допустимому значению прямого тока I_A, при котором тиристор остается в проводящем состоянии. В открытом состоянии тиристор также характеризуется значением прямого падения напряжения U_{Acmin}.

Зависимость тока утечки от обратного напряжения приведена на рис. 80б (ветвь IV). При превышении обратным напряжением значения U_{BO} начинается резкое возрастание обратного тока, связанное с пробоем тиристора.

Таким образом, при отсутствии тока управления тиристор ведет себя как большое активное сопротивление, при наличии номинального тока управления – как очень малое сопротивление. После прохождения переменного тока через ноль тиристор восстанавливает свои вентильные свойства, цепь тока обрывается. Основным свойством управляющего вентиля является возможность произвольной задержки с момента его отпирания, при наличии на нем прямого напряжения

Тиристор может быть использован в электрических цепях как *релейный элемент* (рис. 81). При отключенном контакте К, тиристор VS закрыт и ток в нагрузке равен нулю. При включенном К положительный ток управления I_y подается на управляющий электрод тиристора VS, и он открывается. Через нагрузку протекает ток $I_н$. В следующий полупериод тиристор закрывается, и ток $I_Н$ =0. Диод VD защищает тиристор от отрицательного тока управления.

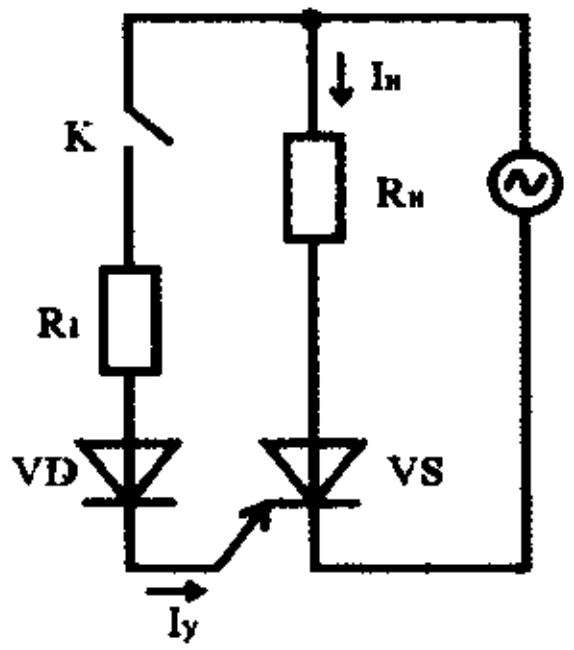


Рис. 81.Схема релейного элемента на тиристоре

В аппаратах управления тиристор применяется и как *регулирующий элемент*. Использование тиристоров в электрических схемах позволяет осуществить следующие операции:

- **включение и отключение электрической цепи с активной и смешанной (индуктивной и емкостной) нагрузкой;**

- изменение тока нагрузки за счет регулирования моментов подачи сигнала управления.

На рис. 82 представлены напряжения на нагрузке при фазовом управлении (рис. 82а), при фазовом с принудительной коммутацией (рис. 82б); широтно-импульсном управлении (рис. 82в).

Наибольшее распространение в бесконтактных электрических аппаратах получили фазовое и широтно-импульсное управления. При фазовом управлении среднее и действующее значение тока изменяется за счет изменения момента подачи на тиристор открывающего сигнала, т.е. за счет угла управления α.

Действующее напряжение на нагрузке при двухполупериодной схеме и встречно-параллельном включении двух тиристоров (рис. 83) определяется из следующих выражений:

$$U_H = \frac{U_m}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \sqrt{\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}} =$$

$$= \frac{U_C}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}} = U_C \sqrt{\gamma} ,$$

$$\gamma = \frac{\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}}{\pi}, \; U_C = U_{HO} \frac{1 + \cos\alpha}{2},$$

где U_m – амплитуда напряжения питания; U_c, $U_{но}$ – действующее и среднее значения напряжения питания; γ – угол регулирования.

Форма кривой тока в сети и нагрузке несинусоидальна. Это вызывает искажения формы напряжения сети и нарушения в работе потребителей, чувствительных к высокочастотным помехам. Для уменьшения этих искажений необходимы специальные меры.

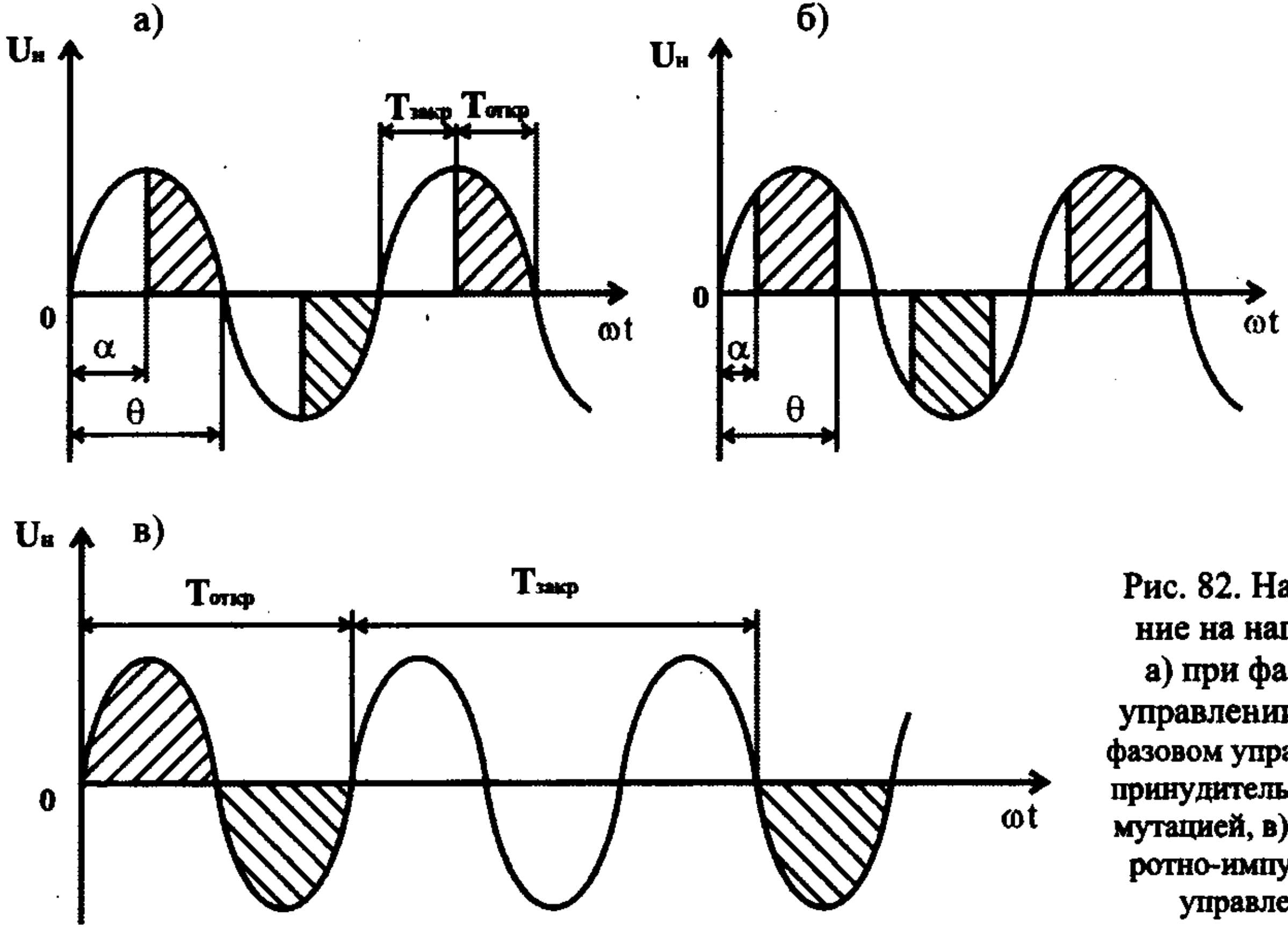


Рис. 82. Напряжение на нагрузке: а) при фазовом управлении, б) при фазовом управлении с принудительной коммутацией, в) при широтно-импульсном управлении

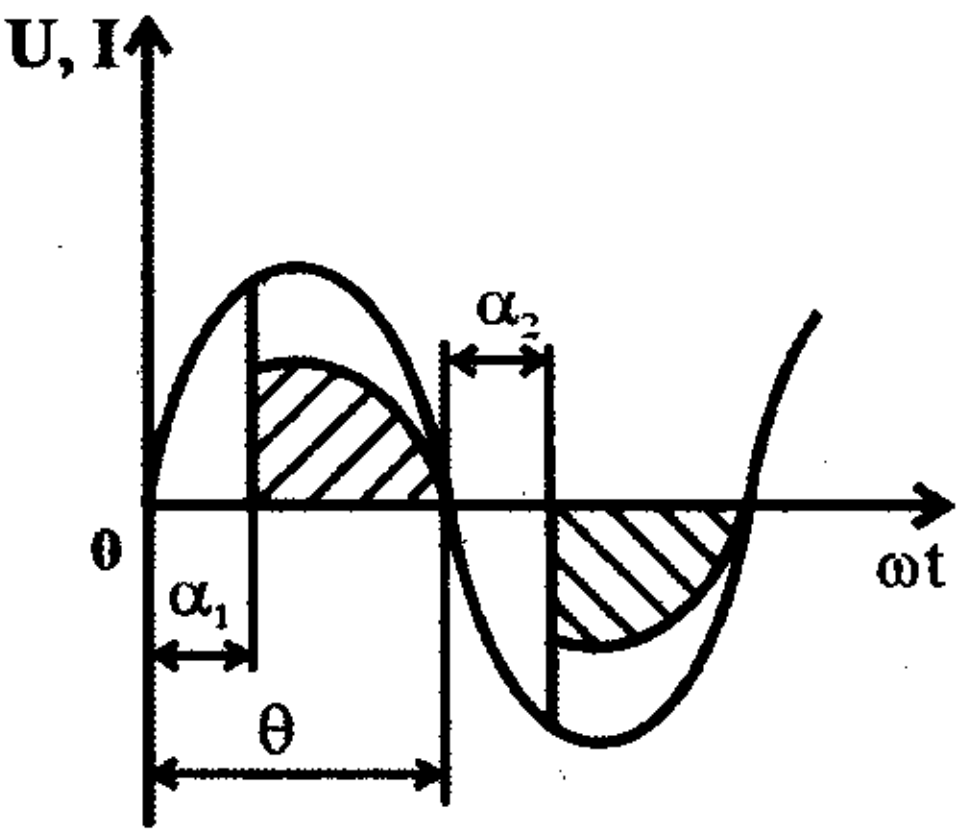


Рис. 83. Определение действующего напряжения на нагрузке

При широтно-импульсном управлении в течение $T_{откр.}$ на тиристор подан открывающий сигнал, тиристоры открыты, и к нагрузке приложено напряжение $U_н$. В течение $T_{закр.}$ управляющий сигнал снят, и тиристоры закрыты. Действующее значение тока в нагрузке:

$$I = I_{нм} = \frac{I_{откр}}{T_{откр.} + T_{закр.}},$$

где $I_{нм}$ – ток нагрузки при $T_{откр.}=0$.

Регулирование тока нагрузки $I_н$ возможно за счет изменения угла α, так и угла Θ .

Принудительная коммутация ($\Theta < 180^0$) осуществляется с помощью специальных тиристоров, которые могут запираться подачей сигнала управления.

На основе тиристоров работают следующие бесконтактные электрические аппараты:

1) тиристорные пускатели для прямого пуска, реверса и остановки асинхронных двигателей;
2) тиристорные пускатели для плавного пуска, реверса и остановки асинхронных двигателей большой мощности (до 5000 кВт);

3) регуляторы мощности и напряжения;
4) автоматические выключатели переменного тока высокого и низкого напряжения повышенного быстродействия;
5) регулирующие аппараты для управления двигателями электрического транспорта переменного тока с рекуперацией при торможении.

Для тиристорных аппаратов в качестве защиты от токов КЗ применяются быстродействующие токоограничивающие предохранители или автоматические выключатели.

5.2. Тиристорный регулятор напряжения

Схема тиристорного регулятора напряжения и осциллограммы сигналов приведены на рис. 84.

Силовая часть представляет собой тиристорную пару, в которой тиристоры включены встречно. Управление величиной напряжения на нагрузке (вольтметр V1), а следовательно, и током нагрузки (амперметр A1) достигается управлением угла отпирания тиристоров. При этом осциллограмма, снимаемая с нагрузки, имеет вид, представленный на рис. 85. При $\alpha = \pi$ тиристоры практически закрыты и на нагрузке нет напряжения, а при $\alpha = 0$ полностью открыты и напряжение на нагрузке имеет вид полных полуволн и соответствует максимальному значению, получаемому от выпрямителя.

Управление углом отпирания тиристоров осуществляет схема управления, формирующая синхронизированные с сетевым напряжением импульсы управления, передаваемые на управляющие электроды тиристоров через импульсные трансформаторы, позволяющие произвести гальваническую развязку силовых цепей преобразователя от цепей управления. Синхронизация импульсов управления с сете-

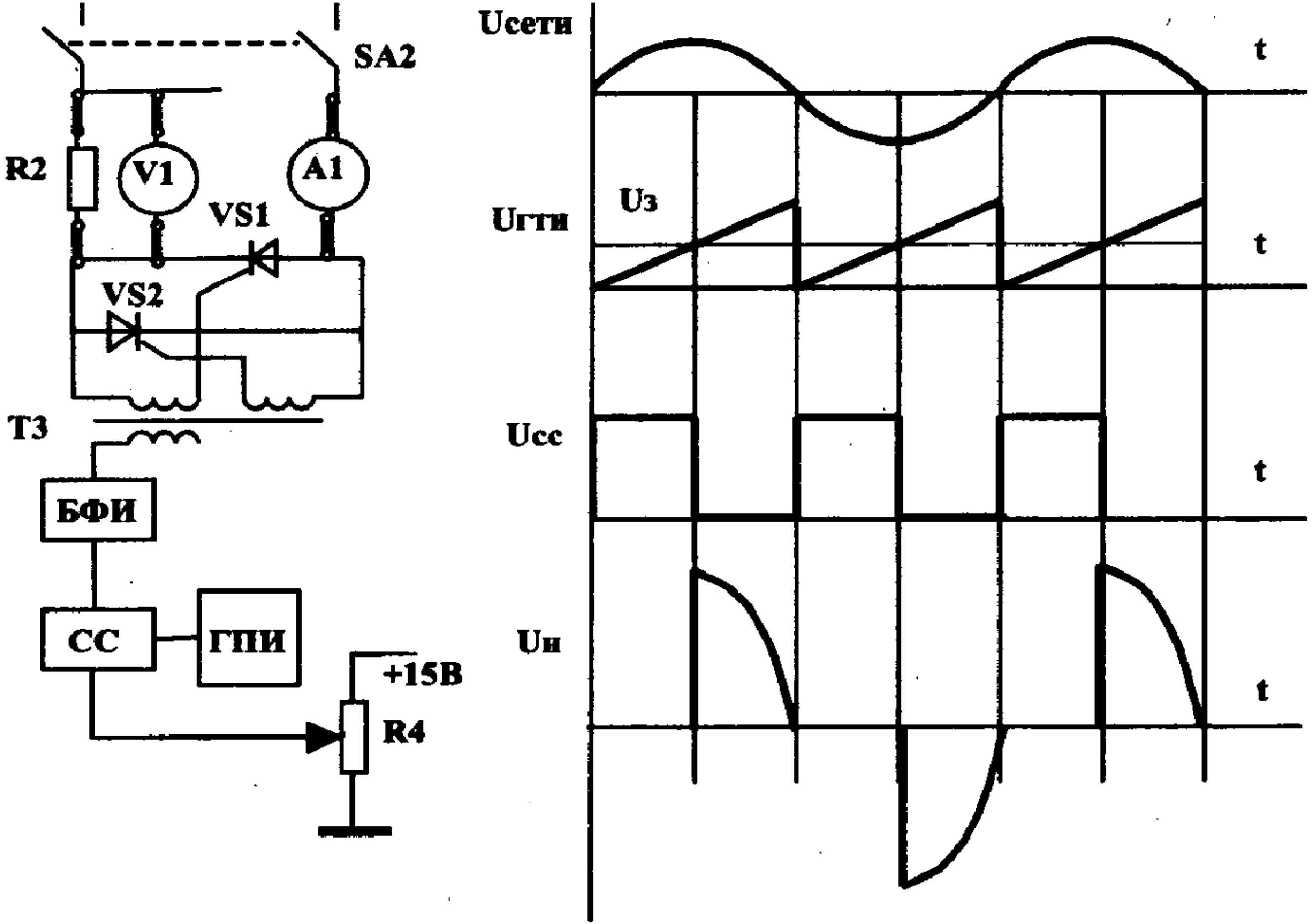


Рис. 84. Схема тиристорного регулятора напряжения и осциллограммы сигналов

вым напряжением достигается путем формирования в блоке ГПИ из пониженного синусоидального напряжения импульсов пилообразной формы. Последние поступают в блок сравнения СС, равно как и напряжение задания, снимаемое с потенциометра R4. В результате сравнения этих величин блок СС формирует прямоугольные импульсы, скважность которых зависит от положения движка потенциометра R4. Последние и управляют углом отпирания тиристоров, преобразуясь в блоке БФИ для передачи через обмотки импульсного трансформатора Т3.

5.3.Тиристорный регулятор мощности

Регулятор мощности типа РМТ (рис. 85) предназначен для широтно-импульсного регулирования трехфазных электропечей до 630 кВА и напряжением сети 380 В.

Силовой блок (СБ) имеет по два встречно включенных тиристора и диода в каждой фазе. Блоки защиты (БЗ) и датчика тока и напряжения (ДТН), служащие для обеспечения автоматического регулирования, питаются от ТА1–ТА3. Управляющие импульсы для тиристоров вырабатываются блоками синхронизации (БС), блоком формирования импульсов (БФИ) и выходным усилителем (БИТ). Управление блоком (БФИ) производится с помощью блоков переключения циклов (ПЦ), задающего генератора (ЗГ) и блока регулирования и синхронизации (БРС). Продолжительность цикла регулирования устанавливается переключателем циклов (ПЦ), который воздействует на задающий генератор (ЗГ). Один выход блока задающего генератора (ЗГ) управляет блоком БРС. Блок БРС служит для регулировки коэффициента $\frac{T_{откр}}{T_{закр}+T_{откр}}$; при работе РМТ и ограничиваются пусковых токов при включении активно-индуктивной нагрузки.

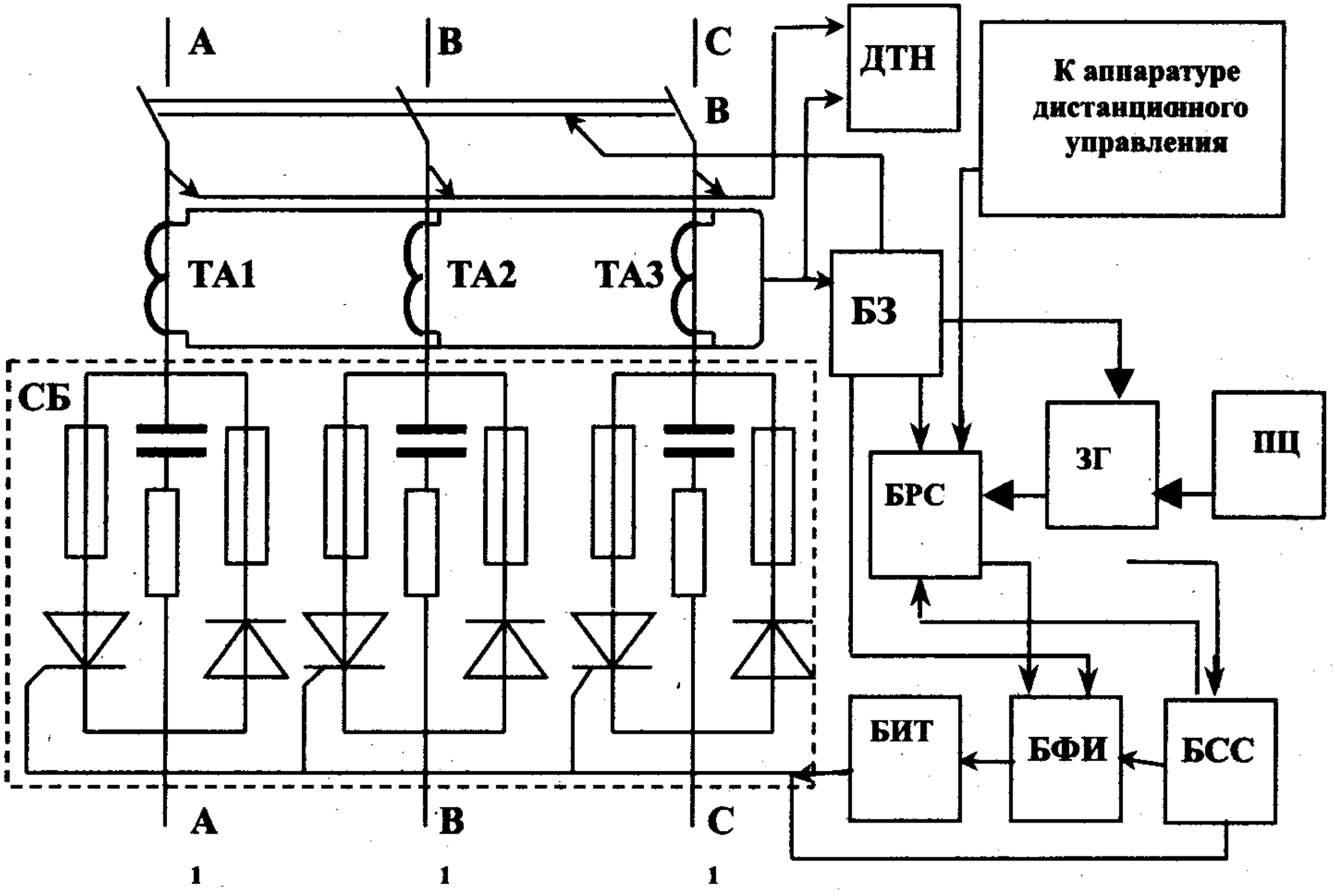


Рис. 85. Схема регулятора мощности типа РМТ

Второй выход блока ЗГ воздействует на блок синхронизации БС и обеспечивает подачу управляющего сигнала в начале положительной полуволны тока, протекающего через тиристор. В блоке защиты (БС) осуществляется защита регулятора в аварийном режиме.

Регулятор мощности тиристорный РМТ–3М

Регулятор мощности РМТ–3М представляет собой микропроцессорное устройство с симисторным управлением и предназначен для плавного управления уровнем освещенности (нарастание/спадание) по заранее заданному алгоритму в трехфазной сети 380В 50Гц.

Устройство используется на объектах, требующих изменения светового цикла и применяющих для освещения лампы накаливания, а также для регулирования температуры (воды, воздуха и др.), где в качестве нагревателей используются тены, нихромовая проволока или греющие кабели.

Регулятор оснащен четырехразрядным светодиодным индикатором, обеспечивающим вывод всех параметров системы: уровень освещенности max/min; скорость нарастания/спада освещенности; время вкл/выкл и других параметров.

С помощью клавиатуры пульта пользователь может изменять настройки параметров. Все операции по настройке прибора защищены паролем.

Аналого-цифровой преобразователь осуществляет контроль тока в каждой фазе от 1 до 50А.

Основные технические характеристики:

– диапазон регулируемой мощности, кВт	0 - 30
– диапазон рабочих температур, °С	от - 40 до +30
– максимальный ток,А	50
– степень защиты корпуса	IP10
– габаритные размеры, мм не более:	400x260x200
– масса, кг	не более 15

5.4.Тиристорный пускатель

Тиристорный пускатель типа ПТ представлен на рис. 86. В фазе А и В пускателя установлены трансформаторы тока ТА1 и ТА2. Они обеспечивают работу устройства токовой защиты. Защита тиристоров от перегрузки осуществляется терморезистором R_t . Пускатель предназначен для реверса двигателя, поэтому в фазах А и В установлены дополнительные комплекты встречно включенных тиристоров. При нажатии кнопки «Пуск вперед» включается реле К1, которое подает напряжение на управляющие электроды тиристоров, участвующих в «Пуске вперед».

При нажатии кнопки «Пуск назад» включается реле К2, и подается напряжение на управляемые электроды тиристоров, участвующих в «Пуске назад». Питание блока и реле К1 и К2 осуществляется выпрямителем, питающимся от фаз В и С.

Параметры пускателя: $U_{ном.}$ =380 В, $I_{ном.}$ =40 А, $I_{пуск.}$ =360 А при $t_{пуск.}$=0,4 с; электрическая износостойкость составляет 10^7 циклов; ресурс работы не менее 10000 часов.

Преимущества тиристорного пускателя по сравнению с контактным пускателем:

1) отсутствие электрической дуги при коммутации делает аппарат незаменимым во взрывоопасных и пожароопасных средах;

2) высокая электрическая износостойкость ($15 \cdot 10^6$ циклов);

3) совершенная защита от токов перегрузки и коротких замыканий, а также при потере фазы, что обеспечивает большой срок службы двигателей;

4) допустимое число включений достигает 2000 в час;

5) длительность отключения не превышает 0,02 с;

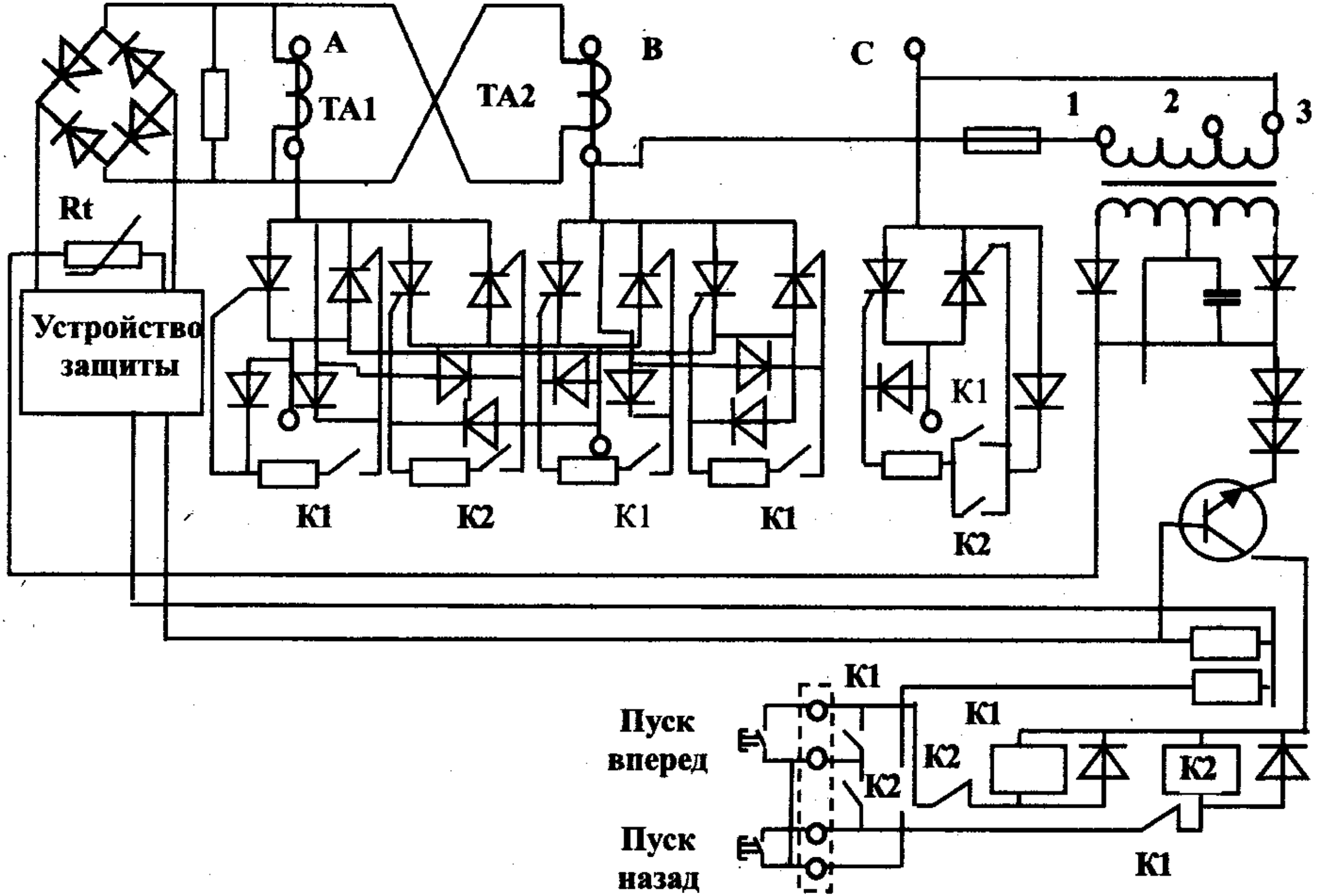


Рис. 86. Тиристорный пускатель типа ПТ

6) высокая надежность и долговечность, а также отсутствует необходимость в уходе при эксплуатации.

Недостатки тиристорных пускателей: сложность схемы, большие габариты, высокая стоимость. Несмотря на эти недостатки, тиристорные пускатели находят широкое применение во взрывоопасных и пожароопасных производствах и других областях техники, требующих высокой надежности.

В тиристорном пускателе роль механических контактов выполняют электронные ключи – два встречно-параллельно включенных тиристора в каждой фазе.

При отсутствии управляющих импульсов тиристоры закрыты, тока в фазах нет, двигатель не получает электропитания, т.е. отключен.

При наличии управляющих импульсов от реле К1 открывается соответствующая группа тиристоров, появляется ток в фазах, электродвигатель получает питание и вращается в одну сторону.

При наличии управляющих импульсов от реле К2 открывается другая группа тиристоров, фазы А и В меняются местами, фаза С остается на своем месте, двигатель вращается в другую сторону – так осуществляется реверс двигателя.

Электропитание реле К1 и К2 осуществляется от трансформатора через однофазную двухполупериодную схему выпрямления, которая заряжает конденсатор током определенной полярности.

Шунтирующие диоды у обмоток реле К1 и К2 затягивают процесс протекания тока через обмотки.

При нажатии кнопки «Пуск вперед» срабатывает реле К1, становится на самоблокировку, обесточивает реле К2, замыкаются контакты в цепях управляющих электродов определенной группы тиристоров, обеспечивающих вращение двигателя «вперед».

При нажатии кнопки «Пуск назад» срабатывает реле К2, становится на самоблокировку, обесточивает реле К1, замыкаются контакты в цепях управляющих электродов другой группы тиристоров, обеспечивающих вращение двигателя «Назад».

При нормальной работе транзистор открыт, обеспечивая протекание токов, достаточных для срабатывания реле К1 и К2.

При обрыве фазы (потеря фазы) напряжение питания устройства защиты снижается в 1,73 раза, транзистор закрывается, реле К1 и К2 отпускают, все тиристоры закрываются.

Защита тиристорного пускателя от токов перегрузки и токов КЗ осуществляется встречно включенными трансформаторами тока ТА1 и ТА2 в фазах А и В, питающим устройство защиты через выпрямительный мост.

В цепь питания реле К1 и К2 включено сопротивление терморезистора R_t.

При токах перегрузки сопротивление увеличивается, ток реле К1 или К2 уменьшается и при токе отпускания реле отпускают, тиристоры закрываются.

При коротком замыкании осуществляется воздействие на базу транзистора, что приводит к немедленному его закрыванию и отпусканию реле К1 и К2.

5.5.Микропроцессор

Микропроцессор – это программно-управляемое устройство, осуществляющее процесс обработки цифровой информации и управления им. Это устройство построено на одной или нескольких интегральных микросхемах (ИМС). В основном используется в нетрадиционных для вычислительной техники областях в качестве универсального устройства автоматики.

Микропроцессорный комплект – это совокупность электрических, функционально и конструктивно согласующихся микропроцессорных и других больших интегральных микросхем (БИС), которые могут быть совместно применены для построения микропроцессоров, контроллеров, микро-ЭВМ, и т.д.

МикроЭВМ – устройство, управляемое человеком - оператором, состоит из микропроцессора, полупроводниковой памяти, интерфейса ввода-вывода, пульта управления и источников электропитания, объединенных общей несущей конструкцией.

Микропроцессорный контроллер – цифровой или программно управляющий автомат. Контроллер выполняет функции управления автономным или входящим в состав системы устройством. Контроллер работает по однозначно заданным алгоритмам без взаимодействия с человеком-оператором.

Использование микропроцессорных БИС в системах автоматики дает следующие преимущества перед схемами с жесткой логикой:

1) снижает стоимость комплектующих изделий за счет сокращения числа микросхем;
2) сокращает сроки и стоимость разработок и модернизации систем;
3) повышает надежность;
4) расширяет функциональные возможности, которые определяются сменным программным обеспечением и гибкостью организации ввода-вывода.

Классификация микропроцессорных систем, используемых в автоматике и вычислительной технике по функциональному назначению

Микропроцессоры, применяемые в системах автоматики и вычислительной техники, по функциональному назначению можно разделить на несколько категорий:

1) *средства цифровой автоматики и простейшие контроллеры* – это функционально законченные программные контроллеры для бытовых приборов, промышленных установок, калькуляторов. Они не рассчитаны на работу с внешними устройствами и памятью большого объема;

2) *универсальные контроллеры* – предназначены для управления станками, контрольно-измерительной аппаратуры, сложными терминалами, оперируют с 8–16-разрядными словами, имеют ОЗУ (оперативное запоминающее устройство) и ПЗУ (постоянное ЗУ) и развитую систему ввода-вывода;

3) *микроЭВМ на одной или нескольких БИС* – предназначены для управления в реальном масштабе времени технологическими процессами; для осуществления предварительной обработки информации, обмениваемой с большой ЭВМ. МикроЭВМ такого типа имеет формат слов 8–16 бит, ОЗУ около 32–64 тысяч слов , расширяемую систему ввода-вывода;

4) *многопроцессорные вычислительные системы на базе БИС микропроцессоров* – предназначены для научных расчетов, управления быстродействующими процессами в реальном времени, а также для обработки больших массивов информации. Такие системы характеризуются работой со словами 16–32 и более разрядов, большой памятью, достаточно сложным внутренним и внешним математическим обеспечением;

5) *многоэлектронные управляющие вычислительные комплексы* – это микроЭВМ и контроллеры, реализованные с помощью микропроцессорных комплектов; предназначены для построения средств автоматики и систем управления.

Основные узлы микропроцессорных устройств; функции, выполняемые ими

Микропроцессор выполняется в виде одной или нескольких БИС, обладающей высокой степенью интеграции. На вход МП через УВВ (устройство ввода-вывода) и ЗУ (запоминающее устройство) подают управляющие сигналы и сигналы обратной связи в двоичном коде. По программе, заложенной в ЗУ, информация обрабатывается в АЛУ (арифметико-логическое устройство). На выходе появляется сигнал для управления объектом. Различают МП *специализированные и универсальные*. *Универсальные МП* выполняют функции центрального процессора и широко используются в микроЭВМ, в системах автоуправления, измерительных приборах, диагностических устройствах. *Специализированные МП* предназначены для решения конкретной задачи и оптимизации по определенному параметру. Специализированный процессор решает эту задачу во много раз быстрее универсального.

В микропроцессорный комплект входят: БИС-микропроцессоры, ЗУ, УВВ, УУ и др.

Микроконтроллер (контроллер) – это микропроцессорный комплект, конструктивно оформленный в виде одной платы. По своему назначению он аналогичен контактному командо-контроллеру, в котором в зависимости от регулирования кулачков происходит коммутация выходных контактов при определенном положении вала. Программа данного контроллера может меняться путем перестановки кулачков.

Различают микроконтроллеры с жесткой и изменяемой программой. Микроконтроллер с изменяемой программой обрабатывает входные сигналы по программе, заложенной в ПЗУ, и выдает выходной сигнал. При изменении программы в ПЗУ меняется и выполняемая задача.

Микропроцессорная система включает в себя БИС МП комплекта, используя микропроцессор как обрабатывающий узел системы управления приводом, измерением и для других целей. Если в системе используется несколько микропроцессоров, то система называется мультимикропроцессорной.

МикроЭВМ является конструктивно законченным устройством, содержащим МП, источник питания, ЗУ, УВВ, ПУ – пульт управления.

На вход ЭВМ могут подаваться результаты отдельных измерений, электрические сигналы управления, числа для расчетов по известным формулам и др. Эти данные обрабатываются ЭВМ, и на ее выходе появляются результаты статистической обработки экспериментальных материалов, сигналы для управления силовыми электрическими аппаратами, результаты расчетов и т.п.

Простейшая ЭВМ состоит из следующих узлов:

АЛУ – арифметико-логическое устройство, УУ – устройство управления, ЗУ – запоминающее устройство, УВВ – периферийное устройство.

АЛУ предназначено для выполнения арифметических (сложение, умножение, вычитание, деление) и логических операций (И, ИЛИ, НЕ, ИЛИ-НЕ, И-НЕ и др.).

УУ осуществляет управление работой всех остальных узлов, а также потоками информации внутри ЭВМ. Действие УУ определяется командами. Совокупность команд, которые должны быть выполнены для поставленной задачи, называется *программой*.

ЗУ – это память машины, служит для хранения программ и обрабатываемой информации. ЗУ состоит из ячеек, содержащих элемент памяти. В ЭВМ для расчетов и управления применяется двоичная система исчисления. Элементы памяти выполняются на полупроводниковых триггерах, а ячейка – на регистрах, содержащих эти тригтеры. Чтобы ввести число в ячейку или извлечь содержимое, необходимо указать адрес этой ячейки.

Память делится на оперативную (ОЗУ) и постоянную (ПЗУ). С помощью ОЗУ в АЛУ и УУ вводятся внешние данные. В ПЗУ хранится программа операций.

Периферийные устройства представляют собой устройства ввода и вывода информации (УВВ). В них осуществляется считывание данных с носителей информации и превращения этих данных в форму, требуемую для машины. В УВВ выполняется также фиксация результатов работы ЭВМ на дисплее.

Совокупность АЛУ и УУ является единым комплексом, позволяющим выполнять автоматическую обработку информации. АЛУ и УУ называются центральным процессором машины, или просто процессором.

В настоящее время создано четыре поколения ЭВМ с улучшающимися технико-экономическими показателями, что способствует дальнейшему расширению сферы применения ЭВМ и их эффективности.

Четвертое поколение ЭВМ на основе интегральных схем с большой степенью интеграции элементов (БИС) появилось в начале 70-х годов и существенно изменило параметры ЭВМ всех классов. Вместе с тем возник совершенно новый класс ВТ на основе БИС – микропроцессорные вычислительные машины – микроЭВМ.

Микропроцессоры и микроЭВМ стали новым массовым классом ЭВМ вследствие малой материалоемкости

и стоимости, низкого энергопотребления и высокой надежности.

Микропроцессоры и микроЭВМ применяют в различных областях народного хозяйства (в управлении технологическими процессорами, информационных и измерительных комплексах, энергетике, медицине и др.). На базе выпускаемых микропроцессоров созданы высокопроизводительные устройства числового программного управления.

Построение ЭВМ на основе микропроцессорных БИС позволяет уменьшить стоимость микроЭВМ, сравнимых по своим параметрам с ранее созданными ЭВМ, в $10^3 - 10^4$ раз, габаритным размерам – в (2–3) 10^4 раз , по мощности потребления – в 10^5.

Микропроцессор – функционально законченное устройство обработки информации, управляемое хранимой в памяти программой. Появление микропроцессоров (МП) стало возможным благодаря развитию интегральной электроники. Это позволило перейти от схем малой и средней степени интеграции к большим и сверхбольшим интегральным микросхемам (БИС и СБИС).

По логическим функциям и структуре МП напоминает упрощенный вариант процессора обычных ЭВМ. Конструктивно он представляет собой одну или несколько БИС или СБИС.

По конструктивному признаку МП можно разделить на однокристальные МП с фиксированной длиной (разрядностью) слова и определенной системой команд; многокристальные (секционные) МП с наращиваемой разрядностью слова и микропрограммным управлением (они состоят из двух БИС и более).

Архитектура многокристального МП с микропрограммным управлением позволяет достичь гибкости в его приме-

нении и сравнительно простыми средствами организовать параллельное выполнение отдельных машинных операций, что повышает производительность ЭВМ на таких МП.

Арифметическо-логическое устройство (АЛУ) состоит из двоичного сумматора со схемами ускоренного переноса, сдвигающего регистры, и регистров для временного хранения операндов. Обычно это устройство выполняет по командам несколько простейших операций: сложение, вычитание, сдвиг, пересылку, логическое сложение (ИЛИ), логическое умножение (И), сложение по модулю 2.

Устройство управления управляет работой АЛУ и внутренних регистров в процессе выполнения команды. Согласно коду операций, содержащемуся в команде, оно формирует внутренние сигналы управления блоками МП. Адресная часть команды совместно с сигналами управления используется для считывания данных из определенной ячейки памяти или для записи данных в ячейку. По сигналам УУ осуществляется выборка каждой новой, очередной команды.

Блок внутренних регистров БВР, расширяющий возможности АЛУ, служит внутренней памятью МП и используется для временного хранения данных и команд. Он также выполняет некоторые процедуры обработки информации.

Регистры общего назначения (РОН), число которых может изменяться от 4 до 64, определяют вычислительные возможности МП. Их функция – хранение операндов. Но могут выполнять также и роль регистров. Все РОН доступны программисту, который рассматривает их как сверхоперативное запоминающее устройство.

Регистр-аккумулятор («накопитель»), предназначен для временного хранения операнда или промежуточного

результата действий, производимых в АЛУ. Разрядность регистра равна разрядности информационного слова.

Буферный регистр адреса служит для приема и хранения адресной части выполняемой команды. Возможное количество адресов, определяется разрядностью регистра.

Буферный регистр данных используется для временного хранения выбранного из памяти слова перед передачей его во внешнюю шину данных. Его разрядность определяется количеством байт информационного слова.

Счетчик команд содержит адрес ячейки памяти, в которой помещены байты выполняемой команды.

Регистр команд принимает и хранит код очередной команды, адрес которой находится в счетчике команд. По сигналу УУ в него передается из регистра хранимая там информация.

Регистры стека делятся на стек и указатель стека. В МП стек – набор регистров, хранящих адреса команд возврата при обращении к подпрограммам или состояние внутренних регистров при обработке прерываний. Стек может быть выполнен не только на внутренних регистрах МП, составляя его часть, но и находиться в ОЗУ, занимая там отведенную для него зону. В последнем случае для обращения к нему необходим специальный регистр – указатель стека.

Указатель стека хранит адреса последней занятой ячейки стека, которую называют вершиной.

Регистр признаков представляет собой набор триггеров – флажков. В зависимости от результатов операций, выполняемых АЛУ, каждый триггер устанавливается в состояние 0 или 1. Флажковые биты, определяющие содержимое регистра, индицируют условные признаки: нулевого результата, знака результата, переполнения и т. п. Эта информация, характеризующая состояние процессора, важна для выбора дальнейшего пути вычислений.

Внутренняя шина данных соединяет собой основные части МП.

Шиной называют группу линий передачи информации, объединенных общим функциональным признаком. В микропроцессорной схеме используется три вида шин: данных, адресов и управления.

Разрядность внутренней шины данных, т. е. количество передаваемых по ней одновременно (параллельно) битов числа соответствует разрядности слов, которыми оперирует МП. Недостаточно высокая разрядность шины данных может ограничить состав (сложность) команд и их число. Поэтому разрядность шины данных относят к важным характеристикам микропроцессора Шина данных МП работает в режиме двунаправленной передачи, т. е. по ней можно передавать слова в обоих направлениях, но не одновременно. В этом случае требуется применение специальных буферных схем и мультиплексного режима обмена данных между МП и внешней памятью. *Мультиплексный режим* (от английского слова multiple – многократный, множественный), иногда называемый *многоточечным*, – режим одновременного использования канала передачи большим числом абонентов с разделением во времени средств управления.

Мультиплексор – устройство, которое выбирает данные от одного, двух (или более) входных информационных каналов и подает эти данные на свой выход. Схема мультиплексора состоит из двухвходовых логических элементов И – ИЛИ, управляемых распределителем импульсов.

Демультиплексор – устройство, выполняющее противоположную мультиплексору функцию, – подает данные, подводимые к его входу, на один (или более) выходной информационный канал.

Мультиплексоры и демультиплексоры позволяют компоновать из микропроцессорных элементов микроЭВМ для любой длины машинного слова.

Микропроцессор – это программно-управляемое устройство. Процедура выполняемой им обработки данных определяется программой, т. е. совокупностью команд. Команда делится на две части: код операции и адрес. В коде операции заключена информация о том, какая операция должна быть выполнена над данными, подлежащими обработке. Адрес указывает место, где расположены эти данные (в регистрах общего назначения микропроцессора, т. е. во внутренней или внешней памяти). Слово данных, подвергаемое обработке, представляет один байт. Команда может состоять из одного, двух или трех байтов, последовательно расположенных в памяти.

Первый байт команды содержит код операции. Считанный в начале интервала выполнения команды, называемого циклом команды, ее первый байт поступает по внутренней шине данных в регистр команд, где хранится в течение всего цикла. Дешифратор кода операции дешифрует содержимое регистра команд – определяет характер операции и адреса операндов. Эта информация подается в УУ, которое вырабатывает управляющие сигналы, направляемые в блоки микропроцессора, участвующие в выполнении данной команды.

Основные микропроцессорные комплекты и их функциональный состав представлены в табл. 2.

Микропроцессорные комплекты изготовляют в виде секционных БИС с возможностью наращивания. Исключение составляет БИС КР580ИК80А – восьмиразрядный МП, в котором можно увеличить разрядность обрабатываемых данных путем двойного пересчета. В состав секционных МПК входят, как правило, *n*-разрядная МП секция, предна-

значенная для обработки информации и временного хранения результатов, схема микропрограммного УУ, а также БИС, выполняющие функции по обработке прерываний программы, синхронизации и связи с периферийными устройствами.

Таблица 2

Серия МПК	Технология	Разрядность	Быстродействие	Число РОН	Мощность потребл. Вт.	Число ИС в базовом МПК	Число ИС в МПК
К589	ТТЛШ	2	1000	11	2,15	2	8
К1800	ЭСЛ	4	3000	1	3,23	2	4
К1801	n-МОП	6	550	8	1,0	1	1
К1802	ТТЛШ	4	1400	16	2,2	2	6
К1804	ТТЛШ	4	550	16	2,05	2	8

Возможность наращивания разрядности обрабатываемой информации и применение микропрограмм обеспечивают гибкость и широкую сферу применения секционных МПК, так как разработчик аппаратуры сам может определять набор команд.

В структуре МПК можно выделить операционную и управляющую части. Операционная часть проводит логическую обработку информации, управляющая часть декодирует команды и формирует сигналы, необходимые для выполнения той или иной операции. Каждая команда представляет собой небольшую программу, состоящую из элементарных операций. Последовательность таких команд называется микропрограммой. Очередность команд, в соответствии с которой работает управляющая часть МП, называется программой.

Количество различных операций, выполняемых некоторыми МП, доходит до 100, причем в них предусматри-

ваются операции с двойной длиной слова и побайтовой обработкой информации. В процессе развития наряду с МП, имеющими фиксированный список команд, появились МП с микропрограммным управлением, которое позволяет изменять список команд и алгоритмы управления. Это увеличивает гибкость процессора и упрощает реализацию последовательности относительно сложных микрокоманд.

Важнейший параметр МП – быстродействие. В настоящее время диапазон быстродействия МП – от десятков тысяч до 1–3 млн. коротких операций.

Отечественная промышленность выпускает секционированные микропроцессорные комплекты серий К–589, КР–1802, КР–1804, К18–00 и др.

5.6. Контроллер

Классификация по функциональному назначению, структура макроконтроллера

При автоматизации технологического оборудования широко используют устройства локального управления – контроллеры. Контроллеры работают в реальном масштабе времени под управлением рабочих программ, которые, как правило, размещаются в ПЗУ.

Контроллеры подразделяются на:

1. Программируемые логические (ПЛК) – реализующие логические функции и предназначенные для управления последовательностью технологического процесса.

2. Программируемые регулирующие (ПРК) – реализующие алгоритмы автоматического управления, которые заданы в виде конечно-разностных уравнений и предназна-

ченные для управления параметрами технологического процесса.

3. Программируемые комбинированные (ПКК). Предназначены для управления последовательностью технологического цикла и параметрами технологического процесса.

4. Специализированные контроллеры – реализуют специальные функции управления. Предназначены для управления специальными устройствами технологического оборудования и периферийными устройствами (накопителями на магнитных дисках или магнитной ленте, перфоратором и т.д.).

В настоящее время контроллеры строятся на МПК (микропроцессорные комплексы) БИС. По своим характеристикам они превосходят релейные схемы управления и аналогичные регуляторы. Например, в системах управления один программируемый контроллер заменяет от 10 до 500 реле, от 4 до 64 одноканальных аналоговых регуляторов.

Основным достоинством программируемых контроллеров (ПК) являются их высокая надежность, универсальность и гибкость.

Универсальность контроллера обеспечивается следующим:

- за счет программирования контроллера под определенный технологический процесс с помощью специального встроенного устройства;
- за счет замены БИС ППЗУ, в каждой из которых «зашита» рабочая программа управления определенным технологическим процессом;
- либо перепрограммированием БИС ЗУ под конкретный технологический процесс с помощью автоматического устройства – программатора.

Гибкость МП системы управления обеспечивается за счет возможности внесения различных изменений в систему управления программным путем без изменения аппаратной части.

В состав ПК входят:

МП – микропроцессор или микроЭВМ;

ПЗУ, в котором хранятся программы управления (память программы);

ОЗУ – энергозависимое оперативно запоминающее устройство, которое хранит текущие данные необходимых для реализации программ (память данных);

УСО – устройство связи с объектом;

ПУ – пульт управления, с помощью которого осуществляется программирование технологического процесса;

УОИ – устройство отображения информации о состоянии входных и выходных сигналов, параметров процесса и т.д.

К – контроллеры внешних устройств.

ПЛК представляет собой совокупность программных и аппаратных средств, позволяющих выполнять работу релейного автомата в соответствии с заданием. Они ориентированы на реализацию булевых систем, а не арифметических функций. В настоящее время используются вместо релейных схем управления устройств автоматики и различных командоаппаратов. Планируется выпуск диалоговых контроллеров (димиконтов). Работа ПЛК осуществляется в циклическом режиме в соответствии с моделью конкретной релейной схемой: опрашиваются все входы, производится логическое сравнение состояний входов и выходов. По результатам сравнения включаются или отключаются те или иные исполнительные органы, при этом реализуются относительно простые логические функции управления.

На базе «Электроники К1-20» построен ПЛК. Логическое управление состоит в управлении последовательностью технологического цикла, т.е. в формировании и фиксировании моментов времени дискретных управляющих сигналов типа «включить», «выключить». Рассматриваемый ПЛК «Электроника К1-20» обеспечивает: логическое управление объектом по 48 линиям связи, программируемый прием и выдачу информации в последовательном коде по 1 каналу. 4 входа и выхода ПЛК имеют гальваническую развязку. Логические уровни всех входов и выходов сигналов ПЛК соответствуют уровням ТТЛ (транзисторно-транзисторной логики). Элементную базу контроллера представляет микропроцессор КР580. Контроллер не содержит УСО, поэтому пользователю необходимо предусматривать подключение этих устройств. ПЛК «Электроника К1-20» используют для управления специальным технологическим оборудованием микроэлектроники типа сварочных автоматов, конвейеров и т.д.

2. Управление параметрами технологического процесса заключается в стабилизации или изменении по определенному закону параметров (температуры, давления, мощности двигателя). При этом часто применяется пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) алгоритм управления. Одна из подобных отечественных реализаций микропроцессорного регулирующего программируемого контроллера – «Ремиконт». Центральный процессор построен на базе микропроцессора КР580ИК80А. ПЗУ программируется на заводе-изготовителе. ПЗУ представляет собой полупроводниковую память, в которой хранятся функции программы. Библиотека программ «Ремиконта» компонуется на базе стандартных алгоритмов:

- ПИД – регулирования;
- динамического преобразования (интегрирования, дифференцирования);
- статического преобразования (суммирования, умножения и т.п.); нелинейного преобразования (переключения, маскирования);
- управляющей логики (операций логического сложения, умножения и выдержки времени и т.п.).

Реализация этих алгоритмов позволяет строить системы автоматического управления технологическими процессами любой сложности.

Оперативная память данных разделена на две области. Первая область представляет собой ЗУ прямой выборки и используется для временного хранения промежуточных результатов расчета режимов работы и коэффициентов настройки. Вторая область предназначена для хранения перепрограммируемых параметров «Ремиконта».

С панели оператора осуществляется оперативное управление, изменяются сигналы задания автоматического и ручного управления, контролируются значения технологических параметров, выбираются алгоритмы управления и параметры статической и динамической настройки «Ремиконта». Информация оператору представляется на панели с помощью цифровых индикаторов и светодиодов. Потребитель может выбирать (программировать) требуемую для заданного объекта систему автоматического управления и проверять правильность ее функционирования. При подобном подходе используется наиболее ценное свойство микропроцессорной техники – свойство программируемости и резко упрощаются наладка и эксплуатация системы управления.

Однокристальные контроллеры семейства МК51

Однокристальные микроконтроллеры – отдельный класс микросистем. Полный набор их средств расположен на одном кристалле. Кроме центрального процессора сюда входят память, подсистема ввода-вывода, средства поддержки режима реального времени (РВ). Интеграция всех составных частей микроЭВМ на одном кристалле внесла ряд ограничений на принципы ее организации, потребовала новых решений в развитии ее архитектуры, не свойственной многокристальным компоновкам. В результате получен новый класс микроконтроллеров (МК) с присущими только ему принципами построения архитектуры и структурной схемы.

Структурная организация, набор команд и аппаратурно-программные средства ввода/вывода информации микроконтроллеров лучше всего приспособлены для решения задач управления и регулирования в приборах, устройствах и системах автоматики, а не для решения задач обработки данных.

МК51 имеет в своем составе: процессор, в состав которого входят 1-байтное АЛУ и схема аппаратурной реализации команд умножения и деления; стираемое ПЗУ программ емкостью 4 Кбайта, ОЗУ данных емкостью 128 байт; два 16-битных таймера/счетчика; программируемые схемы ввода/вывода (32 линии); блок двухуровневого векторного прерывания от пяти источников; асинхронный канал дуплексного последовательного ввода/вывода информации со скоростью до 375 кбит/с; генератор, схему синхронизации и управления.

6. ЭЛЕКТРОПРИВОД

Электроприводом называется электромеханическое устройство, осуществляющее преобразование электрической энергии в механическую и обеспечивающее электрическое управление.

Электропривод включает в себя системы преобразования, передачи и распределения энергии и управление этими процессами.

Впервые в качестве электропривода в 1837 г. был использован двигатель постоянного тока для привода судна. В 1889 г. М.О.Доливо-Добровольским был разработан асинхронный двигатель, который был установлен в качестве привода в 1893 г.

Первыми трудами по теории электропривода были книга проф. С.А. Ринкевича «Электрическое распределение механической энергии» (1925) и проф. В.К. Попова «Применение электродвигателей в промышленности» (1932–1939).

Электропривод бывает индивидуальный, групповой и взаимосвязанный. В *групповом электроприводе* один электродвигатель приводит в движение группу механизмов – сложная кинематическая схема.

Индивидуальный – один двигатель, один рабочий орган (электродрель, электроточило и др.).

Взаимосвязанный – несколько двигателей, несколько механизмов (привод станков, промышленные роботы).

Основная функция электропривода – приводить в движение рабочий механизм и изменять его режим работы в соответствии с требованиями технологического процесса.

По характеру движения электроприводы подразделяются на *вращательный* (электродвигательным устройством

является вращающийся двигатель) и *линейный* (электродвигательным устройством является линейный двигатель).

По принципу действия электродвигательного устройства – на *непрерывного действия*, когда подвижные части находятся в состоянии непрерывного движения, и *дискретного действия*, когда подвижные части находятся в состоянии дискретного движения.

По направлению вращения – на *реверсивный* (когда вал двигателя может вращаться в противоположных направлениях) и *нереверсивный* (когда вал двигателя может вращаться только в одном направлении).

Выбор типа двигателя зависит от ряда факторов: характера окружающей среды (влажность, температура окружающего воздуха и т. д.); требований по конструктивному исполнению, охлаждению, креплению, требуемых механических и регулировочных характеристик, напряжения электрической сети и рода тока.

В соответствии с особенностями климата для электрооборудования определены следующие климатические исполнения:

У – для эксплуатации в зонах с умеренным климатом;
ХЛ – для холодного климата;
УХЛ – для умеренного и холодного климата;
ТВ – для влажного тропического климата;
ТС – для сухого тропического климата;
Т – для сухого и влажного тропического климата;
О – общеклиматическое исполнение.

Климатическое исполнение указывают в типовом обозначении электротехнического оборудования. Вместе с ним указывается категория помещения, в котором допускается его эксплуатация:

1 – исполнение оборудования, которое может эксплуатироваться на открытом воздухе;

2 – исполнение оборудования, которое может эксплуатироваться в закрытом помещении, температура и влажность в котором несущественно отличается от состояния окружающего воздуха;

3 – исполнение оборудования для помещений с естественной вентиляцией без искусственного климата;

4 – исполнение оборудования, которое может эксплуатироваться в отапливаемых или охлаждаемых и вентилируемых помещениях;

5 – исполнение оборудования для эксплуатации в помещениях с повышенной влажностью, где возможно длительное наличие воды или частая конденсация влаги на стенах и потолке.

По способу защиты от действия окружающей среды электродвигатели делятся на открытые, защищенные, в том числе брызгозащищенные и герметичные.

Важное значение для надежной работы электропривода имеет выбор конструкции двигателя. Для большинства производственных механизмов используются двигатели с горизонтальным расположением вала и лапами для его крепления к несущим конструкциям, а также с фланцевым креплением. Более совершенными являются встраиваемые двигатели, которые не имеют станины, подшипниковых щитов, а иногда и вала. Их монтируют в корпусах самих рабочих механизмов. Линейные двигатели применяются в механизмах с поступательным движением рабочего органа.

По конструктивному исполнению электрические машины имеют ряд высот оси вращения от 25 до 800 мм, стандартные длины валов: S (короткие), M (средние) и L (длинные), а также группы монтажных исполнений:

1 – машина на лапах с подшипниковыми щитами;

2 – машина на лапах с подшипниковыми щитами с фланцем на подшипниковом щите;

3 – машина без лап с подшипниковыми щитами с фланцем на подшипниковом щите;
4 – машина без лап с подшипниковыми щитами с фланцем на станине;
5 – машина без подшипниковых щитов (для установки в подшипники механизма);
6 – машина с подшипниковыми щитами и стояковыми подшипниками;
7 – машина со стояковыми подшипниками без подшипниковых щитов;
8 – машина с вертикальным валом;
9 – машины специального назначения.

По исполнению концов вала машины подразделяются на:

1 – без конца вала;
2 – с одним цилиндрическим концом вала;
3 – с двумя цилиндрическими концами вала;
4 – с одним коническим концом вала;
5 – с одним фланцевым концом вала;
6 – с двумя фланцевыми концами вала;
7 – с фланцевым концом вала со стороны привода и цилиндрическим на противоположной стороне;
8 – все прочие исполнения концов вала.

Между механическими свойствами электродвигателя и рабочего механизма должно быть определенное соответствие.

Механические характеристики рабочих механизмов могут быть объединены в три группы:

1) момент на валу остается постоянным – подъем;
2) степенная зависимость момента от частоты вращения – вентилятор, насос, компрессор;
3) постоянство мощности на валу (P – *const*) – токарный станок.

По виду связи с исполнительным органом рабочей машины электропривода подразделяются на *редукторный, безредукторный, маховиковый* и *электрогидравлический.*

Для удобства выбора электродвигателя момент рабочего органа приводят к моменту на валу электродвигателя.

Одним из основных факторов, определяющих выбор двигателя, являются мощность и характер нагрузки.

Мощность на валу электродвигателя

$$P = P' + \Delta P,$$

где $P' = P_{po}/i$ – мощность, приведенная к валу двигателя;
i – передаточное число;
ΔP – мощность потерь в передаче.

С учетом КПД (η) передачи мощность на валу и момент определяются

$$P = P_{po}/\eta\ ; \qquad M = M_{po}/\eta\ .$$

Номинальную угловую скорость Ω электродвигателя выбирают в зависимости от известного передаточного числа редуктора i_p и заданной угловой скорости Ω_{po} рабочего механизма $\Omega = \Omega_{po}\ i_p$.

Наилучшее значение соотношения номинальной угловой скорости двигателя и передаточного числа редуктора для данного механизма определяется путем сравнения нескольких технико-экономических показателей. Правильное определение этих параметров особенно важно для приводов, работающих в режимах частых пусков и торможений, так как это влияет на производительность механизма и потери энергии. Различают два режима работы электропривода: установившийся (статический) и переходный (динамический).

Наиболее надежным в системе электропривода является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Асинхронный двигатель с фазным ротором более громоздкий, дорогой, сложнее в управлении. Используется в режимах с частыми пусками и остановками, например в подъемно-транспортных механизмах.

Синхронные двигатели используются с механизмами, требующими постоянного момента, – компрессоры, насосы, вентиляторы.

Двигатели постоянного тока – частые пуски и остановы, глубокое регулирование скорости вращения.

В качестве примера приведена схема модификации выпускаемых асинхронных двигателей основного исполнения:

Электрические	– с повышенным скольжением; – с повышенным пусковым моментом; – многоскоростные; – однофазные; – частотно-регулируемые
Специализированные по конструкции	– встраиваемые; – со встроенным тормозом; – высокоточные; – редукторные; со встроенной температурной защитой
Специализированные по условиям окружающей среды	– тропические; – влагоморозостойкие; – химостойкие; – водостойкие погружные
Узкоспециализированные	– с фазным ротором; – балансирные

При выборе мощности двигателя исходят из того, что нагрузка на его валу изменяется во времени.

Для определения нагрузки в этих случаях строятся *нагрузочные диаграммы* – зависимости развиваемых двигателем момента и мощности от времени *M(t)* и *P(t)*.

В случае завышения номинальной мощности двигателя снижаются КПД и коэффициент мощности, что приводит к росту тока в обмотках, к перегреву двигателя и снижению срока его службы.

Продолжительный режим работы двигателя характеризуется такой длительностью, при которой его температура достигает своего установившегося значения. В таком режиме работают, например, приводы вентиляторов, насосов, преобразовательных установок.

В *повторно-кратковременном режиме* двигатель за время работы не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время паузы между включениями не успевает остыть до температуры окружающей среды. Такой режим работы характерен, например, для электроприводов подъемных кранов, лебедок, лифтов, циклических конвейеров и т.п. Время цикла при повторно-кратковременном режиме не должно превышать 10 мин. На это время рассчитывается тепловой режим двигателя при его конструировании.

При *кратковременном режиме работы* двигатель не успевает в рабочий период нагреться до установившейся температуры, а пауза столь длительна, что температура снижается до температуры окружающей среды. Такой режим работы характерен, например, для приводов шлюзов, вспомогательных механизмов электротермических установок, зажимов колонн металлорежущих станков и др.

В *продолжительном режиме* двигатель работает либо с неизменной нагрузкой, либо с изменяющейся во

времени нагрузкой. При постоянной нагрузке на валу номинальная мощность $P_н$ двигателя должна быть выбрана равной мощности $P_с$ нагрузки. В этом случае по каталогу выбирается двигатель, удовлетворяющий условию $P_н > P_с$

Если при продолжительном режиме работы нагрузка на валу двигателя изменяется, то для выбора мощности по нагреву используют методы средних потерь за цикл или эквивалентных величин: тока, момента и мощности.

Метод средних потерь заключается в нахождении $\Delta P_{ср}$ при заданном графике нагрузки и сравнении их с номинальными потерями $\Delta P_н$, на которые рассчитан двигатель при длительной работе.

Метод является поверочным, поскольку до выбора мощности двигателя его номинальные потери неизвестны и поэтому принимают ориентировочно мощность двигателя обычно на 10–30% больше мощности за цикл.

На практике для определения мощности двигателя пользуются нагрузочными диаграммами, представляющими собой зависимости момента или мощности от времени. Значение эквивалентной (среднеквадратичной) мощности двигателя определяют по формуле:

$$P_э = \sqrt{\frac{1}{T_ц} \cdot \sum_{i=1}^{n} P_i^2 t_i} \ ,$$

где n — число участков с различными значениями мощности P_i за цикл работы двигателя.

Условием правильного выбора мощности двигателя в этом случае будет $P_э \le P_н$

Метод эквивалентной мощности применяют для двигателей постоянного тока независимого возбуждения и

асинхронных двигателей, работающих при неизменной угловой скорости с редкими пусками и остановами.

Повторно-кратковременный режим (ПВ) работы двигателя характеризуется *продолжительностью включения.* $ПВ = (\Sigma t_р / T_ц)100$.

Для работы в повторно-кратковременном режиме выпускают специальные двигатели, рассчитанные на стандартные значения продолжительности включения: 15, 25, 40, 60%, на которые и следует ориентироваться при выборе двигателя по мощности для такого режима.

Если нагрузка за цикл не меняется, но $ПВ \neq ПВ_{ст}$, это означает, что двигатель выбран по мощности правильно: средняя мощность потерь за цикл при $ПВ$ не превышает среднюю мощность потерь за тот же цикл при $P_н$.

Условие выбора двигателя при этом принимает вид $\Delta P_н \geq \Delta P_1 (ПВ.ПВ_{ст})$.

Проверка предварительно выбранного двигателя по мощности проводится по формуле $P_н \geq P_1 \sqrt{ПВ / ПВ_{ст}}$.

Если при работе электропривода наблюдаются резкие колебания нагрузки, то следует проверить перегрузочную способность электродвигателя. Она определяется отношением максимального значения электромагнитного момента (критического) M_{max} к номинальному $M_н$ моменту: $M_{max} / M_н$.

Для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором она составляет – 1,7–2,5; для двигателя с фазовым ротором, синхронного и двигателя постоянного тока 2,0–2,5.

В настоящее время широкое распространение получил регулируемый электропривод выпускаемый комплектно, т.е. электродвигатель совместно с преобразователем.

Преобразовательные устройства на базе полупроводниковой техники служат для преобразования переменного напряжения (тока) в постоянное и наоборот, а также переменного напряжения (тока) одной частоты в переменное напряжение (ток) другой частоты. В преобразовательных устройствах используются средства, осуществляющие фильтрацию и стабилизацию тока и напряжения. Основными характеристиками являются коэффициент полезного действия, коэффициент мощности и другие энергетические характеристики.

По принципу действия статические преобразователи разделяются на:

- преобразователи с непосредственным преобразованием частоты;
- преобразователи частоты со звеном постоянного тока.

Наибольшее распространение в электроприводах нашли статические преобразователи со звеном постоянного тока, которые выгодно отличаются тем, что обеспечивают больший диапазон регулирования и могут регулировать частоту как вверх, так и вниз. На сегодняшний день существует и широко применяется достаточно большое количество схемотехнических решений статических преобразователей частоты со звеном постоянного тока, которые отличаются и схемами и элементной базой.

Статический преобразователь со звеном постоянного тока состоит из двух основных устройств:

- управляемого выпрямителя – УВ;
- автономного инвертора напряжения – АИН.

Кроме того, статический преобразователь содержит систему управления, состоящую из:

- блока управления выпрямителя – БУВ;
- блока управления инвертором – БУИ;
- блока задания скорости – БЗС.

Работа статического преобразователя осуществляется следующим образом. На вход управляемого выпрямителя поступает трехфазное переменное напряжение промышленной частоты. На выходе выпрямителя формируется постоянное напряжение, величина которого может плавно регулироваться с помощью БУВ. Это напряжение поступает на вход автономного инвертора напряжения. Последний за счет определенного алгоритма переключения полупроводниковых ключей, входящих в его состав, формирует на выходе трехфазное переменное напряжение, частота которого может плавно регулироваться с помощью БУИ. Блок задания скорости БЗС, воздействуя на блоки управления выпрямителя и инвертора, обеспечивает требуемое соотношение между действующим значением напряжения и его частотой.

В основу анализа электромагнитных процессов в преобразователях положены методы расчета линейных и нелинейных электрических цепей.

7. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Системы управления электроприводами подразделяются на два вида:

- разомкнутые системы, обеспечивающие автоматизацию процессов пуска, торможения, изменения скорости, защиту и т. д.;
- замкнутые системы, в которых используются обратные связи: по скорости, току, ЭДС и т. д.

Основным недостатком разомкнутых систем регулирования является невозможность обеспечения высокой точности регулирования выходных координат.

Для осуществления автоматического регулирования в замкнутых электроприводах необходимо измерить сигнал обратной связи, затем этот результат в виде напряжения сравнить (произвести алгебраическое суммирование) с заданным и направить результат сравнения к регулируемому объекту. Обычно энергии измерительного органа оказывается недостаточно для воздействия на регулирующий орган, поэтому возникает необходимость в применении усилительного устройства.

Обратные связи совместно с задающим – управляющим сигналом позволяют формировать статические и динамические характеристики электроприводов в соответствии с заданными технологическими требованиями. Обратные связи могут быть положительными и отрицательными, жесткими и гибкими, линейными и нелинейными. Обратные связи могут формировать сигналы (напряжения), пропорциональные значению или пропорциональные производной от значения напряжения, тока, частоты вращения, угла поворота и т. д. В этих случаях они называются жесткими или гибкими, положительными или отрицательными обратными связями соответственно по напряжению, току, частоте вращения, углу поворота и т.д.

Для осуществления управлением процессами пуска, реверса и торможения используются *релейные схемы*. Они выполняются как с контактными (реле, контакторы), так и с бесконтактными (логические элементы) электрическими аппаратами. Как правило, выпускаются в виде станций управления.

Требования к регулированию скорости зависят от особенностей технологических процессов и устройства рабочих машин. Поэтому электроприводы подразделяются по характеру изменения параметров: *регулируемый*

(когда параметры изменяются под воздействием управляющего воздействия); *нерегулируемый* (когда параметры изменяются только под воздействием возмущающих воздействий).

Способы регулирования частоты вращения могут быть разделены на две основные группы:

- параметрические способы;
- способы, связанные с применением регулируемых источников электрической энергии.

При параметрических способах регулирование частоты вращения осуществляется за счет изменения тех или иных параметров электродвигателей или их электрических цепей. Так, например, у двигателя постоянного тока параметрические способы регулирования сводятся к регулированию изменений сопротивления в цепи якоря и изменений магнитного потока. У асинхронных двигателей переменного тока параметрические способы осуществляются изменением активного сопротивления в цепи ротора, индуктивного сопротивления в цепи статора, фазного напряжения, переключением числа пар полюсов.

Существенным условием, определяющим выбор системы управления автоматизированного электропривода, является требование к регулированию скорости по показателям качества регулирования (диапазон, плавность, точность поддержания заданной скорости), а также к динамическим показателям качества процесса регулирования (быстродействие, перерегулирование и др.).

Для машин и механизмов, не требующих регулирования скорости, применяются электроприводы переменного тока с асинхронными и синхронными двигателями. Для механизмов, допускающих ступенчатое регулирование в 2–4 ступени и при небольшой мощности (до 50 кВт), возможно

использование многоскоростных двигателей с переключением числа пар полюсов.

К группе способов, основанных на применении регулируемых источников, относятся способы, требующие использования специальных генераторов или статических преобразователей. Так, в электроприводах постоянного тока используются способы регулирования изменением напряжения в цепи якоря с помощью систем «генератор – двигатель», «тиристорный преобразователь – двигатель». В электроприводах переменного тока с асинхронными двигателями используются способы регулирования на базе статических преобразователей частоты и каскадных установок, вводящих добавочную ЭДС в цепь ротора.

При требовании плавного регулирования скорости применяются системы непрерывного управления на постоянном или переменном токе. В зависимости от диапазона и требуемой точности регулирования эти системы могут быть разомкнутыми и замкнутыми.

Использование в современных электроприводах полупроводниковых преобразователей требует обеспечения электромеханической совместимости привода с механической частью машины. Пульсации тока, вызванные дискретностью работы преобразователей, могут вызвать пульсации момента, что неблагоприятно сказывается на механизмах, имеющих зубчатые передачи.

В быстродействующих тиристорных электроприводах используется программное управление скоростью машин и динамических моментов в переходных периодах.

В настоящее время в приводах используются преобразователи частоты переменного тока второго поколения на биполярных транзисторах с изолированным затвором. Они обеспечивают высокую частоту коммутации, и, следо-

вательно, минимальные потери в двигателе. Эта особенность дает возможность иметь 100% нагрузочную способность двигателя в диапазоне частот от 40 до 50 Гц. Пусковой момент, достигающий 180% от номинального момента двигателя, гарантирует его надежный пуск даже при полной нагрузке. Трехуровневое регулирование тока обеспечивает высокую нечувствительность двигателя к изменению нагрузки, что исключает возможность «опрокидывания». Высокая частота коммутации сводит к минимуму шум двигателя. Преобразователи частоты обеспечиваются предварительно программируемыми прикладными макропрограммами.

Таким образом, автоматизированный привод делится на:

- программно-управляемый;
- следящий, который отрабатывает перемещение исполнительного органа рабочей машины в соответствии с произвольно меняющимся сигналом;
- позиционный, предназначенный для регулирования положения исполнительного органа рабочей машины;
- адаптивный, автоматически избирающий структуру или параметры системы регулирования при изменении условий работы.

8. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ

Составление технических требований является одной из составных задач заказчика электрооборудования. На основании анализа изложенных выше факторов составляются технические требования и техническое задание для проектирования, состоящие из следующих разделов:

1. Назначение и область применения комплектного электропривода.
2. Технические характеристики электропривода.
   Они состоят из требований к мощности на валу электродвигателя, диапазону регулирования скорости вращения; требований по статической точности и динамическим характеристикам, времени переходного процесса при пуске и торможении. Оговариваются требования по параметрам и мощности питающей сети. При наличии тиристорного преобразователя оговариваются требования к коэффициенту мощности и коэффициенту нелинейных искажений. Приводятся требования, специфические для каждого типа машин и технологического процесса.
3. Требования по управлению, сигнализации, защите, диагностике.
   Приводятся требования по автоматизации управления электроприводом, формулируются требования по блокировкам, сигнализации, видам и характеристикам защит, диагностике. Определяется количество и характеристики пультов управления.
   Указываются вид и характеристики сигналов управления (аналоговые, дискретные, по току или напряжению), блокировок и установок защит и сигнализации.
4. Условия эксплуатации.
   На основании стандартов указываются требования по климатическим условиям (температура, влажность и т. д.), оговариваются требования по воздействию механических факторов (вибрация, удары, крен и т. д.). Оговариваются требования по исполнению защиты от

внешних воздействий, а также по условиям транспортировки и хранению оборудования.

5. Требования по надежности, ресурсу, обслуживанию и ремонту.

   К требованиям по надежности относятся: вероятность безотказной работы и средняя наработка на отказ для невосстанавливаемого оборудования; коэффициент готовности и среднее время восстановления восстанавливаемого оборудования. Приводятся ресурс и комплектность привода, порядок проведения регламентных и ремонтных работ.

6. Гарантии изготовителя.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Электроснабжение, электробезопасность

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Основные понятия электроснабжения

Система электроснабжения (СЭС) – совокупность устройств выработки, передачи, распределения и преобразования электроэнергии.

Совокупность электрических станций, подстанций и потребителей электроэнергии, связанных между собой линиями электропередач и электрическими сетями при общем оперативном централизованном управлении, носит название электроэнергетической системы.

Производство электрической энергии и ее потребление – процесс непрерывный и единый во времени. Электрическую энергию нельзя накапливать в больших количествах, не передавая ее потребителям. В каждый момент времени выработка электроэнергии должна соответствовать ее потреблению. Отдельные электростанции не могут обеспечить бесперебойную подачу электроэнергии. Поэтому по мере развития энергетики электрические станции объединяются в энергосистемы, соединяя их линиями электропередач.

Выработка электроэнергии осуществляется на ТЭЦ, ГЭС, АЭС и др.

Передача электроэнергии осуществляется воздушными и кабельными линиями электропередач (ЛЭП).

Шкала стандартных номинальных напряжений: .22, .38, .66, 3, 6, 10, 20, 35, 110, 150, 220, 330, 500, 750, 1150 кВ.

Сети низкого напряжения – до 1 кВ.

Сети высокого напряжения – свыше 1 кВ.

Распределение электроэнергии осуществляется с помощью распределительных подстанций (РП), распределительных устройств (РУ) при неоднократной трансформации напряжения.

Преобразование электроэнергии в энергию механическую осуществляется электродвигателями различного типа (асинхронными, синхронными, машинами постоянного тока). В тепловую энергию – электропечными установками, в световую – различными осветительными приборами.

Категории электроприемников

К **первой категории** относятся электроприемники, перерыв электроснабжения которых может вызвать опасность для жизни людей, поломку дорогостоящего оборудования, расстройство сложного технологического процесса. Перерыв допускается на время срабатывания устройств сетевой автоматики – автоматического повторного включения (АПВ) и автоматического включения резерва (АВР).

Ко **второй категории** относятся электроприемники, перерыв электроснабжения которых может вызвать массовый недовыпуск продукции, массовый простой рабочих. Перерыв электроснабжения допускается на время включения резерва обслуживающим персоналом.

К **третьей категории** относятся все остальные. Перерыв электроснабжения допускается на время ремонта.

Потребители 1-й и 2-й категории обязательно снабжаются электроэнергией от двух независимых источников питания по двум независимым, взаимно резервируемым ЛЭП. Потребители 3-й категории питаются от одного источника одной ЛЭП.

На практике получили распространение две основные схемы электроснабжения: *радиальная* и *магистральная*. При совместном использовании образуется смешанная система.

При радиальной схеме электроэнергия поступает по независимой питающей линии к каждому потребителю. Применяется для электропитания крупных сосредоточенных узлов нагрузки. Радиальная схема удобна в эксплуатации тем, что повреждение или ремонт линии отражается на работе только одного потребителя. Применяется для потребителей 1-й категории.

Магистральная схема предусматривает питание нескольких потребителей через одну или две параллельные линии с односторонним или двухсторонним питанием.

Смешанные схемы питания получили распространение на крупных предприятиях, имеющих различные группы электроприемников, как по мощности, так и по требованию к надежности.

Наиболее распространенная система электроснабжения горных предприятий – глубокий ввод, представляет собой систему с максимальным приближением высшего напряжения к электроприемникам и минимальным числом ступеней промежуточной трансформации.

Для выбора мощности трансформаторов определяют *расчетную* нагрузку предприятия.

При определении расчетной нагрузки учитывается, что не все приемники включены, а включенные приемники не всегда работают на полную мощность. Активная расчет-

ная мощность меньше суммы активных номинальных (установленных) мощностей.

$$P_p = K_c \sum P_н ,$$

где K_c – коэффициент спроса (берется из справочников). $K_c < 1$.

Расчетная реактивная мощность определяется через cos φ (tg φ).

$$Q_p = P_p \, tg\varphi_{\,ср.взв}$$

где $tg\varphi_{\,ср.взв}$ – средневзвешенный тангенс φ.

Полная расчетная мощность

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \ .$$

Мощность трансформатора для однотрансформаторной подстанции $S_т$ определяется из соотношения $S_т \geq S_p$.

Из ряда стандартных мощностей трансформаторов выбирается ближайшая большая

160, 250, 400, 630, 1000, 1600, 2500, 4000 кВА и т.д.

Мощность трансформаторов двухтрансформаторной подстанции $S_т$ определяется как $S_т \geq S_p / K_{доп}$.

$K_{доп}$ – коэффициент допустимой перегрузки ($K_{доп}$ = = 1.3 ÷ 1.4).

Сечения проводов и кабелей, питающих группу электроприемников, выбирают по расчетному току I_p, для отдельных электроприемников – по номинальному току $I_{ном}$.

$$I_p = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \cos\varphi} \quad I_{ном} = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \cos\varphi}$$

Каждому стандартному сечению кабеля соответствует определенный длительно допустимый ток.

Из справочников выбирают такое сечение провода или кабеля, которому соответствует допустимый ток, бли-

жайший больший расчетного. Такой выбор называется выбором по нагреву. Далее выбранный кабель следует проверить по потере напряжения.

ГОСТ 13109–97 допускает отклонения напряжения на зажимах электроприемников в пределах ± 5 % от $U_{ном}$. Следовательно, потери напряжения в кабелях не должны превышать указанной величины.

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I_p \cdot l(R_0 \cos\varphi + X_0 \sin\varphi) \le 0.05 \cdot U_{ном}.$$

Для улучшения технико-экономических показателей электропотребления используют *компенсацию реактивной мощности.* Коэффициент мощности (cos φ) показывает качество применения электроэнергии на предприятии. Его снижение приводит к повышению расхода электроэнергии и ее стоимости.

Естественные способы улучшения коэффициента мощности: полная загрузка силовых трансформаторов и электродвигателей или их замена на меньшую мощность в соответствии с нагрузкой; приведение системы электроснабжения к номинальному режиму; замена кабелей и проводников на большее сечение; замена асинхронного нерегулируемого электропривода на синхронный.

Искусственные способы улучшения коэффициента мощности: применение синхронных компенсаторов – синхронных двигателей работающих на холостом ходу (cos φ = = 0,966 ÷1,0), синхронные двигатели являются генераторами реактивной мощности с отдачей ее в сеть; применение статических конденсаторов.

В качестве дополнительного источника реактивной мощности, служащей для обеспечения потребителей реактивной мощностью сверх того количества, которое дают энергосистема и синхронные двигатели, имеющиеся на предприятии, устанавливаются конденсаторные батареи

(БК). Конденсаторные установки применяются при напряжении 6 ÷110 кВ, устанавливаются в специальной камере главной понизительной подстанции. Не требуют сложного ухода и обслуживания, имеют небольшой расход энергии, должны быть защищены максимально-токовой защитой и сблокированы с основным выключателем. Пожароопасны.

Поперечная компенсация реактивной мощности – БК включаются параллельно нагрузке. После включения емкости параллельно нагрузке величина cos φ увеличивается, ток электроприемников уменьшается, происходит разгрузка линии по току. На ту же величину разгружаются и генераторы энергосистемы, благодаря генерации реактивной мощности БК в месте установки электроприемников. Уменьшаются и потери в ЛЭП.

Для проектируемой сети снижение тока позволяет уменьшить сечение проводов, соответственно снижается установленная мощность трансформаторов.

Поперечная емкостная компенсация выполняется комплектными конденсаторными установками ККУ, которые устанавливаются рядом с трансформаторными подстанциями (ГПП).

Основные задачи при проектировании СЭС – выбор мощности трансформаторов, выбор сечений проводов и кабелей, расчет величин возможных коротких замыканий, выбор электрических аппаратов и устройств релейной защиты.

1. ВЛИЯНИЕ НА УРОВЕНЬ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ РЕЖИМОВ НЕЙТРАЛИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Причинами возникновения короткого замыкания могут быть: нарушение изоляции, происходящее вследствие ее несовершенства или посторонних причин (обрыв, удар молнии, попадание посторонних предметов), ошибки при ремонтных работах, включениях и отключениях электрооборудования.

Коротким замыканием (КЗ) называется нарушение нормальной работы электроустановки, вызванное замыканием фаз между собой или замыканием фазы на землю.

Короткие замыкания могут быть: трехфазные – возникающие при одновременном замыкании накоротко всех трех фаз; двухфазные – возникающие при одновременном замыкании накоротко двух фаз; однофазные – возникающие при замыкании между фазой и землей.

Процесс протекания короткого замыкания слагается из двух режимов: переходного и установившегося.

Во время переходного режима в течение первых 0,01–0,2 с возникает ударный ток, который сопровождается электродинамическим эффектом, способным сорвать провода с изоляторов, повредить обмотки двигателей, трансформаторов.

По истечении первых 0,2 с устанавливается разрывной ток и сеть должна быть отключена автоматической защитой.

Установившийся режим возникает при несрабатывании защиты, ведет к электротермическому эффекту.

Токи КЗ в современных мощных электросистемах могут достигать огромных значений (10–100 тыс. ампер). Поэтому оборудование электроустановок должно обладать достаточной электродинамической (механической) и термической стойкостью к действию токов КЗ.

Несмотря на все меры, принимаемые при проектировании и эксплуатации, вероятность КЗ достаточно велика, поэтому для предотвращения опасных последствий КЗ необходим правильный выбор электрооборудования и устройств релейной защиты.

Знание величины возможных токов КЗ необходимо для выбора электрооборудования, проектирования элементов релейной защиты, выбора средств ограничения токов КЗ.

Как правило, в точке КЗ возникает электрическая дуга, которая образует переходное сопротивление. Для упрощения расчетов будем рассматривать только металлическое КЗ, т.е. без учетов переходного сопротивления.

При возникновении КЗ сопротивление цепи уменьшается скачком. Однако ток скачком увеличиться не может, так как сеть обладает индуктивностью. Ток КЗ можно представить как сумму апериодической ($i_а$) и периодической ($i_п$) составляющих.

$$i = i_а + i_п .$$

Результирующий ток в некоторые моменты времени может превосходить амплитуду установившегося тока. В конце первого полупериода ток достигает максимального значения (1,1 ÷ 1,8 I_{max}), называемого ударным током ($i_у$).

По ударному току проверяют на электродинамическую стойкость электроаппараты, шины, изоляторы. По

действующему значению установившегося тока проверяют аппараты на термическую стойкость.

Ограничение мощности короткого замыкания осуществляется с помощью бетонных реакторов (РБ, РБН). Они имеют очень малое активное сопротивление и достаточно большое индуктивное. Реакторы типа РБ устанавливаются на поверхности, в специальных камерах подстанций, в начале и конце линии электропередач.

Защита от токов короткого замыкания производится плавкими предохранителями и максимально-токовой защитой.

Допущения при расчете токов короткого замыкания: трехфазная сеть симметрична и сопротивления отдельных фаз равны между собой, не учитываются токи намагничивания трансформаторов, не учитываются активные сопротивления некоторых элементов сети (трансформаторов, реакторов, коммутационных аппаратов) из-за их малости по сравнению с индуктивными сопротивлениями, не учитывается сдвиг по фазе ЭДС различных источников питания, входящих в расчетную схему.

Для вычисления токов КЗ составляют расчетную схему, соответствующую режиму работы. В однолинейном изображении указываются источники питания (энергосистема, генераторы) и элементы сети (ЛЭП, трансформаторы, реакторы).

По расчетной схеме составляется схема замещения сети. Для этого все элементы сети заменяют соответствующими электросопротивлениями. Элементы обозначаются дробью (в числителе указывается порядковый номер, а в знаменателе – сопротивление).

В большинстве случаев схема сети содержит одну или несколько ступеней трансформации. Для составления эквивалентной схемы замещения выбирают основную или

базовую ступень трансформации и все электрические величины остальных ступеней приводят к напряжению основной ступени.

В основу расчета токов короткого замыкания положен метод определения суммарного сопротивления до точки короткого замыкания.

$$I_{кз}^{(3)} = \frac{U_н}{\sqrt{3}\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} R_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n} R_i\right)^2}}; \qquad I_{кз}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{кз}^{(3)}.$$

2. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

Компенсация реактивной мощности

Коэффициент мощности (cos φ) показывает качество применения электроэнергии на предприятии. Его снижение приводит к повышению расхода электроэнергии и ее стоимости.

Естественные способы улучшения коэффициента мощности: полная загрузка силовых трансформаторов и электродвигателей или их замена на меньшую мощность в соответствии с нагрузкой; приведение системы электроснабжения к номинальному режиму; замена кабелей и проводников на большее сечение; замена асинхронного нерегулируемого электропривода на синхронный.

Искусственные способы улучшения коэффициента мощности: применение синхронных компенсаторов – синхронных двигателей работающих на холостом ходу (cos φ = = 0,966 ÷ 1,0) синхронные двигатели являются генераторами реактивной мощности, с отдачей ее в сеть; применение статических конденсаторов.

В качестве дополнительного источника реактивной мощности, служащей для обеспечения потребителей реактивной мощностью, сверх того количества, которое дает энергосистема и синхронные двигатели, имеющиеся на предприятии, устанавливаются конденсаторные батареи

(БК). Конденсаторные установки применяются при напряжении 6 ÷110 кВ, устанавливаются в специальной камере главной понизительной подстанции. Не требуют сложного ухода и обслуживания, имеют небольшой расход энергии, должны быть защищены максимально-токовой защитой и сблокированы с основным выключателем. Пожароопасны.

Поперечная компенсация реактивной мощности – БК включаются параллельно нагрузке.

После включения емкости параллельно нагрузке величина cos φ увеличивается, ток электроприемников уменьшается, происходит разгрузка линии по току. На ту же величину разгружаются и генераторы энергосистемы, благодаря генерации реактивной мощности БК в месте установки электроприемников. Уменьшаются и потери в ЛЭП.

Для проектируемой сети, снижение тока позволяет уменьшить сечение проводов, соответственно снижается установленная мощность трансформаторов.

Поперечная емкостная компенсация выполняется комплектными конденсаторными установками ККУ, которые устанавливаются рядом с трансформаторными подстанциями (ГПП).

ЭЛЕКТРОНИКА

ВВЕДЕНИЕ

Электроника – отрасль науки и техники, изучающая:

- физические явления и процессы в полупроводниковых приборах;
- электрические характеристики и параметры полупроводниковых приборов;
- свойства устройств и систем, основанных на применении полупроводниковых приборов.

Самые важные исторические моменты в развитии электроники отмечаются следующими датами:

1885 г. – Дж. Максвелл разработал теорию электромагнитных волн;

1883 г. – Т. Эдисон открыл термоэлектронную эмиссию;

1886 г. – Г. Герц открыл электромагнитные волны, годом позже – фотоэмиссию;

1897 г. – Дж. Томсон открыл электрон;

1906 г. – Л. де Форест изобрел триод;

1948 г. – У. Шокли, У. Браттейн и Дж. Бардин изобрели транзистор.

Основные направления развития электроники:

Интегральная микроэлектроника – разработка и внедрение методов предельного уменьшения физических размеров элементов микросхемы, что приводит к увеличению функциональных возможностей микросхем, повышению их

надежности и быстродействия, снижению энергопотребления; внедрение микропроцессорной техники в самые различные производственные процессы.

Функциональная электроника – создается на основе физической интеграции, т.е. когда функциональные свойства диодов, транзисторов реализуются за счет атомарных, межмолекулярных связей.

Оптоэлектроника – основана на использовании процессов преобразования электрических сигналов в оптические и наоборот, преимущества – неисчерпаемые возможности повышения рабочих частот и использование принципа параллельной обработки информации.

1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

p-n-переход и его свойства

Действие полупроводниковых приборов основано на использовании свойств *полупроводников*. Полупроводники занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. К полупроводникам относятся элементы IV группы периодической системы элементов Д.И. Менделеева, которые на внешней оболочке имеют четыре валентных электрона. Типичные полупроводники – Ge (германий) и Si (кремний).

Чистые полупроводники кристаллизуются в виде решетки (рис. 87а). Каждая валентная связь содержит два электрона, оболочка атома имеет восемь электронов, и атом находится в состоянии равновесия. Чтобы «вырвать» электрон в зону проводимости, необходимо затратить большую энергию.

Чистые полупроводники обладают высоким удельным сопротивлением (от 0,65 Ом·м до 10^8 Ом·м). Для снижения высокого удельного сопротивления чистых полупроводников в них вводят примеси, такой процесс называется *легированием*, а соответствующие полупроводниковые материалы – *легированными*. В качестве легирующих примесей применяют элементы III и V групп периодической системы элементов Д.И. Менделеева.

Элементы III группы имеют три валентных электрона, поэтому при образовании валентных связей одна связь оказывается только с одним электроном (рис. 87б). Такие полупроводники обладают дырочной электропроводностью, так как в них основными носителями заряда являются *дырки*. Под дыркой понимается место, не занятое электроном, которому присваивается положительный заряд. Такие полупроводники также называются полупроводниками *p-типа*, а примесь, благодаря которой в полупроводнике оказался недостаток электронов, называется акцепторной.

Элементы V группы имеют пять валентных электронов, поэтому при образовании валентных связей один электрон оказывается лишним (рис. 87в). Такие полупроводники обладают электронной электропроводностью, так как в них основными носителями заряда являются электроны. Они называются полупроводниками *n-типа*, а примесь, благодаря которой в полупроводнике оказался избыток электронов, называется *донорной*.

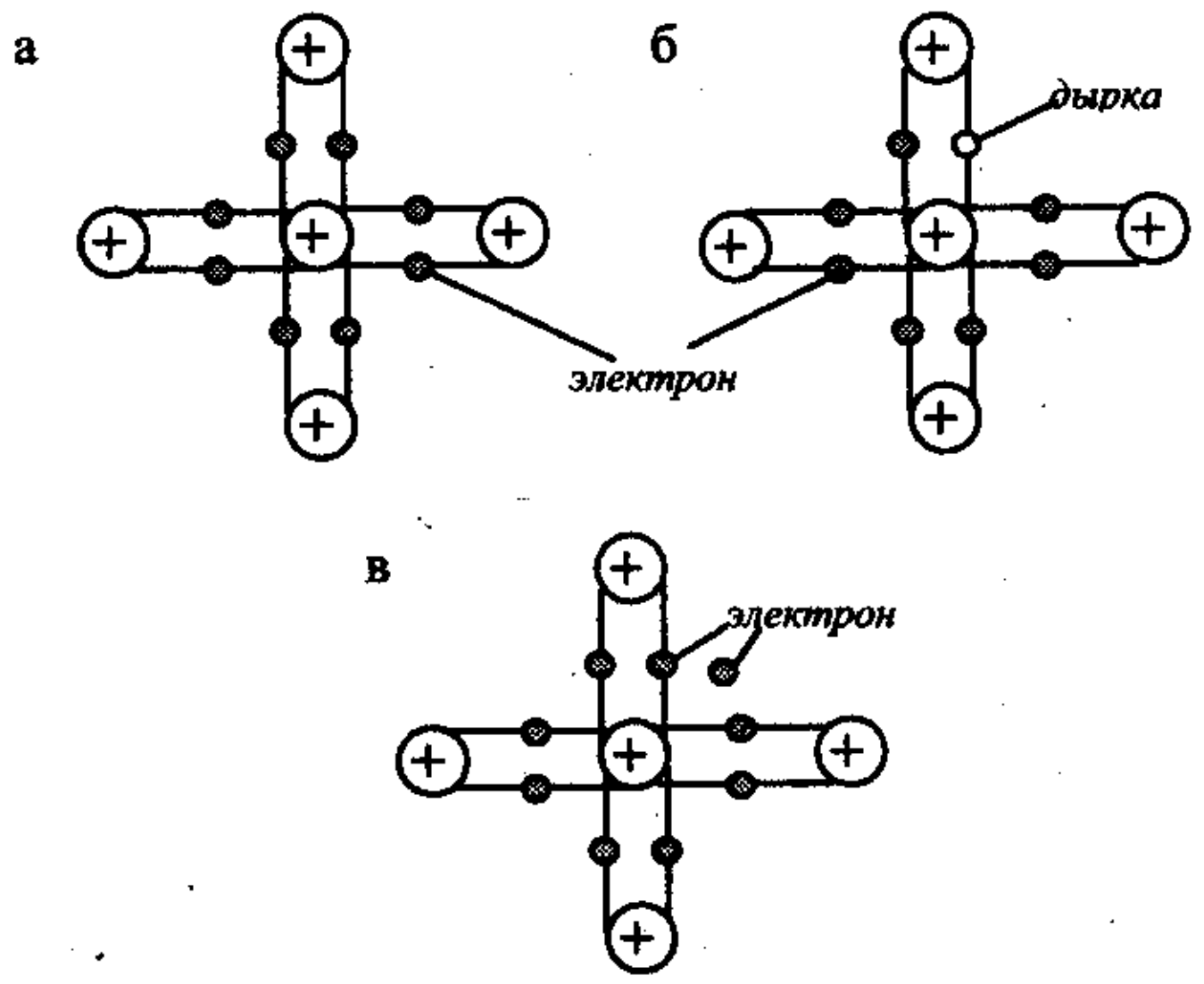


Рис. 87. Фрагмент решетки: а) чистого полупроводника; б) полупроводника с акцепторной примесью; в) полупроводника с донорной примесью

Удельное электрическое сопротивление легированного полупроводника существенно зависит от концентрации примесей. При концентрации примесей $10^{20} \div 10^{21}$ на 1 см^3 вещества оно может быть снижено до $5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м для германия и $5 \cdot 10^{-5}$ Ом·м для кремния.

Основное значение для работы полупроводниковых приборов имеет электронно-дырочный переход, который называют *p-n-переходом* (область на границе двух полупроводников, один из которых имеет дырочную, а другой – электронную электропроводность).

На практике p-n-переход получают введением в полупроводник дополнительной легирующей примеси. Например, при введении донорной примеси в определенную часть полупроводника p-типа в нем образуется область полупроводника n-типа, граничащая с полупроводником p-типа.

Схематически образование p-n-перехода при соприкосновении двух полупроводников с различными типами электропроводности показано на рис. 88. До соприкосновения в обоих полупроводниках электроны, дырки, ионы были распределены равномерно (рис. 88а).

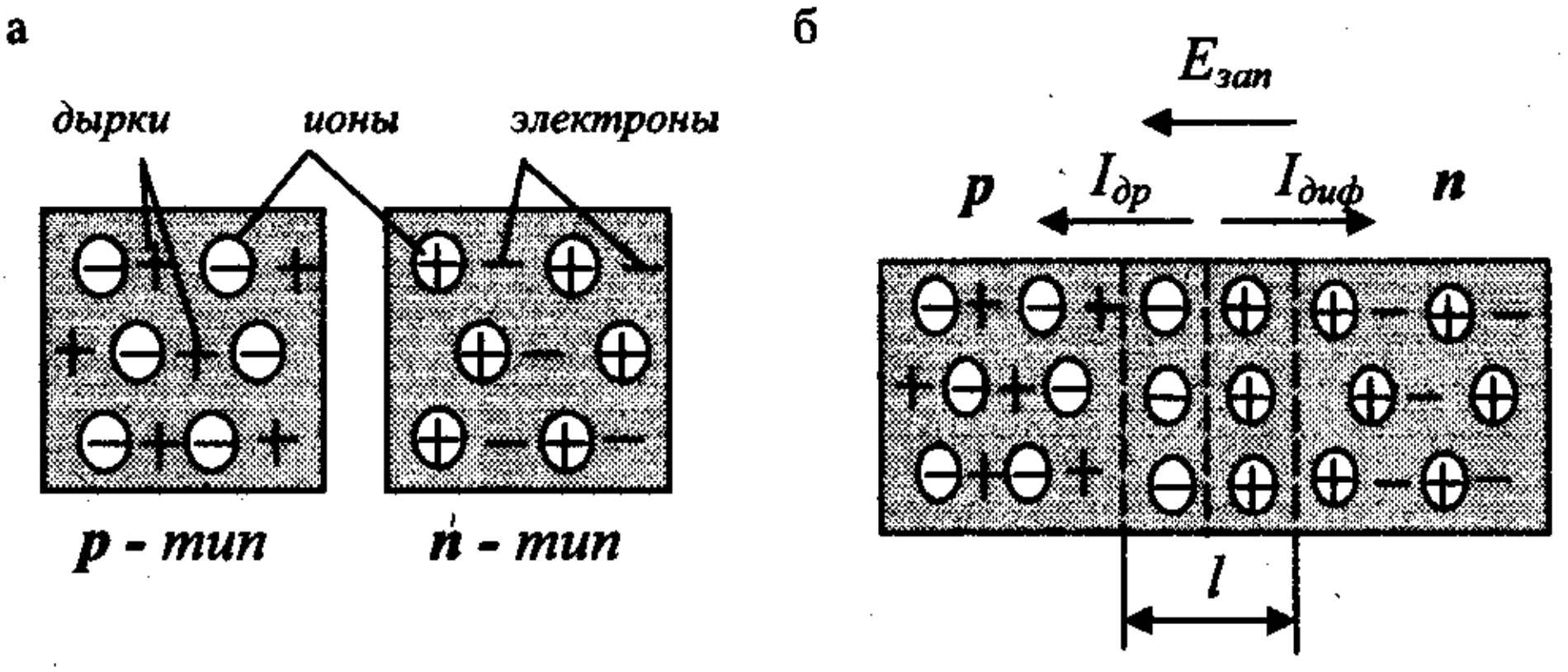


Рис. 88. Образование p-n-перехода: распределение носителей заряда в полупроводниках с различными типами электропроводности до соприкосновения (а); после соприкосновения (б)

При соприкосновении полупроводников в пограничном слое происходит *рекомбинация* (воссоединение) электронов и дырок. Свободные электроны из зоны полупроводника n-типа занимают свободные уровни в валентной зоне полупроводника p-типа. В результате вблизи границы двух полупроводников образуется слой, лишенный подвижных носителей заряда и поэтому обладающий высоким удельным сопротивлением, – так называемый *запирающий слой* (рис. 88б). Толщина запирающего слоя l обычно не превышает нескольких микрометров.

Расширению запирающего слоя препятствуют неподвижные ионы донорных и акцепторных примесей, которые образуют на границе полупроводников двойной электрический слой. Этот слой определяет контактную разность потенциалов $\Delta\varphi_к$ на границе полупроводников (рис. 89). Возникшая разность потенциалов создает в запирающем слое электрическое поле напряженностью $E_{зап}$, препятствующее как переходу электронов из полупроводника n-типа в полупроводник p-типа, так и переходу дырок в полупроводник n-типа. В то же время электроны могут свободно двигаться из полупроводника p-типа в полупроводник n-типа, как и дырки из полупроводника n-типа в полупроводник p-типа. Таким образом, контактная разность потенциалов препятствует движению *основных носителей заряда* и не препятсвует движению *неосновных носителей заряда*. Однако при движении через p-n-переход неосновных носителей (*дрейфовый ток* $I_{др}$) происходит снижение контактной разности потенциалов, что позволяет некоторой части основных носителей, обладающих достаточной энергией, преодолеть потенциальный барьер, обусловленный контактной разностью потенциалов. Появляется *диффузионный ток* $I_{диф}$, который направлен навстречу дрейфовому току $I_{др}$, т.е. возникает динамическое равновесие, при котором $I_{др} = I_{диф}$.

Если к p-n-переходу приложить внешнее напряжение $U_{обр}$, которое создает в запирающем слое электрическое поле напряженностью $E_{вн}$, совпадающее по направлению с полем неподвижных ионов напряженностью $E_{зап}$ (рис. 90а), то это приведет к расширению запирающего слоя, так как носители заряда уйдут от контактной зоны. При этом сопротивление p-n-перехода велико, ток через него мал, так как обусловлен движением неосновных носителей заряда. В этом случае ток называют *обратным* $I_{обр}$, а p-n-переход – *закрытым*.

При противоположной полярности источника напряжения (рис. 90б) внешнее поле направлено навстречу полю двойного электрического слоя, толщина запирающего слоя уменьшается. Сопротивление p-n-перехода резко снижается и возникает сравнительно большой ток. В этом случае ток называют *прямым* $I_{пр}$, а p-n-переход – *открытым*.

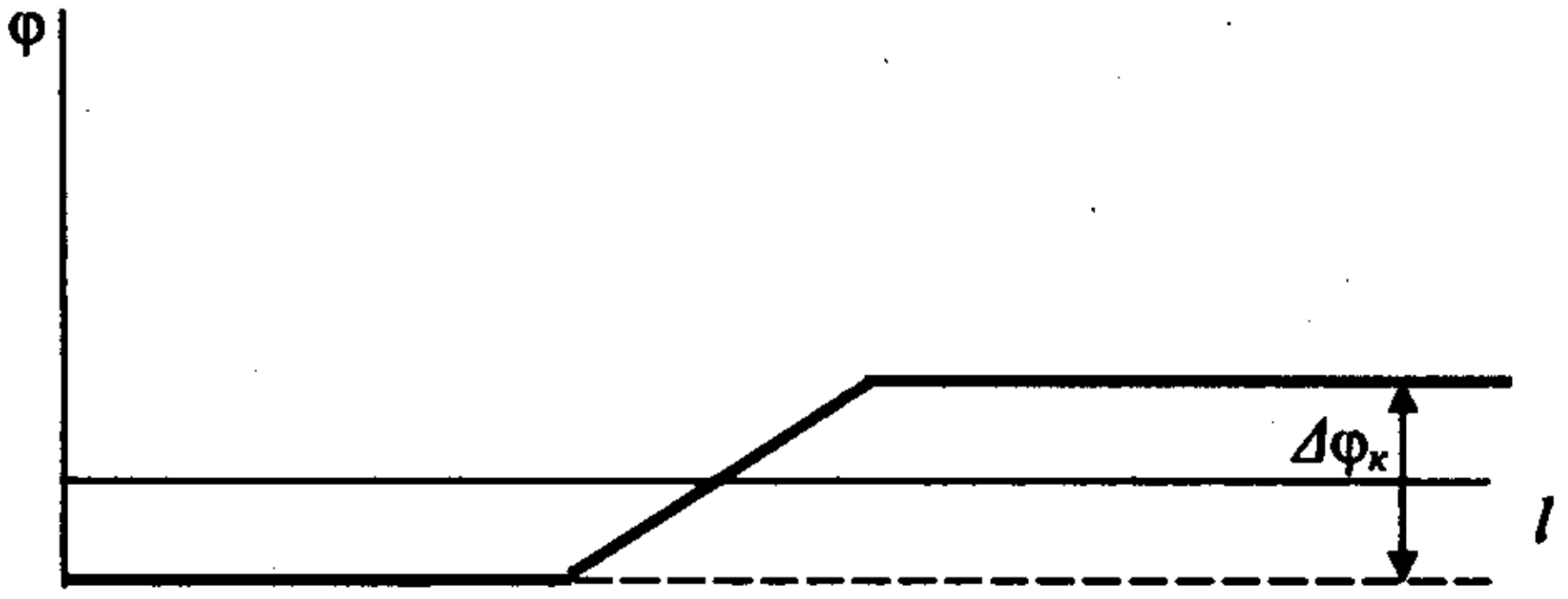


Рис. 89. Образование контактной разности потенциалов на границе полупроводников разных типов электропроводности

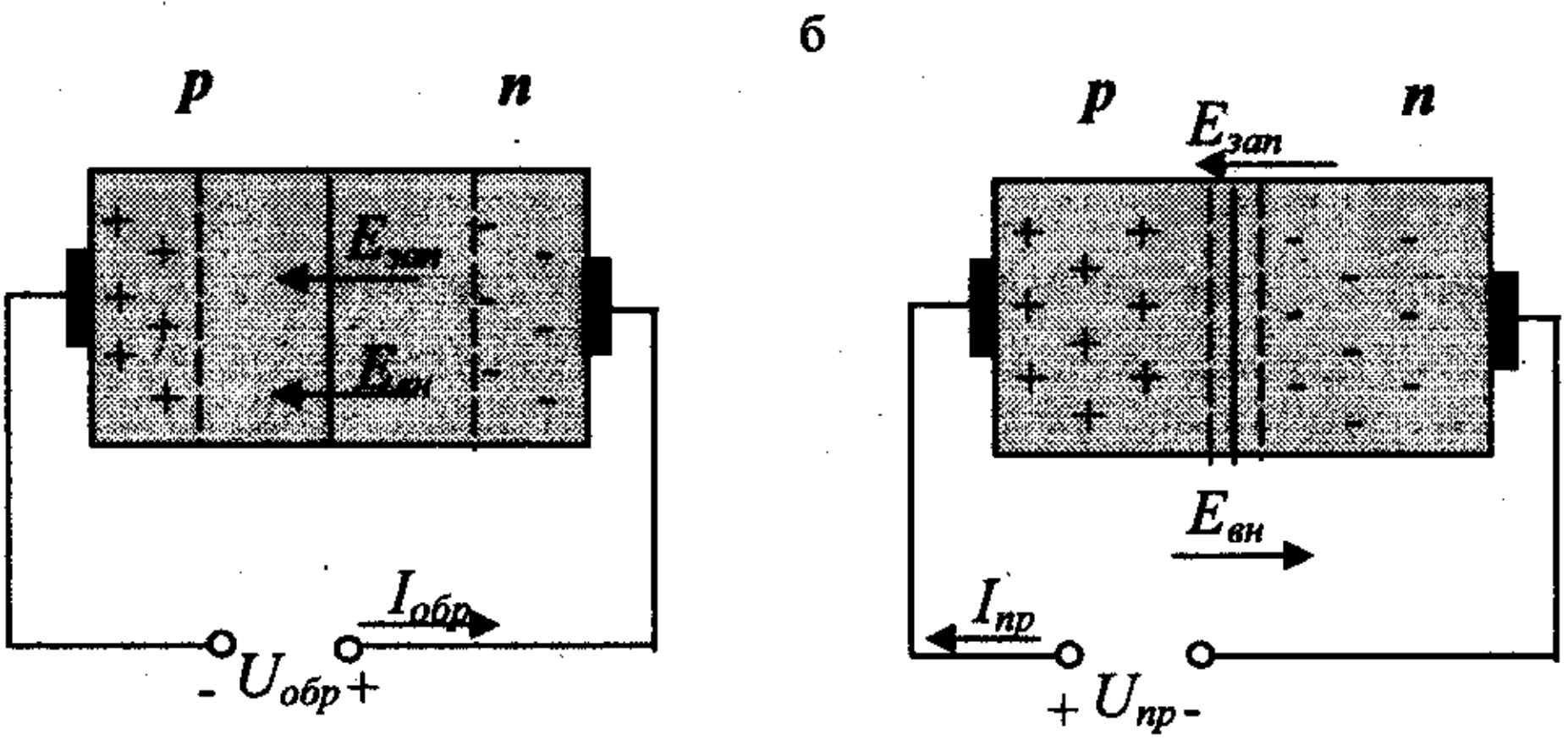
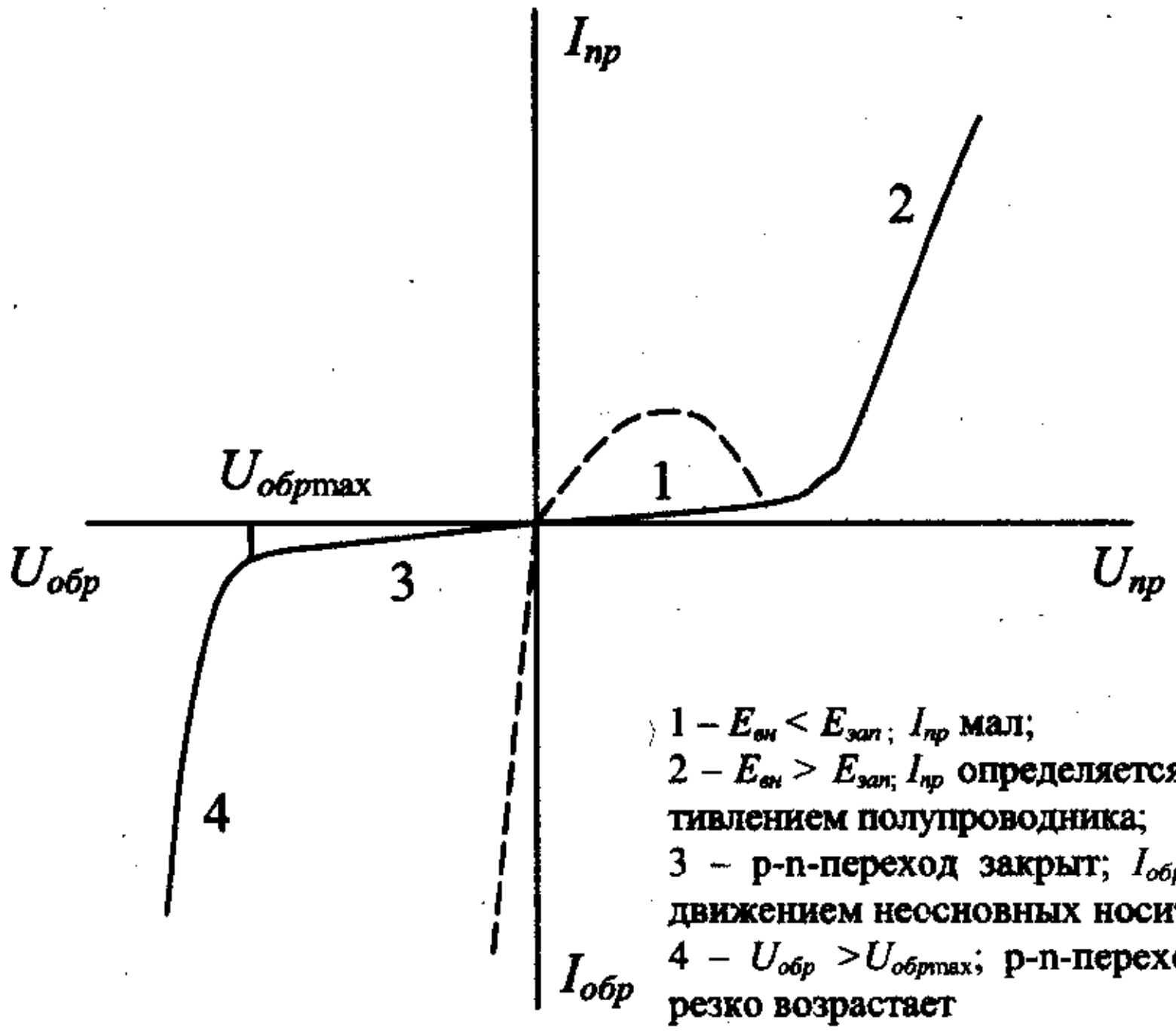


Рис. 90. p-n-переход во внешнем электрическом поле:
а) к p-n-переходу приложено обратное напряжение;
б) к p-n-переходу приложено прямое напряжение

На рис. 91 показана вольт-амперная характеристика p-n-перехода. Пробой p-n-перехода связан с тем, что при движении через p-n-переход под действием электрического поля неосновные носители заряда приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации атомов полупроводника. В переходе начинается лавинообразное размножение носителей заряда, что приводит к резкому увеличению обратного тока через p-n-переход при почти неизменном обратном напряжении. Этот вид электрического пробоя называют *лавинным*. Обычно он развивается в относительно широких p-n-переходах, которые образуются в слаболегированных полупроводниках.

В сильнолегированных полупроводниках ширина запирающего слоя меньше, что препятствует возникновению лавинного пробоя, так как движущиеся носители не приобретают энергии, достаточной для ударной ионизации. В таких полупроводниках возможно возникновение эффекта Зенера, когда при достижении критической напряженности электрического поля в p-n-переходе за счет энергии поля

появляются пары носителей электрон – дырка и существенно возрастает обратный ток p-n-перехода.



1 – $E_{вн} < E_{зап}$; $I_{пр}$ мал;
2 – $E_{вн} > E_{зап}$; $I_{пр}$ определяется только сопротивлением полупроводника;
3 – p-n-переход закрыт; $I_{обр}$ определяется движением неосновных носителей заряда;
4 – $U_{обр} > U_{обр max}$; p-n-переход пробит; $I_{обр}$ резко возрастает

Пунктиром показана характеристика сильнолегированных полупроводников, отличающаяся формой участка 1 и отсутствием участка 3, что связано с влиянием квантово-механического туннельного эффекта

Рис. 91. Вольт-амперная характеристика p-n-перехода

Для *электрического пробоя* характерна обратимость, заключающаяся в том, что первоначальные свойства p-n-перехода полностью восстанавливаются, если снизить напряжение на p-n-переходе. Благодаря этому электрический пробой используют в качестве рабочего режима в полупроводниковых диодах.

Если температура p-n-перехода возрастает в результате его нагрева обратным током и недостаточного теплоот-

вода, то усиливается процесс генерации пар носителей заряда. Это приводит к дальнейшему увеличению обратного тока и нагреву p-n-перехода, что может вызвать разрушение перехода. Такой процесс называют *тепловым пробоем*. Тепловой пробой разрушает p-n-переход.

В сильнолегированных полупроводниках может возникать квантово-механический *туннельный эффект*, который состоит в том, что при очень малой толщине запирающего слоя основные носители могут преодолевать запирающий слой без изменения энергии, что приводит к возрастанию тока на этих участках.

Закрытый p-n-переход обладает *электрической емкостью*, которая зависит от его площади и ширины, а также от диэлектрической проницаемости запирающего слоя.

Свойства p-n-перехода широко используются в полупроводниковых приборах.

Полупроводниковые диоды

Полупроводниковым диодом называют двухэлектродный полупроводниковый прибор, содержащий один электронно-дырочный p-n-переход.

По конструктивному исполнению полупроводниковые диоды разделяются на плоскостные и точечные. Плоскостные диоды представляют собой p-n-переход с двумя металлическими контактами, присоединенными к p- и n-областям. В точечном диоде вместо плоской используется конструкция, состоящая из пластины полупроводника и металлического проводника в виде острия. При сплавлении острия с пластиной образуется микропереход. По сравнению с плоскостным диодом падение напряжения на точеч-

ном в прямом направлении очень мало, ток в обратном направлении значительно меняется в зависимости от напряжения. Точечные диоды обладают малой межэлектродной емкостью.

Рассмотрим некоторые группы полупроводниковых диодов.

Выпрямительный полупроводниковый диод используется для выпрямления переменного тока.

Типичная вольт-амперная характеристика выпрямительного диода подобна характеристике, представленной на рис. 91. Основным свойством выпрямительного диода является большое различие сопротивлений в прямом и обратном направлениях, что обусловливает *вентильные свойства* выпрямительного диода, т.е. способность пропускать ток преимущественно в одном (прямом) направлении. Электрические параметры выпрямительного диода: прямое напряжение $U_{пр}$, которое нормируется при определенном прямом токе $I_{пр}$; максимально допустимый прямой ток $I_{пр\ max}$; максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр\ max}$; обратный ток $I_{обр}$, который нормируется при определенном обратном напряжении $U_{обр}$; межэлектродная емкость, сопротивление постоянному и переменному току.

Полупроводниковый стабилитрон – полупроводниковый диод, напряжение на котором в области электрического пробоя слабо зависит от тока.

Вольт-амперная характеристика стабилитрона приведена на рис. 92.

Как видно, в области пробоя напряжение на стабилитроне $U_{ст}$ лишь незначительно изменяется при больших изменениях тока стабилизации $I_{ст}$.

Основные параметры стабилитрона: напряжение на участке стабилизации $U_{ст}$; динамическое сопротивление на участке стабилизации $R_д = dU_{ст}/dI_{ст}$; минимальный ток ста-

билизации $I_{ст\,min}$; максимальный ток стабилизации $I_{ст\,max}$; температурный коэффициент напряжения на участке стабилизации ТК$U=(dU_{ст}/dT)\cdot 100$.

Стабилитроны используются для стабилизации и ограничения напряжения, а также в качестве источника опорного (эталонного) напряжения в прецизионной измерительной технике.

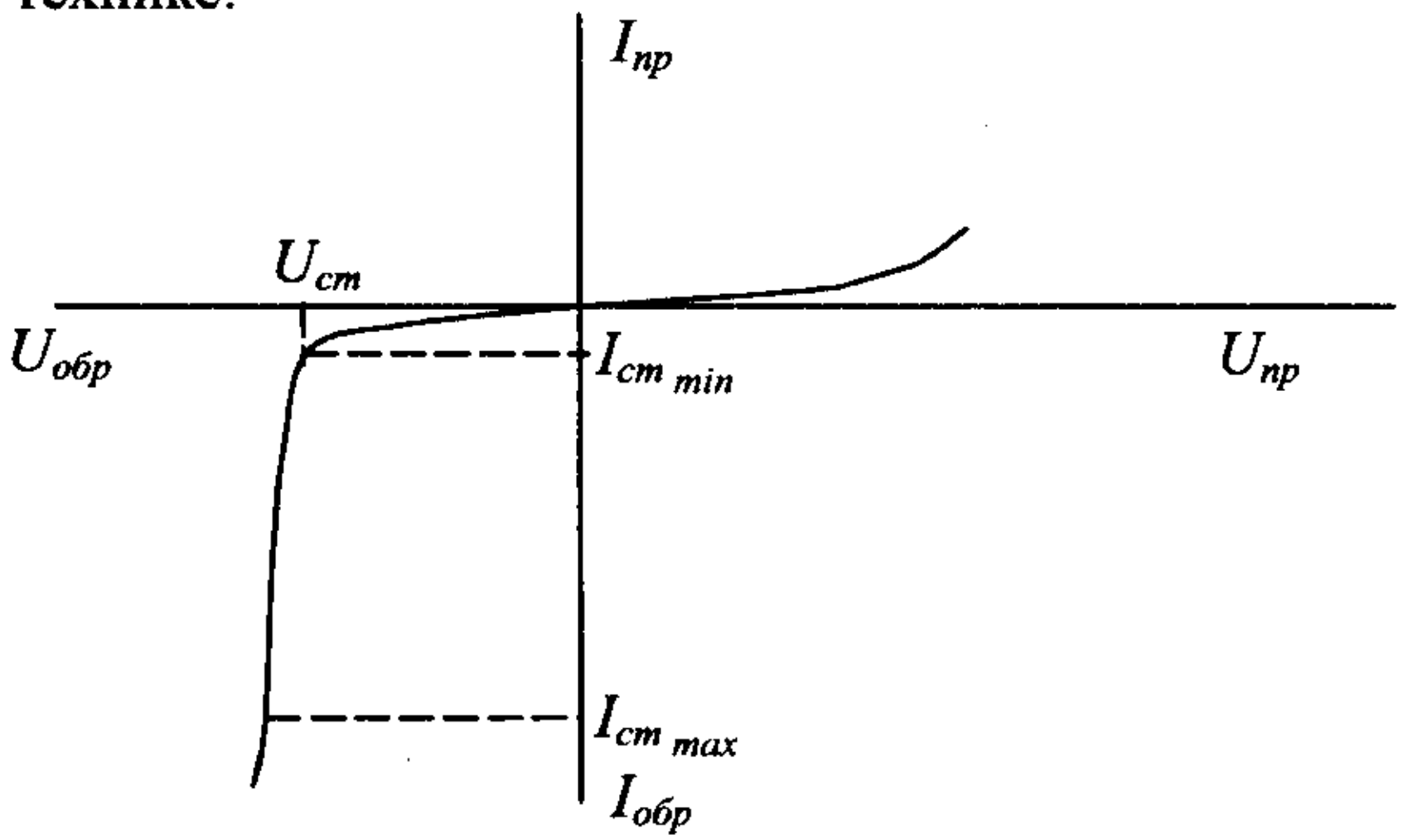


Рис. 92. Вольт-амперная характеристика стабилитрона

Туннельный диод – это полупроводниковый диод, в котором благодаря использованию высокой концентрации примесей возникает очень узкий барьер и наблюдается туннельный механизм переноса зарядов через p-n-переход. Характеристика туннельного диода имеет область отрицательного сопротивления, т. е. область, в которой положительному приращению напряжения соответствует отрицательное приращение тока (пунктирная линия на рис. 91).

Варикап – полупроводниковый диод, в котором используется зависимость емкости p-n-перехода от обратного напряжения, который предназначен для применения в качестве элемента с электрически управляемой емкостью.

Фотодиод – полупроводниковый диод, в котором в результате освещения p-n-перехода повышается обратный ток.

Светодиод – полупроводниковый диод, в котором в режиме прямого тока в зоне p-n-перехода возникает видимое или инфракрасное излучение.

Фотодиоды используются в солнечных батареях, применяемых на космических кораблях и в южных районах земного шара. Светодиоды находят применение для индикации в измерительных приборах, в наручных часах, микрокалькуляторах и других приборах.

Условные графические обозначения рассмотренных полупроводниковых диодов представлены на рис. 93.

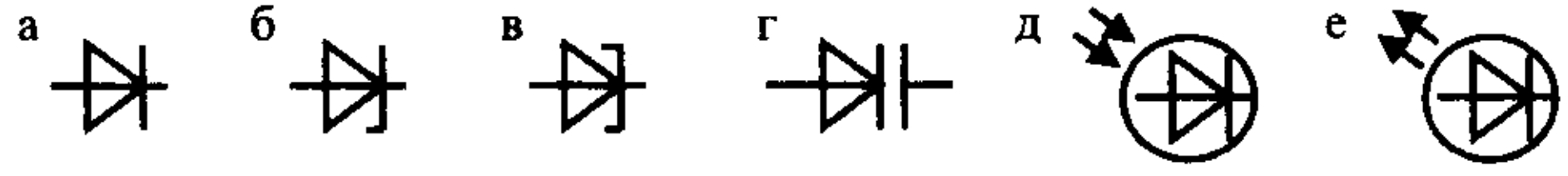


Рис. 93. Условные графические обозначения полупроводниковых диодов:
а – вентильного диода; б – стабилитрона; в – туннельного диода; г – варикапа; д – фотодиода; е – светодиода

Биполярные транзисторы

Транзистором называют трехэлектродный полупроводниковый прибор, служащий для усиления мощности электрических сигналов. Кроме усиления транзисторы используют для генерирования сигналов, их различных преобразований и решения других задач электронной техники.

Различают два типа транзисторов: *биполярные* и *полевые* (униполярные). Название биполярного транзистора

объясняется тем, что ток в нем определяется движением носителей зарядов двух знаков – отрицательных и положительных (электронов и дырок). Термин же «транзистор» происходит от английских слов *transfer* – переносить и *resistor* – сопротивление, т.е. в нем происходит изменение сопротивления под действием управляющего сигнала.

На рис. 94 показаны структура такого транзистора и его обозначение на схемах.

Биполярный транзистор состоит из трех слоев полупроводников типа «*p*» и «*n*», между которыми образуются два *p-n* перехода. В соответствии с чередованием слоев с разной электропроводностью биполярные транзисторы подразделяют на два типа: *p-n-p* (рис. 94а) и *n-p-n* (рис. 94б). У транзистора имеются три вывода (*электрода*): *эмиттер* (э), *коллектор* (к) и *база* (б). Эмиттер и коллектор соединяют с крайними областями (слоями), имеющими один и тот же тип проводимости, база соединяется со средней областью. Напряжение питания подают на переход «эмиттер – база» в прямом направлении, а на переход «база – коллектор» – в обратном направлении.

По диапазонам используемых частот транзисторы делятся на низкочастотные (до 3 МГц), среднечастотные (от 3 до 30 МГц), высокочастотные (от 30 до 300 МГц) и сверхвысокочастотные (свыше 300 МГц). По мощности транзисторы делятся на малой мощности (до 0,3 Вт), средней мощности (от 0,3 Вт до 1,5 Вт), большой мощности (свыше 1,5 Вт).

При подключении эмиттера транзистора типа *p-n-p* к положительному зажиму источника питания возникает эмиттерный ток $I_Э$ (рис. 95). Стрелкой указано движение носителей заряда. Дырки преодолевают переход и попадают в область базы, для которой дырки не являются основными носителями заряда. Дырки частично рекомбинируют с элек-

тронами базы. Так как напряжение питания коллектора во много раз (приблизительно в 20 раз) больше, чем напряжение питания базы, и конструктивно слой базы выполняется очень тонким, то электрическое сопротивление цепи базы получается высоким и ток, ответвляющийся в цепь базы $I_б$, оказывается незначительным. Большинство дырок достигают коллектор, образуя коллекторный ток $I_К$.

$$I_э = I_к + I_б, \quad \text{причем} \quad I_к = \alpha I_э,$$

где α – коэффициент передачи тока, практически $\alpha \cong 0{,}95 \div 0{,}995$.

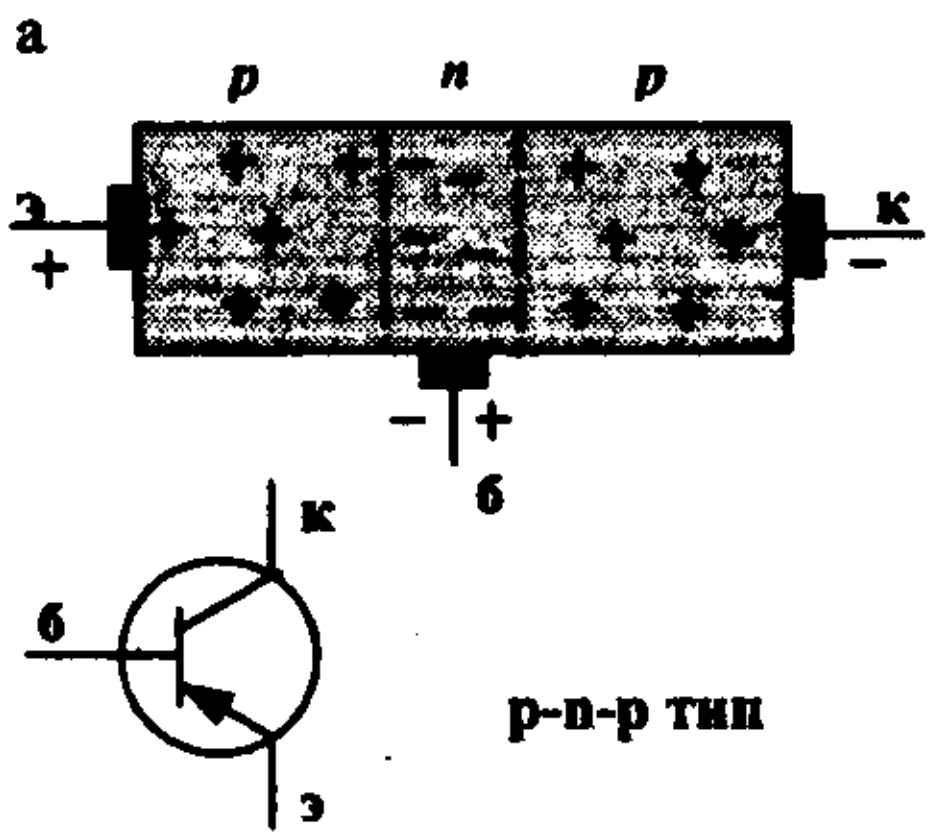
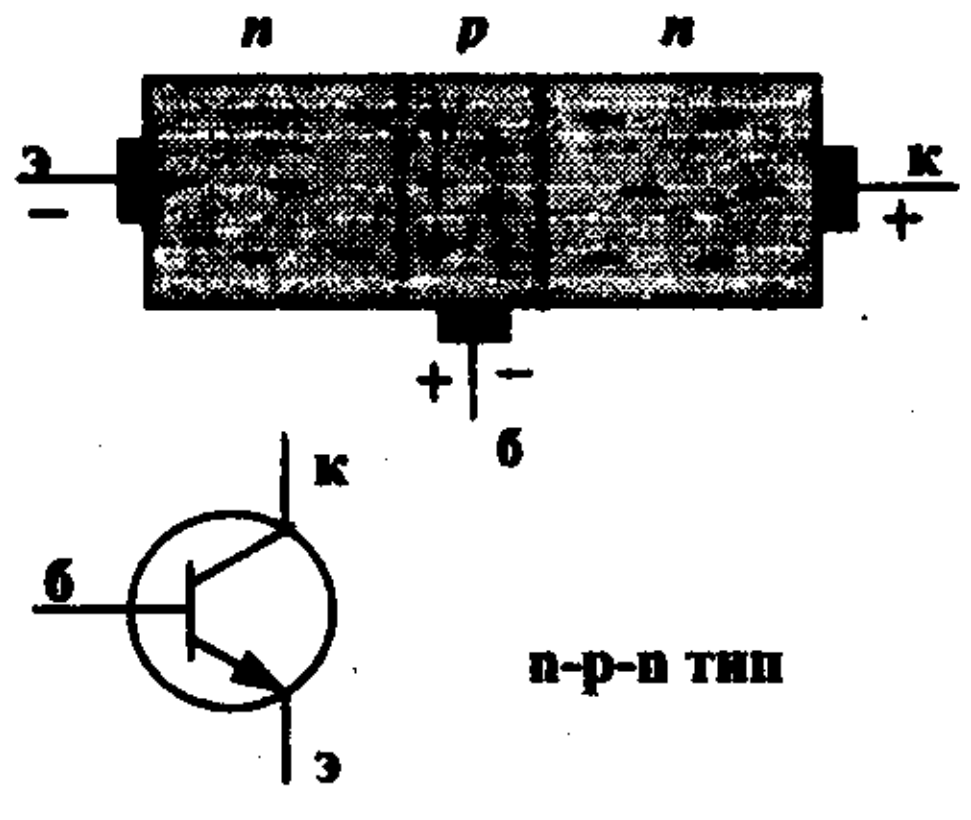


Рис. 94. Структура биполярного транзистора и его обозначение на схемах:
а) транзистора типа p-n-p;
б) транзистора типа n-p-n



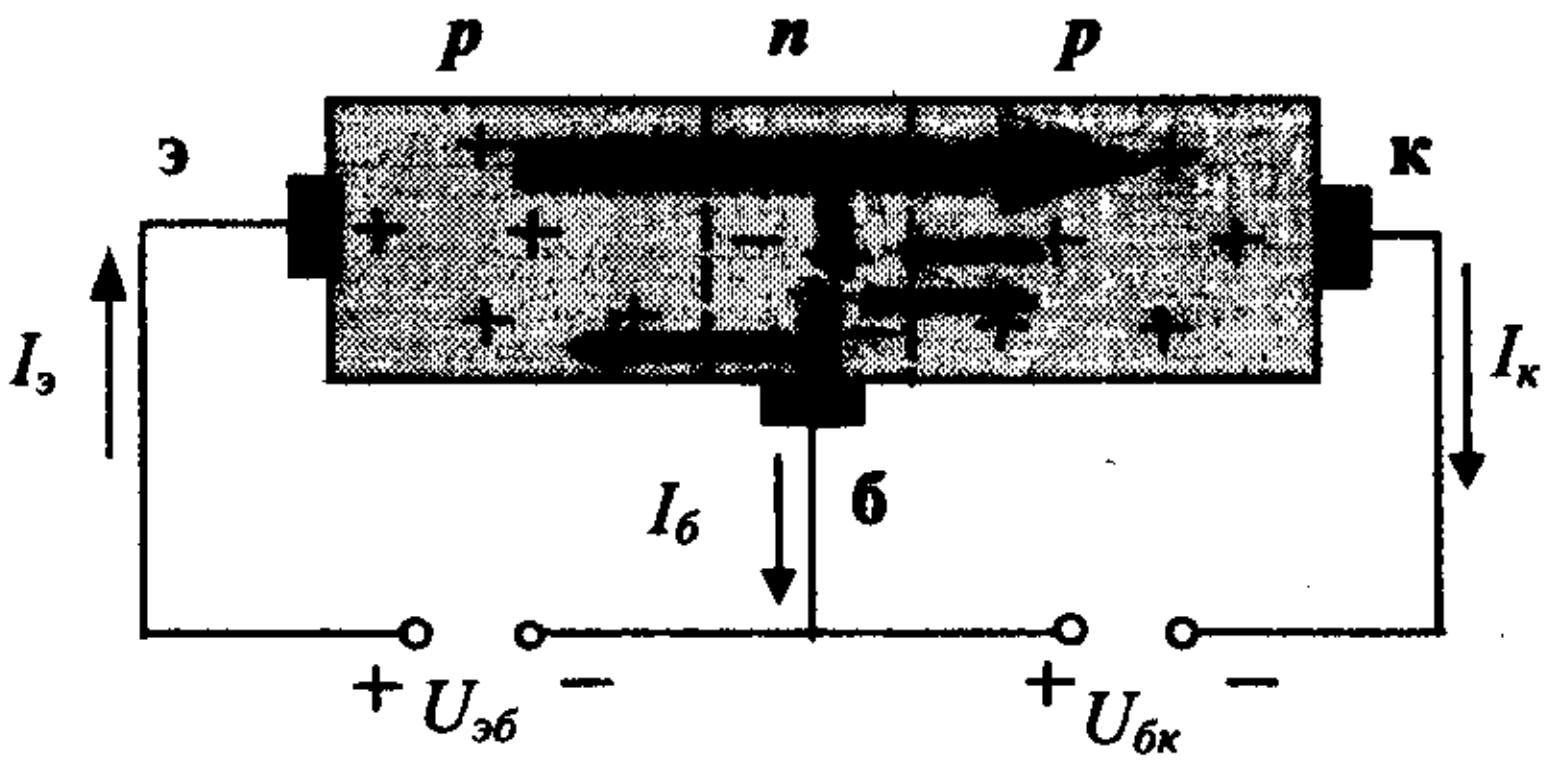


Рис. 95. Принцип действия биполярного транзистора

Ток коллектора $I_к$ превосходит ток базы $I_б$ от 20 до 200 раз. Это объясняет возможность усиления с помощью транзистора тока и, соответственно, мощности сигнала во много раз. Действительно, если подавать напряжение сигнала в цепь базы, то в соответствии с напряжением сигнала будет изменяться сопротивление *p-n*-перехода между эмиттером и базой. Это изменяющееся сопротивление включено в коллекторную цепь, что приведет к соответствующему изменению тока коллектора, который во много раз больше тока базы.

Если в коллекторную цепь включить сопротивление нагрузки, в нем будет выделяться мощность, во много раз бóльшая, чем мощность сигнала, подводимого в цепь базы. При этом следует иметь в виду, что мощность сигнала усиливается за счет энергии источников питания.

Принцип действия транзистора типа *n-p-n* точно такой же, как у рассмотренного выше транзистора *p-n-p*.

Вольт-амперные характеристики транзистора различаются в зависимости от схемы его включения: *с общим эмиттером (ОЭ), с общей базой (ОБ)* или *с общим коллектором (ОК)* (рис. 96).

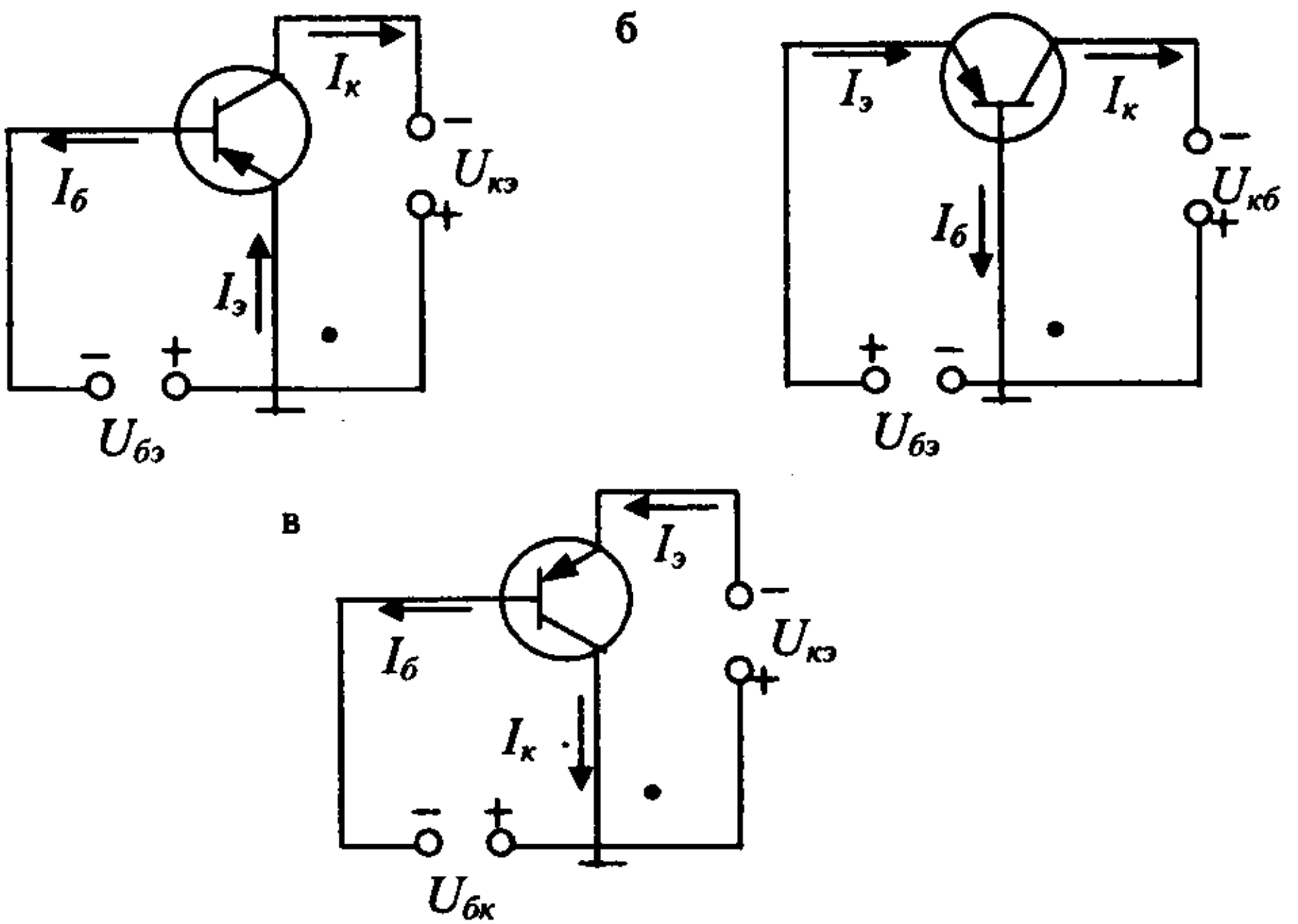


Рис. 96. Схемы включения транзистора: а) с общим эмиттером; б) с общей базой; в) с общим коллектором

Различают следующие основные вольт-амперные характеристики транзистора:

1. *Входная* – зависимость входного тока от входного напряжения при постоянном выходном напряжении

$$I_б = f(U_{бэ}) \text{ при } U_{кэ} = const \text{ для схемы с ОЭ}$$

$$I_э = f(U_{бэ}) \text{ при } U_{кб} = const \text{ для схемы с ОБ ;}$$

$$I_б = f(U_{бк}) \text{ при } U_{кэ} = const \text{ для схемы с ОК}$$

2. *Семейство выходных характеристик* – зависимость выходного тока от выходного напряжения при разных (фиксированных) значениях входного тока

$I_к = f(U_{кэ})$ при $I_б = const$ для схемы с ОЭ

$I_к = f(U_{кб})$ при $I_э = const$ для схемы с ОБ;

$I_э = f(U_{кэ})$ при $I_б = const$ для схемы с ОК

На рис. 97 представлены вольт-амперные характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

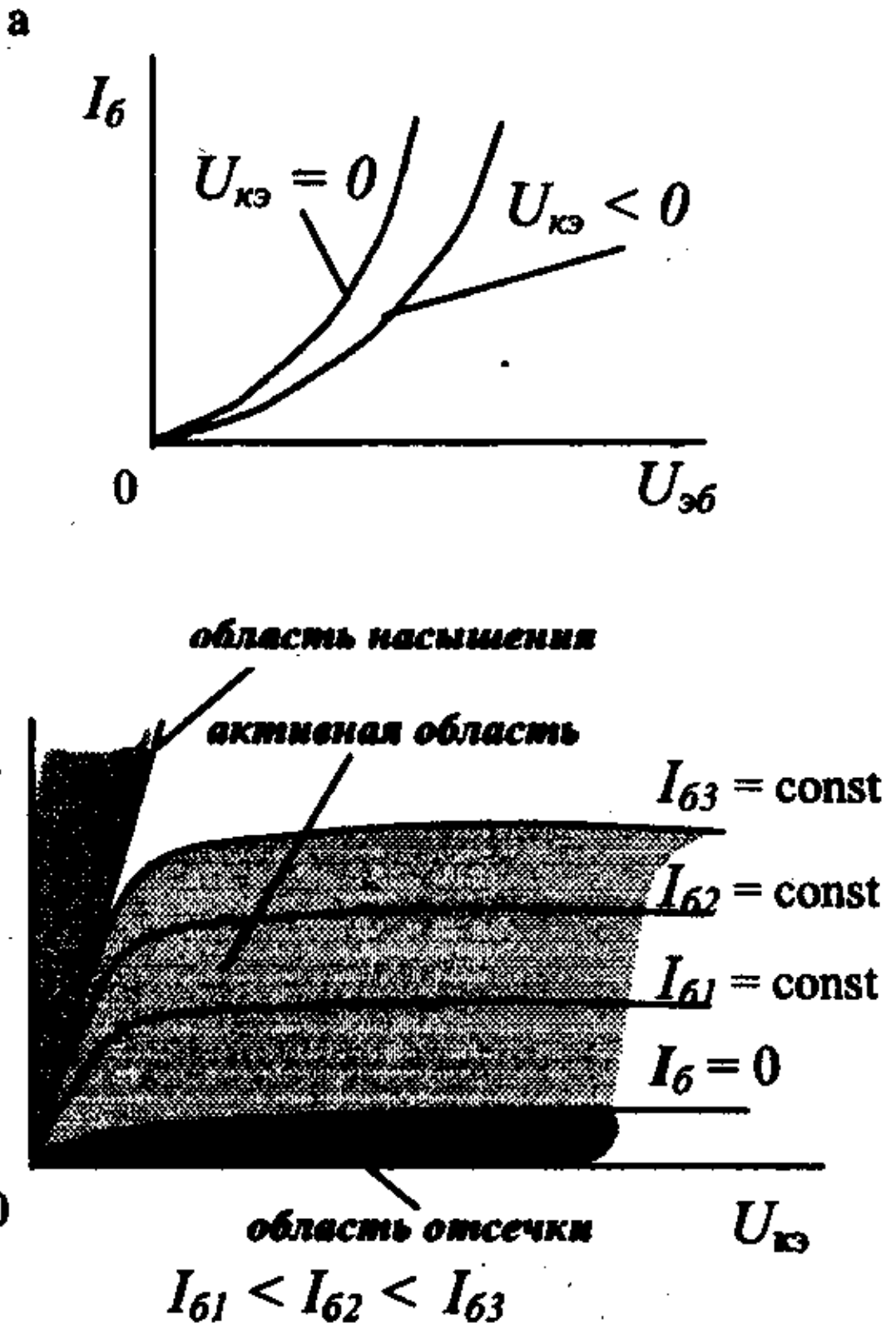


Рис. 97. Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора с общим эмиттером: входная (а) и семейство выходных (б)

В наиболее распространенных транзисторах небольшой мощности ток базы составляет десятки или сотни микроампер, напряжение на базе изменяется от нуля до не-

скольких десятых долей вольта. Коллекторный ток на выходных характеристиках транзисторов небольшой мощности изменяется от нуля до единиц или десятков миллиампер, напряжение на коллекторе – от нуля до одного-двух десятков вольт.

Свойства транзисторов характеризуются их параметрами, с помощью которых можно сравнивать качество транзисторов, решать задачи, связанные с применением транзисторов в различных схемах, и рассчитывать эти схемы.

h-параметры транзистора определяют, рассматривая транзистор как четырехполюсник, т.е. прибор, имеющий два входных и два выходных зажима. Они связывают входные и выходные токи и напряжения, справедливы только для нормального режима работы транзистора и малых амплитуд сигналов и могут быть определены экспериментально или по входной и выходным характеристикам.

h-параметры транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером:

Входное сопротивление транзистора (между базой и эмиттером) для переменного тока

$$h_{11} = \Delta U_{бэ} / \Delta I_{б} \qquad \text{при } U_{кэ} = const.$$

Для маломощных транзисторов $h_{11} = 1000 \div 10000$ Ом; для транзисторов средней и большой мощности – $h_{11} = 50 \div 1000$ Ом.

Коэффициент усиления по току

$$h_{21} = \Delta I_{к} / \Delta I_{б} \qquad \text{при } U_{кэ} = const.$$

Этот коэффициент изменяется от 20 до 200.

Выходная проводимость

$$h_{22} = \Delta I_{к} / \Delta U_{кэ} \qquad \text{при } I_{б} = const.$$

Для маломощных транзисторов $h_{22} \approx 10^{-6}$ См, а для транзисторов средней и большой мощности $h_{22} = 10^{-4} \div 10^{-6}$ См. Отметим, что выходную проводимость иногда заменяют выходным сопротивлением $R_{вых} = 1 / h_{22}$.

Иногда рассматривается *коэффициент обратной связи по напряжению*

$$h_{12} = \Delta U_{бэ} / \Delta U_{кэ} \qquad \text{при } I_б = const .$$

Величина $h_{12} \approx 2 \cdot 10^{-3} – 2 \cdot 10^{-4}$ и из-за малости часто не принимается во внимание.

Параметры биполярных транзисторов зависят от температуры окружающей среды.

Выделяют три области работы транзистора (рис. 97б). При работе транзистора как усилителя эмиттерный переход открыт, а коллекторный закрыт. Это *активная область* работы, в которой транзистор можно считать линейным активным элементом. Область, в которой оба перехода смещены в обратном направлении, называют *областью отсечки*. Область, в которой оба перехода смещены в проводящем направлении, называют *областью насыщения*.

Полевые транзисторы

Полевым называют транзистор, управляемый электрическим полем, или транзистор с управляемым каналом для тока.

В отличие от биполярных полевые транзисторы имеют высокое входное сопротивление и поэтому требуют очень малых мощностей для управления.

Ток в полевом транзисторе создается носителями заряда только одного знака (электронами или дырками), вследствие чего эти транзисторы часто называют *униполярными*.

Носители заряда в полевом транзисторе являются основными для активной области и его параметры не зави-

сят от времени жизни неосновных носителей (как у биполярных транзисторов). Это и определяет высокие частотные свойства и меньшую зависимость от температуры.

Изготавливают полевые транзисторы из кремния. В зависимости от электропроводности исходного материала различают транзисторы с *p-* и *n-каналами*.

Каналом считают центральную область транзистора. Электрод, из которого в канал поступают основные носители заряда, называют *истоком И*, а электрод, через который основные носители уходят из канала, – *стоком С*. Электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала, называют *затвором З*.

Полевые транзисторы подразделяются на два основных типа: с затвором в виде p-n-перехода и с изолированным затвором.

Структурная схема; схема включения и схемное изображение полевого транзистора с затвором в виде p-n-перехода показаны на рис. 98.

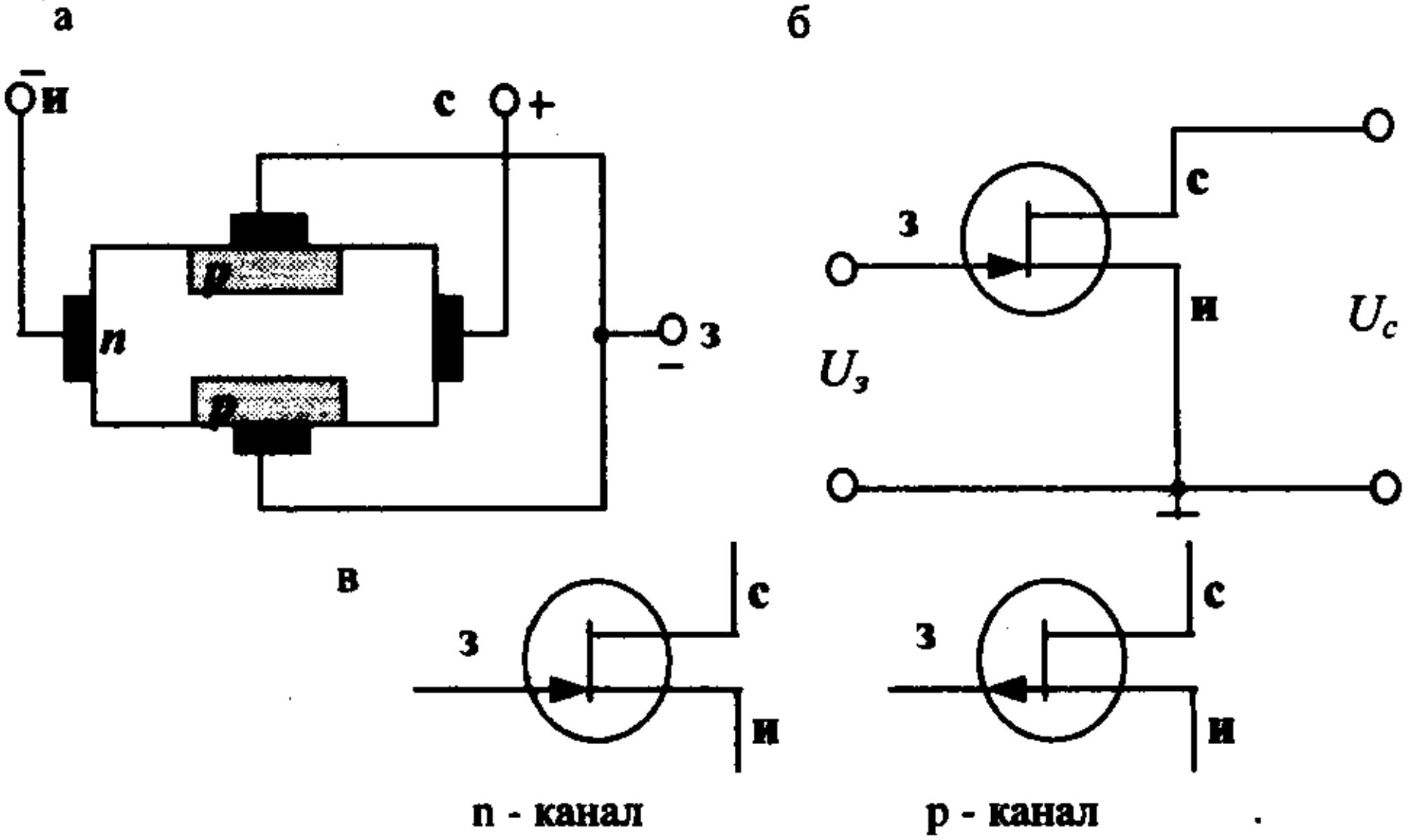


Рис. 98. Полевой транзистор с затвором в виде p-n-перехода: а) структурная схема; б) схема включения; в) схемное изображение

Полевой транзистор представляет собой пластину, например, *n*-типа, на верхней и нижней гранях которой создаются области с проводимостью противоположного типа, например, *p*-типа. Эти области электрически связаны, образуя единый электрод-затвор. Область с *n*-проводимостью, расположенная между *p*-областями; образует токовый канал. На торцевые поверхности пластины наносят контакты, образующие два других электрода И и С, к которым подключается источник питания U_c и при необходимости сопротивление нагрузки. Между каналом и затвором создаются два *p-n*-перехода. Ток протекает от истока к стоку по каналу, сечение которого зависит от затвора.

При увеличении отрицательного потенциала на затворе *p-n*-переходы запираются и расширяются практически за счет канала, сечение канала, а следовательно, и его проводимость, уменьшаются, ток через канал падает, (рис. 99а). При некотором $U_з = U_{зо}$, называемом *напряжением отсечки*, области *p-n*-переходов смыкаются по всей длине канала, сток и исток оказываются изолированными друг от друга, ток I_c равен нулю.

Если при $U_з = const$ увеличивать U_c, то ток через канал (I_c) возрастет (рис. 99б). При этом увеличивается падение напряжения на канале, которое способствует увеличению обратного напряжения на *p-n*-переходах, вызывая тем самым сужение канала. При некотором $U_c = U_{нас}$, называемом *напряжением насыщения*, канал настолько сужается, что дальнейшее увеличение U_c не увеличивает I_c.

Полевые транзисторы с изолированным затвором или МДП-транзисторы находят более широкое применение, так как имеют более простую конструкцию и обладают лучшими электрическими свойствами.

У МДП-транзисторов (металл – диэлектрик – полупроводник) между полупроводниковым каналом и металли-

ческим затвором расположен изолирующий слой диэлектрика.

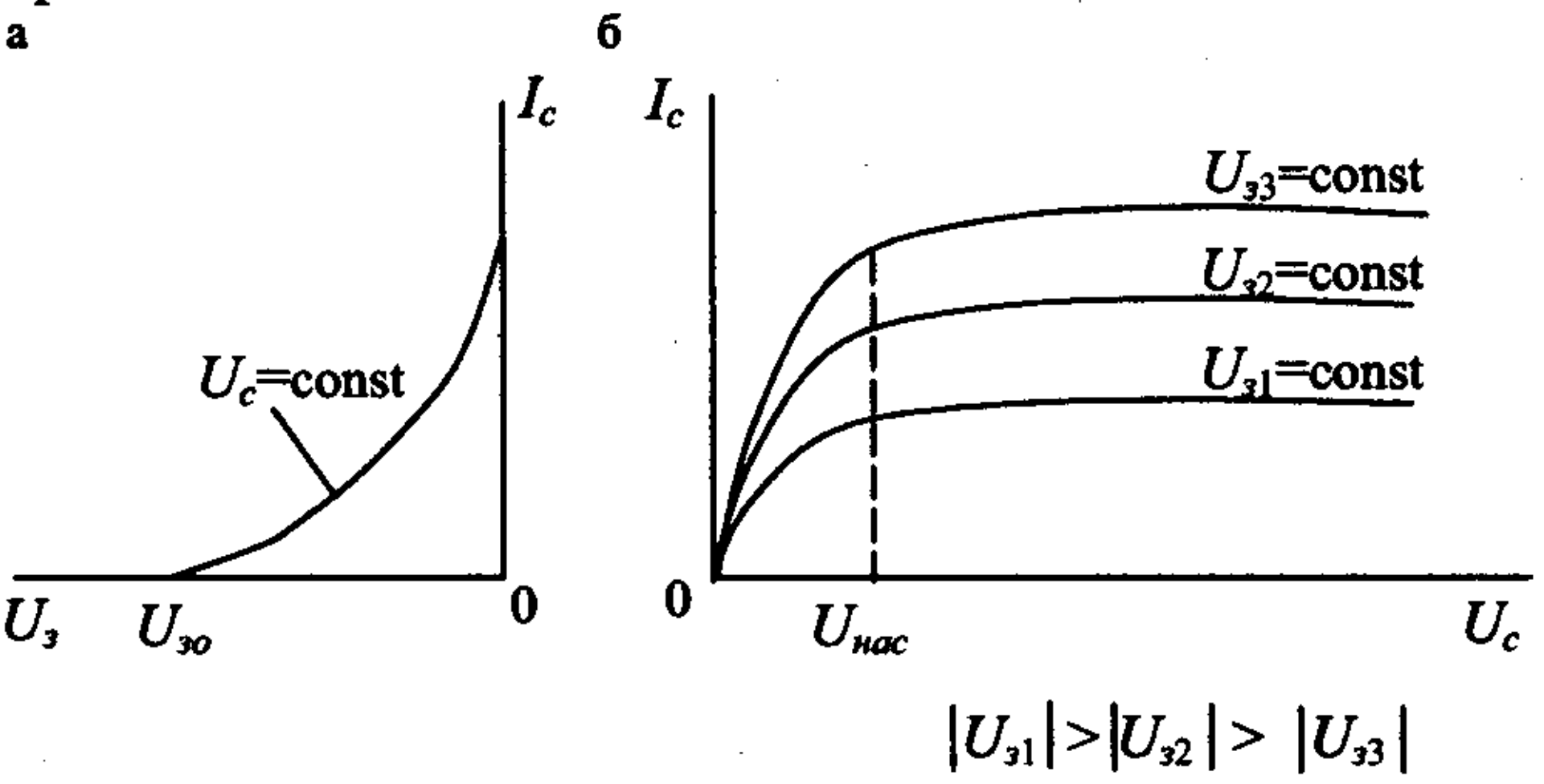


Рис. 99. Вольт-амперные характеристики полевого транзистора с затвором в виде p-n-перехода:
а) стоково-затворная (передаточная); б) стоковая

Принцип работы МДП-транзисторов основан на эффекте изменения проводимости приповерхностного слоя полупроводника под воздействием поперечного электрического поля. Они управляются напряжением и имеют чрезвычайно большое входное сопротивление и в отличие от полевых транзисторов с затвором в виде *p-n*-перехода сохраняют его большим независимо от величины и полярности входного напряжения. Применяются две конструкции МДП-транзисторов: со встроенным каналом и с индуцированным каналом.

У МДП-транзисторов со встроенным каналом в полупроводниковой пластине (подложке), например, *n*-типа, в процессе изготовления в приповерхностном слое создаются области, например, *p*-типа, образующие электроды стока (С) и истока (И) (рис. 100а). Перемычка между С и И с проводимостью *p*-типа является каналом для протекания

тока стока I_c даже при отсутствии управляющего напряжения $U_з = 0$ на затворе.

При подаче положительного напряжения на затвор электрическое поле выталкивает основные носители (дырки) из канала, его сопротивление растет, а I_c падает.

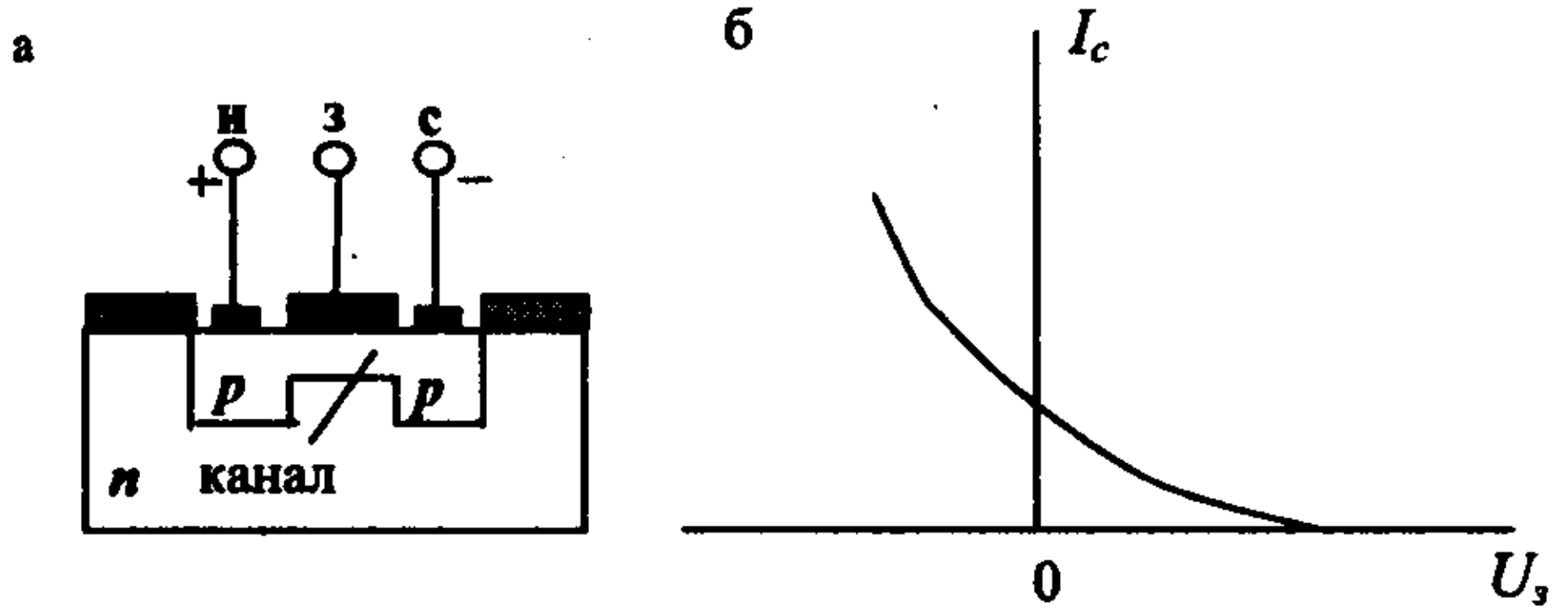


Рис. 100. МДП-транзистор со встроенным каналом: а) структурная схема; б) передаточная характеристика; в) схемное изображение

Такой режим носит название «режим обеднения». При отрицательном напряжении на затворе электрическое поле притягивает дырки из подложки, они скапливаются в области канала, сопротивление канала уменьшается, I_c растет («режим обогащения»). Передаточная характеристика МДП-транзистора показана на рис. 100б. Его стоковые характеристики $I_c = f(U_c)$ при $U_з = const$ по виду аналогичны характеристикам транзистора с затвором *p-n*-типа (рис. 99б). Схемные

изображения МДП-транзисторов со встроенным каналом n-типа и p-типов представлены на рис. 100в.

У МДП-транзисторов с индуцированным каналом последний заранее не создается, и в транзисторах, использующих пластину с проводимостью, например, *n*-типа, при $U_з > 0$ и $U_з = 0$ ток $I_c = 0$ (рис. 101а, б).

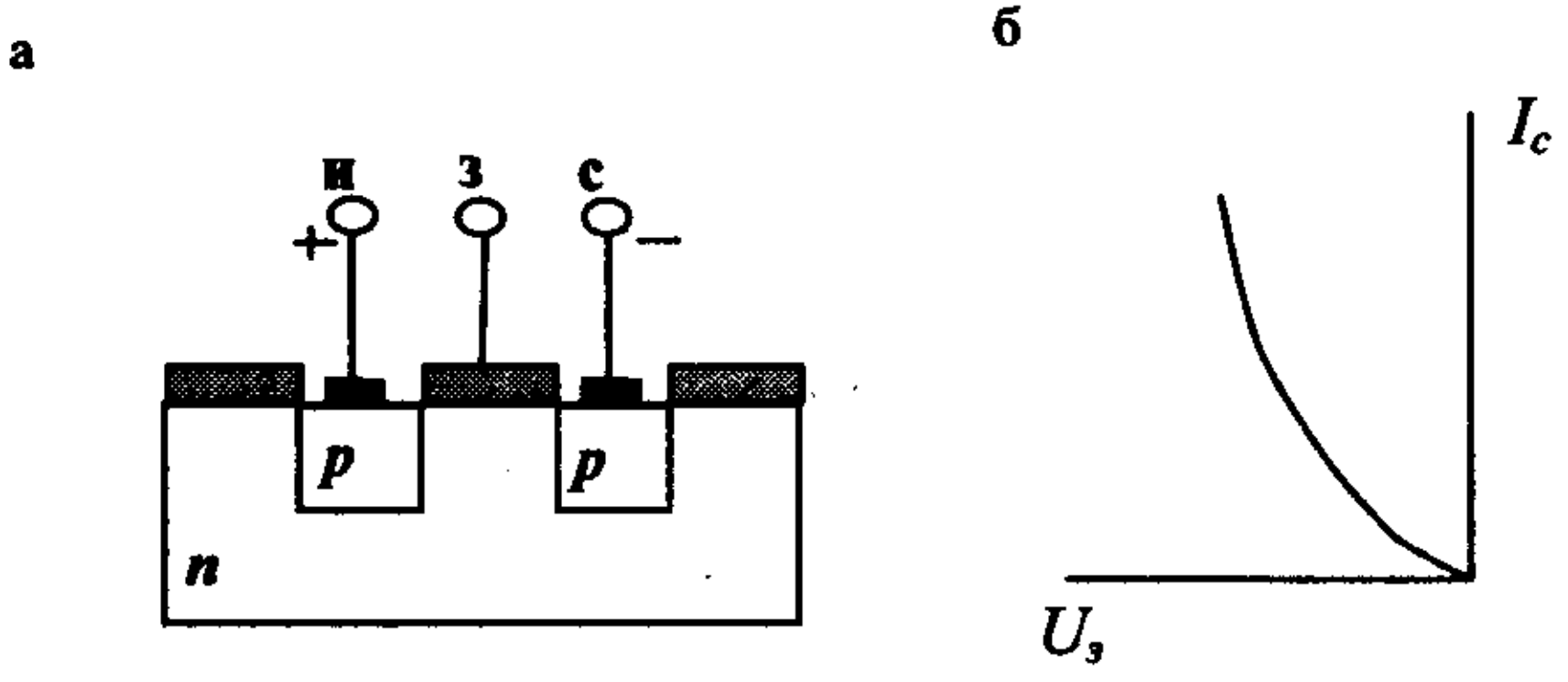


Рис. 101. МДП-транзистор с индуцированным каналом:
а) структурная схема; б) передаточная характеристика;
в) схемное изображение

Образование канала в таких приборах происходит при подаче на затвор только отрицательного напряжения ($U_з < 0$). Тогда в результате вытеснения из поверхностного слоя электронов и подтягивания дырок из *n*-пластины происходит образование между стоком и истоком ин-

версного слоя полупроводника с проводимостью, аналогичной проводимости С и И, в данном случае *p*-типа, и чем более отрицательным будет напряжение на затворе, тем больший I_c будет в канале. Передаточная характеристика такого транзистора показана на рис. 101б. Стоковые характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом аналогичны характеристикам транзистора с затвором в виде *p-n*-перехода. Схемные изображения МДП-транзисторов с индуцированным каналом *n*- и *p*-типов представлены на рис. 101в.

Основные характеристики полевых транзисторов:
крутизна характеристики передачи

$$S = dI_c / dU_з \quad \text{при} \quad U_c = const;$$

дифференциальное сопротивление стока (канала) на участке насыщения

$$R_{вых} = dU_c / dI_c \ \text{при} \ \ U_з = const.$$

Полевые транзисторы используются в усилителях, а также находят применение в качестве сенсорных датчиков, в устройствах для обнаружения скрытой проводки.

Интегральные микросхемы

Интегральная микросхема **– микроэлектронное изделие, содержащее не менее пяти активных элементов (транзисторов, диодов) и пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, дросселей), которые изготавливаются в едином технологическом процессе, электрически соединены между собой, заключены в общий корпус и представляют неделимое целое.**

Основные параметры интегральных микросхем:

- плотность упаковки (количество элементов в единице объема);
- степень интеграции (количество элементов в микросхеме).

По степени интеграции интегральные микросхемы делятся на:

I степень интеграции – до 10 элементов;

II степень интеграции – от 10 до 100 элементов;

III степень интеграции – от 100 до 1000 элементов и т.д.

По конструктивно-технологическому признаку на:

Гибридные – пассивные элементы таких микросхем выполнены посредством нанесения пленок на поверхность диэлектрической подложки; активные элементы представляют собой бескорпусные полупроводниковые приборы (плотность упаковки – до 150 эл/см^3; степень интеграции – I и II).

Полупроводниковые – все элементы таких микросхем выполнены в объеме и на поверхности полупроводника (плотность упаковки – до 10^5 эл/см^3; степень интеграции – VI и выше).

Интегральные микросхемы делятся на *аналоговые* и *цифровые*. Для аналоговых характерна пропорциональность входных и выходных сигналов, на них строятся усилители и генераторы аналоговых сигналов. Цифровые микросхемы применяются в ЭВМ.

2. ИСТОЧНИКИ ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Электростанции вырабатывают электрическую энергию переменного тока частотой 50 Гц. Это объясняется необходимостью передачи энергии на большие расстояния по высоковольтным линиям с использованием трансформаторов напряжения. На практике же возникает необходимость применения постоянного тока: в первую очередь это относится к устройствам электроники, питание которых осуществляется напряжением постоянного тока.

Для преобразования переменного тока в постоянный служат *электронные выпрямители*, относящиеся к источникам вторичного электропитания. В состав электронного выпрямителя входят: трансформатор, преобразующий напряжение сети до необходимого значения; диоды, осуществляющие выпрямление тока; сглаживающий фильтр, уменьшающий пульсации выпрямленного напряжения; стабилизатор, поддерживающий неизменным напряжение на нагрузке. В зависимости от назначения выпрямителя и предъявляемых к нему требований некоторые из перечисленных узлов могут отсутствовать.

В электронике наибольшее распространение получили однополупериодный и двухполупериодный выпрямители.

Однополупериодный выпрямитель

Работа однополупериодного выпрямителя (рис. 102) рассматривается в предположении, что диод – идеальный, т.е. сопротивление диода в прямом направлении равно нулю, а в обратном – бесконечно велико. u_1 и u_2 – напряжения на первичной и вторичной обмотках трансформатора; $R_н$ – сопротивление нагрузки.

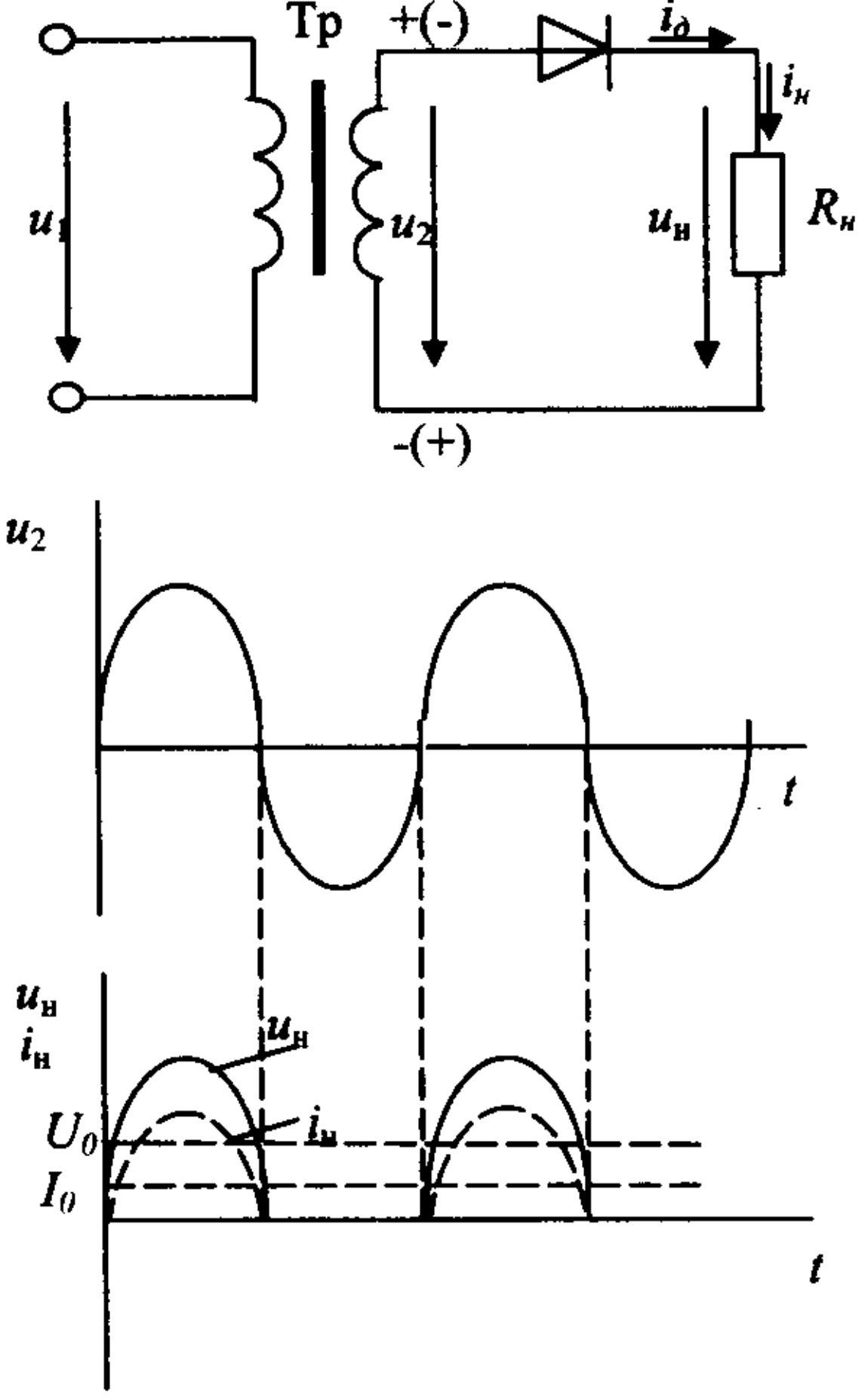


Рис. 102. Схема и временные диаграммы однополупериодного выпрямителя

На временных диаграммах токов и напряжений (рис. 102): t – время; I_0 и U_0 – средние значения (постоянные составляющие) выпрямленного тока и напряжения.

В течение первого полупериода напряжения u_2, когда положительный потенциал приложен к аноду диода, он открыт и через нагрузочное сопротивление $R_н$ пойдет ток $i_н = i_д$; при этом все напряжение окажется приложенным к $R_н$ ($u_н = u_2$). Во второй полупериод полярность напряжения u_2

на вторичной обмотке трансформатора изменится на противоположную и диод окажется включенным в обратном направлении, ток прекратится и все напряжение u_2 окажется приложенным к закрытому диоду.

Максимальное значение обратного напряжения $U_{обр.max} = \sqrt{2}U_2$, где U_2 – действующее значение напряжения.

Из временных диаграмм видно, что ток $i_н$ и напряжение $u_н$ имеют пульсирующий характер и значительно отличаются от постоянных. Для однополупериодного выпрямителя справедливы следующие соотношения:

$$U_0 = 0{,}45U_2; \quad I_0 = \frac{U_0}{R} = 0{,}45\frac{U_2}{R}.$$

Для характеристики степени пульсации выпрямленного напряжения вводят *коэффициент пульсации*

$$K_{пульс} = \frac{U_{m\,гарм}}{U_0},$$

где $U_{m\,гарм}$ – амплитуда наибольшей гармоники, для однополупериодного выпрямителя эта гармоника имеет частоту, равную частоте питающей сети переменного тока; U_0 – постоянная составляющая выпрямленного напряжения; для однополупериодного выпрямителя $K_{пульс} = 1{,}57$.

Основным преимуществом однополупериодного выпрямителя является его простота, а недостатками – большой коэффициент пульсаций и малые значения выпрямленного тока и напряжения. Поэтому значительно большее распространение получили двухполупериодные выпрямители, в которых выпрямленное напряжение создается в оба полупериода напряжения сети.

Двухполупериодный выпрямитель

Двухполупериодные выпрямители бывают двух типов: *мостовые* и *с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора.*

Большее распространение получил мостовой выпрямитель (рис. 103). В один из полупериодов напряжения сети (u_1), когда верхний зажим вторичной обмотки трансформатора имеет положительный потенциал по отношению к нижнему зажиму, диоды 1 и 3 открыты, а диоды 2 и 4 закрыты. В этот полупериод ток проходит от верхнего зажима вторичной обмотки трансформатора через диод 1 (ток i_1), нагрузочный резистор $R_н$, диод 3 (ток i_3) к нижнему зажиму обмотки трансформатора.

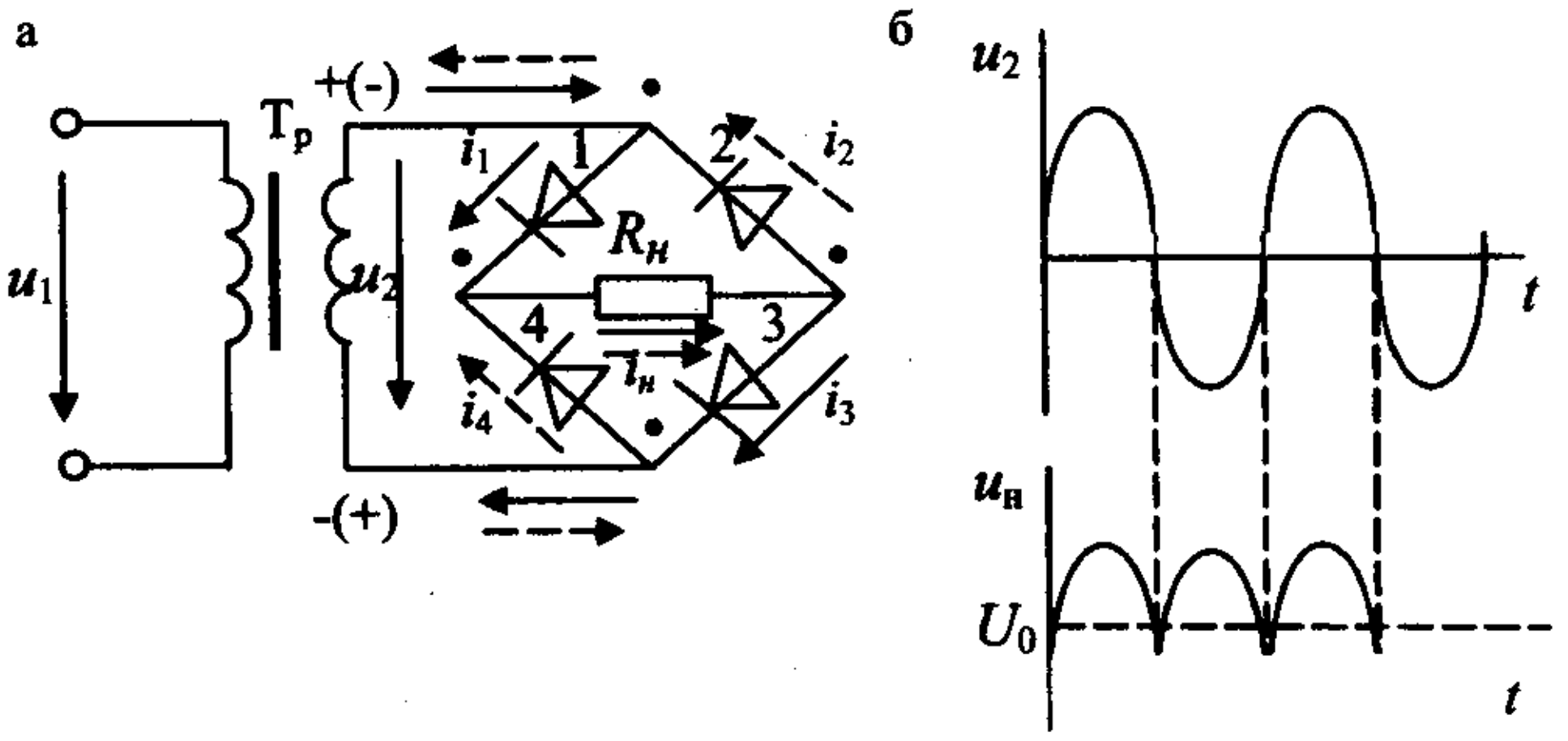


Рис. 103. Схема (а) и временные диаграммы (б) мостового электронного выпрямителя

В отрицательный полупериод напряжения u_2 диоды 1 и 3 закрыты, а диоды 2 и 4 открыты, ток проходит от нижнего зажима через диод 2 (ток i_2), нагрузочный резистор $R_н$,

диод 4 (ток i_4) к верхнему зажиму обмотки трансформатора. При этом в течение всего периода ток $i_н$ через резистор $R_н$ и напряжение на нем имеют одно и то же направление.

Для рассматриваемого двухполупериодного выпрямителя справедливы следующие соотношения:

$$U_0 = 0{,}9U_2,$$

$$K_{пульс} = \frac{U_{m\ гарм}}{U_0} = 0{,}67,$$

где $U_{m\ гарм}$ – амплитуда наибольшей гармоники, которая для двухполупериодного выпрямителя имеет частоту вдвое бóльшую, чем частота питающей сети.

По сравнению с однополупериодным, мостовой выпрямитель более эффективен: средние значения выпрямленного тока и напряжения у него в 2 раза больше, а пульсации значительно меньше.

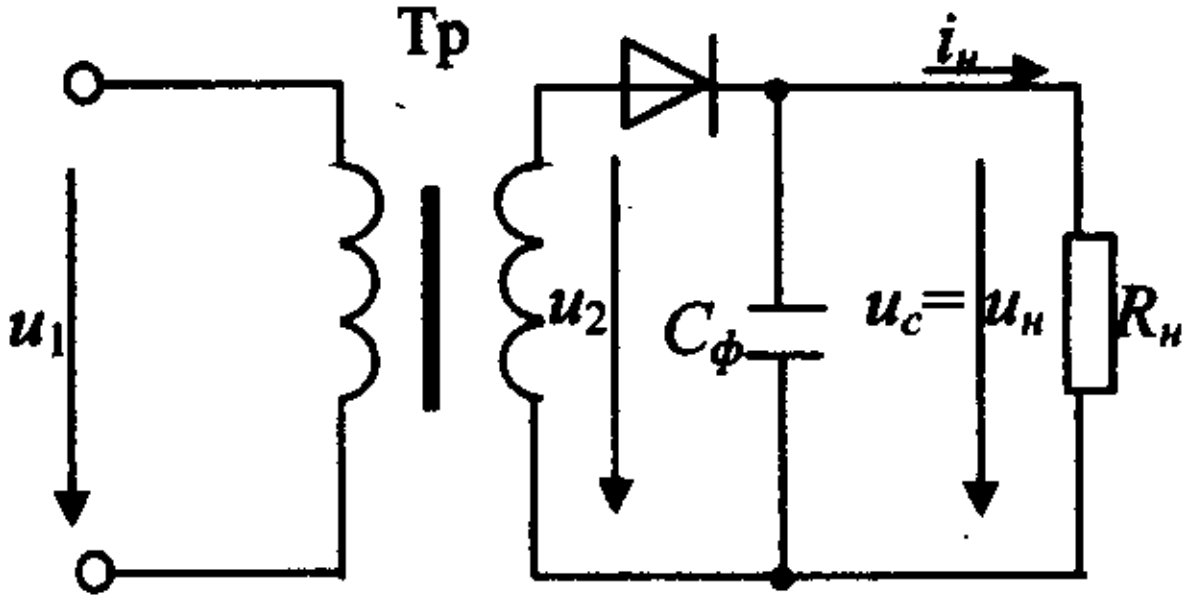
Коэффициент пульсаций напряжения $K_{пульс}$, питающего электронную аппаратуру, должен составлять доли процента. Двухполупериодный выпрямитель создает пульсирующее напряжение с $K_{пульс} = 0{,}67$. Поэтому для уменьшения пульсаций до требуемого уровня применяют устройства, называемые *сглаживающими фильтрами*. Различают *емкостные, индуктивные, комбинированные (Г-образные, П-образные)* фильтры.

Емкостной фильтр

На схеме однополупериодного выпрямителя (рис. 104а) емкостной фильтр выполнен в виде конденсатора $C_ф$, включенного параллельно нагрузочному резистору $R_н$. Конденсатор $C_ф$ заряжается через диод до амплитудного зна-

чения напряжения u_2 в моменты времени, когда напряжение u_2 на вторичной обмотке трансформатора превышает напряжение на конденсаторе. Когда напряжение $u_c > u_2$, диод закрыт и конденсатор разряжается через нагрузочное сопротивление $R_н$ с постоянной времени $\tau_{разр} = R_н C_ф$.

а



б

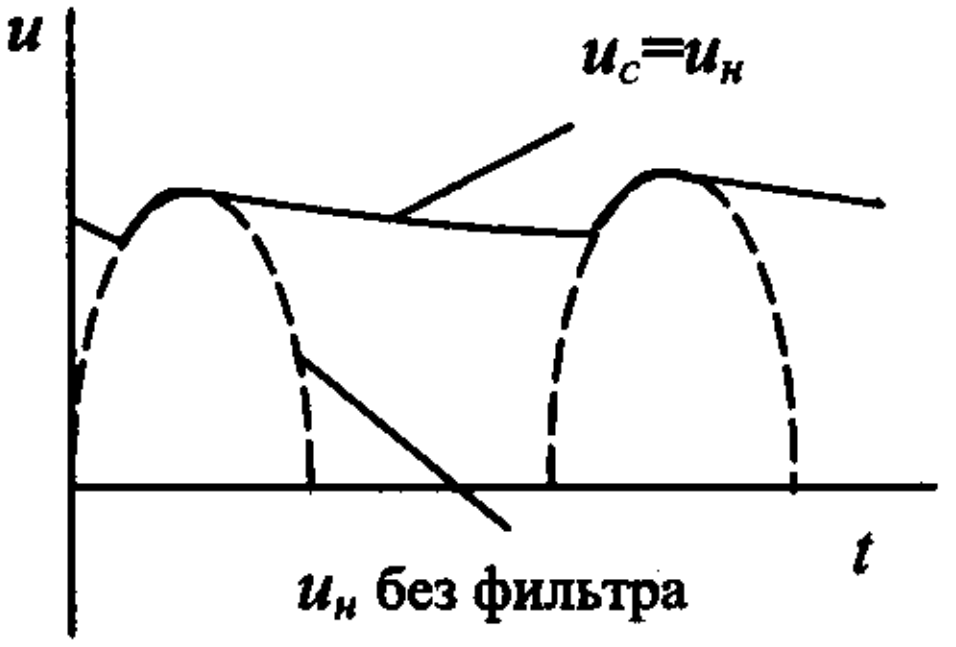


Рис. 104. Схема (а) и временные диаграммы (б) однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром

Как показывает временна́я диаграмма на рис. 104б, при разряде $C_ф$ напряжение $u_н$ не уменьшается до нуля во вторую половину периода, а пульсирует в некоторых пределах, увеличивая среднее значение выпрямленного напряжения по сравнению с однополупериодным выпрямителем без

фильтра. Аналогично работает емкостной фильтр в двухполупериодном выпрямителе, с той лишь разницей, что коэффициент пульсаций получается меньшим.

Емкость конденсатора $C_ф$ выбирают такой, чтобы выполнялось соотношение $\tau_{разр} = R_н C_ф > 5\,T$. Здесь $T = 1/f_{осн}$ – период основной, наибольшей гармоники пульсирующего напряжения.

Коэффициент пульсаций выпрямителя с емкостным фильтром может быть снижен до 10^{-2}. Емкостной фильтр целесообразно применять с высокоомным нагрузочным резистором, т.е. при малых токах нагрузки. При этом мощность $P_н$ не должна быть больше нескольких десятков ватт.

Индуктивный фильтр

Действие *индуктивного фильтра* $L_ф$ основано на том, что сопротивление катушки индуктивности постоянному току мало, а сопротивление переменному току $X_L = \omega L$ может быть сделано большим. Поэтому при включении $L_ф$ последовательно с активным сопротивлением нагрузки $R_н$ (рис. 105) падение напряжения на $R_н$ от переменной составляющей тока снижается, т.е. пульсации выпрямленного напряжения уменьшаются.

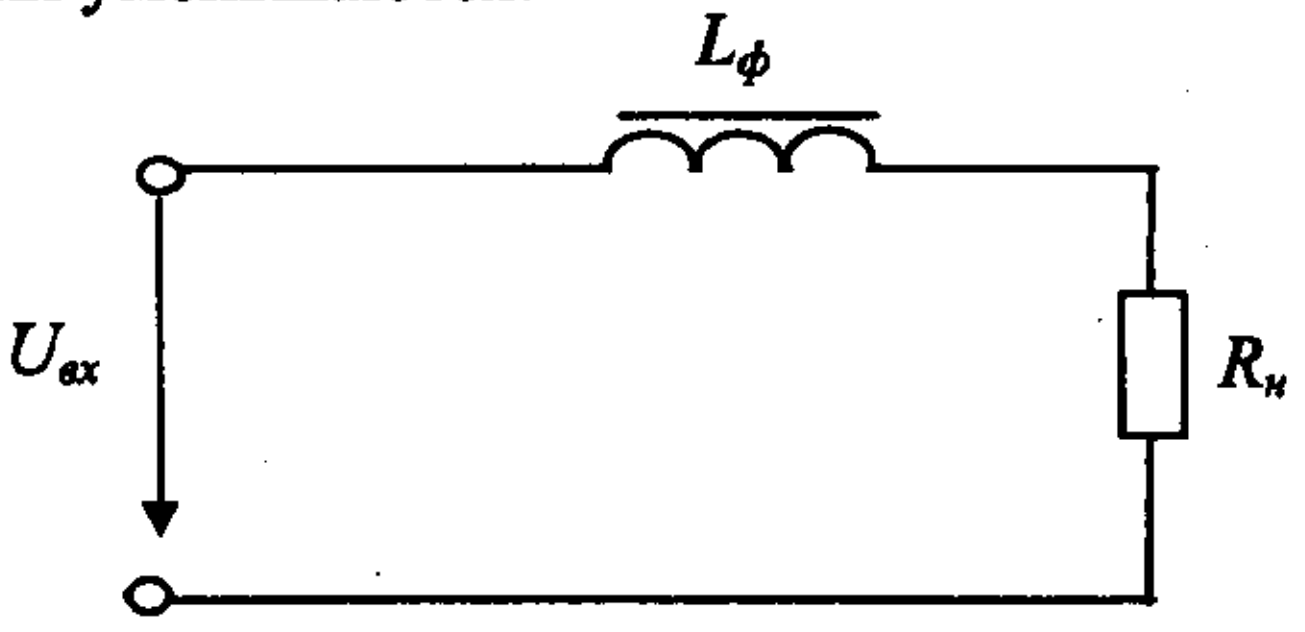


Рис. 105. Схема включения индуктивного фильтра

Г-образный и П-образный фильтры

Для более значительного уменьшения пульсаций применяют *комбинированные Г-образные или П-образные фильтры* (рис. 106).

В маломощных выпрямителях с целью уменьшения массы, габаритов и стоимости фильтра катушку $L_ф$ часто заменяют резистором $R_ф$.

Для характеристики эффективности действия сглаживающего фильтра вводится *коэффициент сглаживания*

$$K_{сгл} = \frac{K_{пульс}}{K'_{пульс}},$$

где $K_{пульс}$ и $K'_{пульс}$ – коэффициент пульсации на нагрузке при отсутствии и наличии фильтра, соответственно.

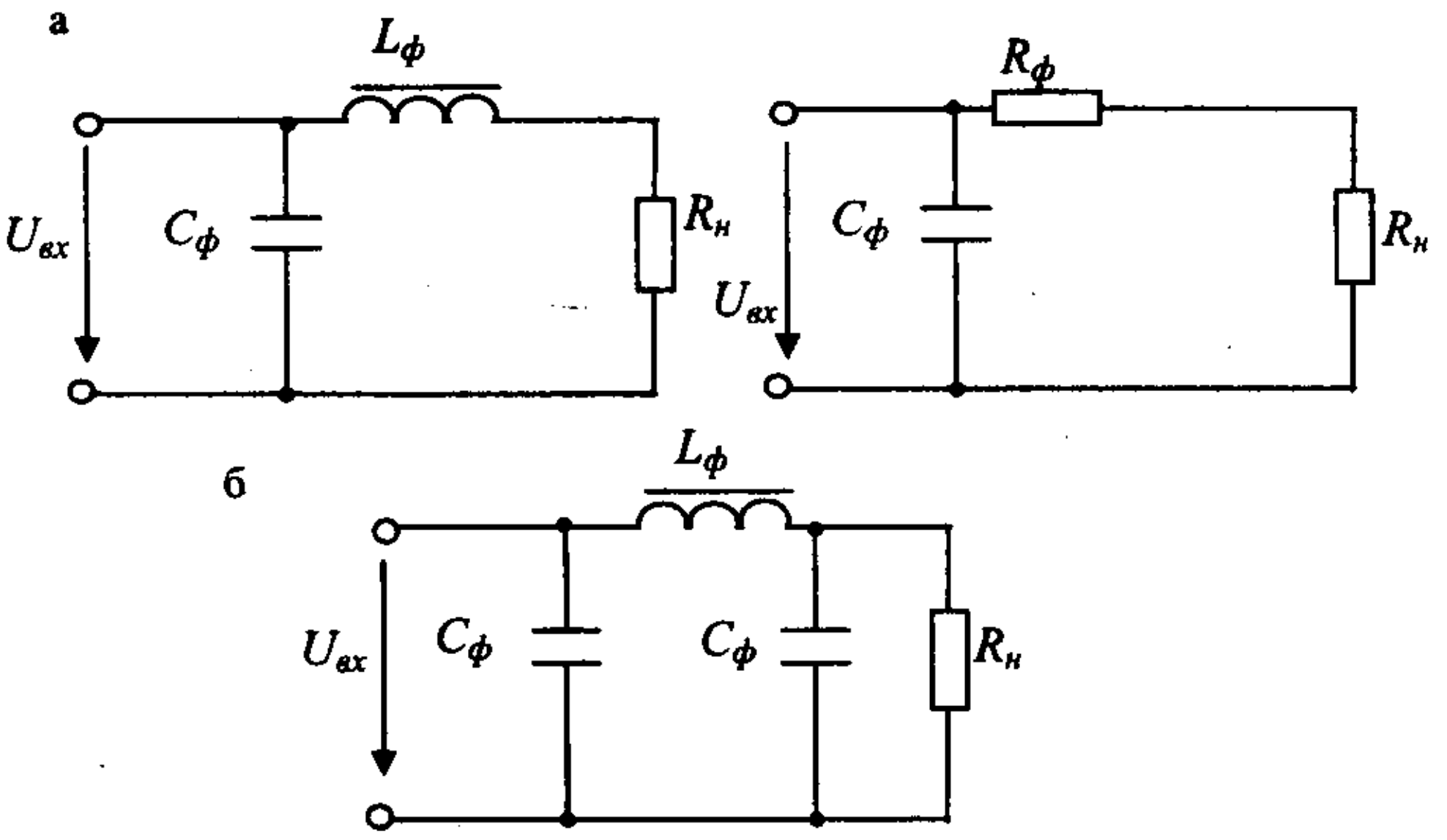


Рис. 106. Схемы Г-образного (а) и П-образного (б) сглаживающих фильтров

Если Г-образный или П-образный сглаживающий фильтр из отдельных звеньев не позволяет уменьшить пульсации до необходимого уровня, то применяют соединенные последовательно многозвенные фильтры. Общий коэффициент сглаживания такого фильтра равен произведению коэффициентов сглаживания фильтров, из которых он состоит. В настоящее время используются электронные фильтры, в которых вместо индуктивностей включают транзисторы.

Внешние характеристики выпрямителя

Внешней или нагрузочной характеристикой выпрямителя называют зависимость напряжения на нагрузке $U_н$ от тока нагрузки $I_н$

$$U_н = f(I_н).$$

Характер этой зависимости можно уяснить из рис. 107.

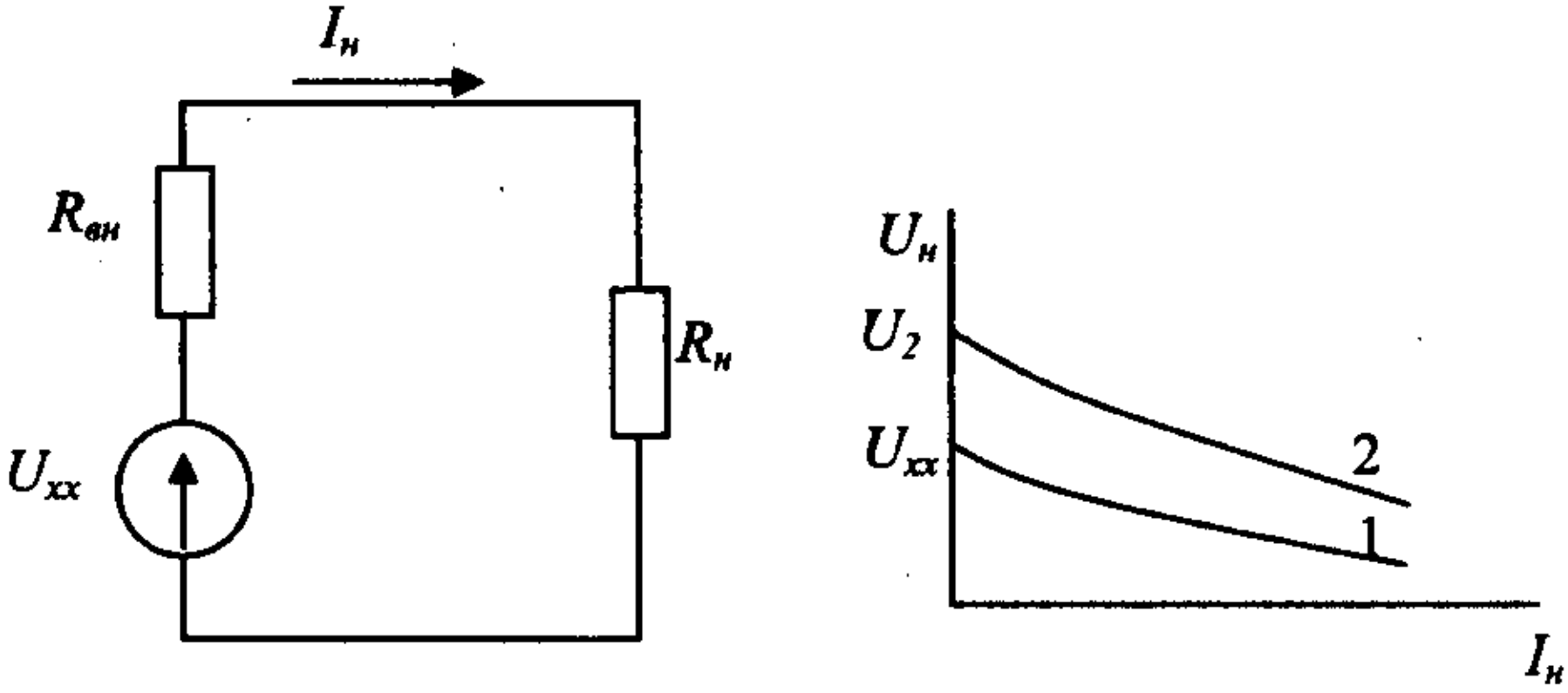


Рис. 107. Эквивалентная схема выпрямителя и его внешние характеристики

Выпрямитель можно рассматривать как источник напряжения постоянного тока с некоторой эквивалентной

ЭДС, равной напряжению холостого хода U_{xx}, (напряжению на выходе выпрямителя при токе нагрузки $I_н = 0$) и внутренним сопротивлением $R_{вн}$.

Из эквивалентной схемы следует, что

$$U_н = U_{xx} - I_н R_{вн}.$$

Выражение показывает, что с ростом выпрямленного тока $I_н$ падение напряжения на $R_{вн}$ увеличивается и напряжение $U_н$ на нагрузке уменьшается. Сопротивление диодов в прямом направлении зависит от тока, поэтому внешняя характеристика $I_н = f(U_н)$ является нелинейной. Однако при малом сопротивлении цепи выпрямителя эта нелинейность может быть слабо выражена.

На внешних характеристиках выпрямителя кривая 1 без сглаживающего фильтра и кривая 2 с емкостным фильтром. Кривая 2 расположена выше. Это объясняется тем, что при наличии емкостного фильтра в режиме холостого хода (при $I_н = 0$) конденсатор $C_ф$ заряжается до амплитудного значения выпрямленного напряжения $U_н = U_{2m}$, что по величине больше, чем среднее значение выпрямленного напряжения в отсутствие сглаживающего фильтра. Примерно такая же картина будет и при применении Г-образного или П-образного фильтров.

3. СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Напряжение источников питания электронной аппаратуры может изменяться при колебаниях напряжения сети переменного тока, а также при изменении силы тока, потребляемого аппаратурой. Для нормальной работы электронной аппаратуры в ряде случаев требуются напряжения

питания более стабильные, чем могут обеспечить обычные источники напряжения постоянного тока. Повышение устойчивости питающего напряжения достигается применением *стабилизаторов напряжения*.

Стабилизаторы делят на *параметрические* и *компенсационные*.

Основным параметром, характеризующим качество работы стабилизатора напряжения, является *коэффициент стабилизации*

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_{вх}/U_{вх}}{\Delta U_{вых}/U_{вых}},$$

где $\Delta U_{вх}$, $\Delta U_{вых}$ – приращения входного и выходного напряжений; $U_{вх}$, $U_{вых}$ – номинальные значения входного и выходного напряжений.

Наиболее простым стабилизатором напряжения является параметрический.

Схема стабилизатора (рис. 108а) содержит стабилитрон, включенный в обратном направлении, балластное сопротивление $R_б$ и сопротивление нагрузки $R_н$. На рис. 108б показана вольт-амперная характеристика стабилитрона, включенного в обратном направлении. При малых входных напряжениях ($U_{вх}$) напряжение на стабилитроне ($U_{ст}$) будет также малым, ток стабилитрона ($I_{ст}$) ничтожно мал, так что можно считать стабилитрон как бы отключенным от схемы. При этом $I_{вх} = I_н$ и напряжения на резисторах $R_б$ и $R_н$ будут распределяться пропорционально их сопротивлениям, а зависимость $U_{вых} = f(U_{вх})$ будет приблизительно прямо пропорциональной. Когда входное напряжение возрастет настолько, что напряжение на стабилитроне достигнет величины пробоя, ток через стабилитрон резко возрастет. Это приведет к большому падению напряжения на балластном сопротивле-

нии $R_б$, а выходное напряжение $U_{вых} = U_{ст}$, при изменении входного напряжения в определенных пределах будет оставаться почти неизменным. Сказанное иллюстрируется основной характеристикой параметрического стабилизатора, показанной на рис. 108в

$$U_{вых} = f(U_{вх}).$$

Величина балластного сопротивления $R_б$ зависит от пределов изменения входного напряжения, тока нагрузки ($I_н$) и параметров стабилизатора ($I_{ст.min}$ и $I_{ст.max}$). Предельные значения определяются из выражения

$$R_{б\,max} = \frac{U_{вх.min} - U_{ст}}{I_{ст.min} + I_н}; \quad R_{б\,min} = \frac{U_{вх.max} - U_{ст}}{I_{ст.max} + I_н}.$$

Для получения большего значения коэффициента стабилизации целесообразно выбрать значение $R_б$ ближе к $R_{б\,max}$. При выборе сопротивления $R_б$ необходимо, чтобы оно удовлетворяло требованию рассеивания максимальной мощности, определяемой выражением

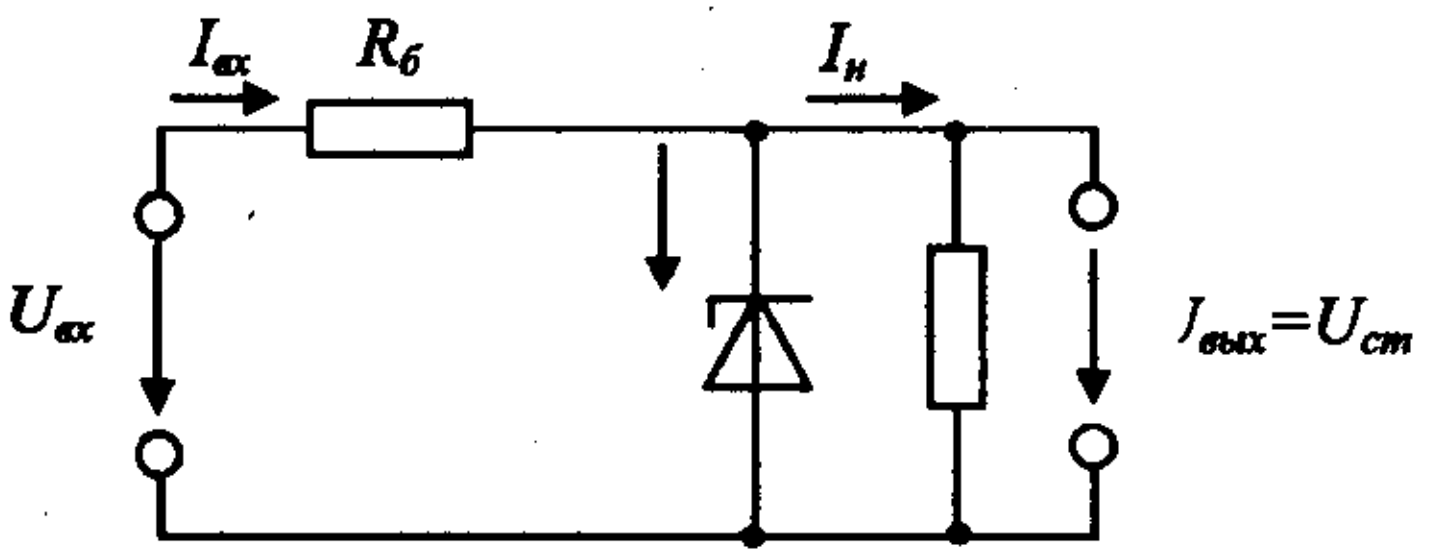
$$P_{б\,max} = \frac{U^2_{б\,max}}{R_б} = \frac{(U_{вх.max} - U_{ст})^2}{R_б}.$$

При найденном значении $R_б$ коэффициент стабилизации

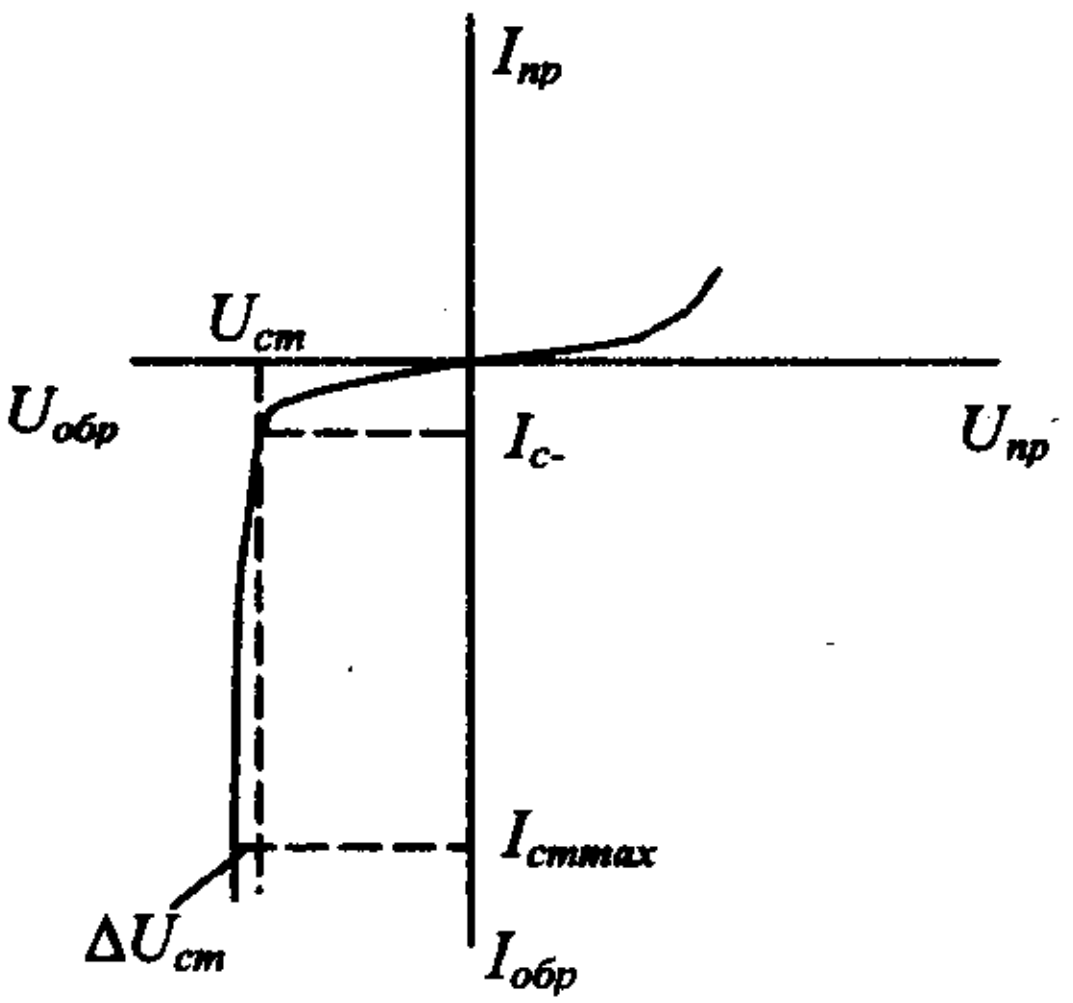
$$K_{ст} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} \cdot \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta U_{вых}} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} \cdot \frac{R_б}{r_д},$$

где $r_д = \Delta U_{ст} / \Delta I_{ст}$ – динамическое сопротивление (сопротивление переменному току) стабилитрона, приводимое в справочниках по полупроводниковым приборам.

а



б



в

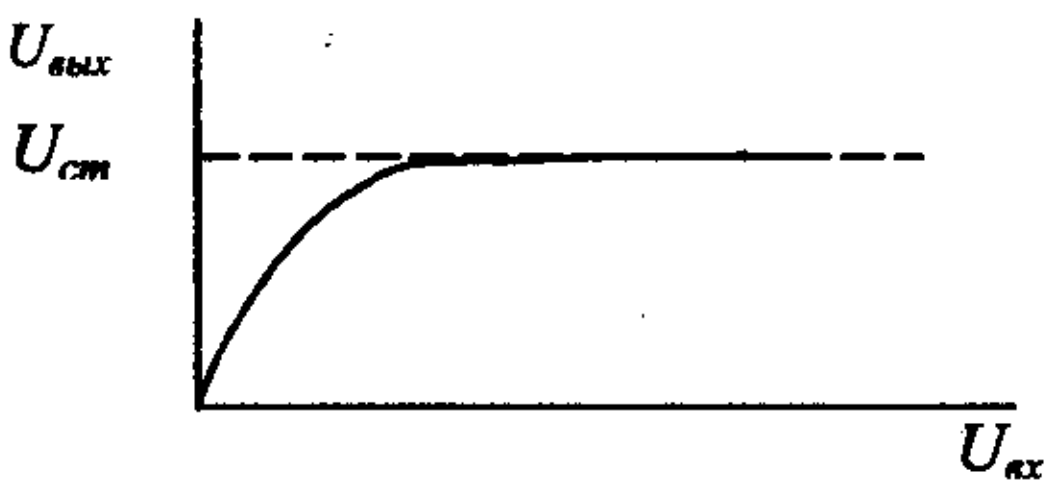


Рис. 108. Схема параметрического стабилизатора (а), вольт-амперная характеристика стабилитрона (б) и характеристика параметрического стабилизатора (в)

Компенсационные стабилизаторы являются системами автоматического регулирования, в которых за счет отрицательной обратной связи обеспечивается неизменность напряжения на нагрузке с большой степенью точности. Компенсационные стабилизаторы выполняются на полупроводниковых дискретных элементах и в интегральном исполнении.

4. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Электронным усилителем называют устройство, предназначенное для усиления напряжения, тока и мощности электрических сигналов.

При этом наиболее важным является усиление мощности, так как усиление напряжения (без усиления мощности) можно получить просто с помощью трансформатора. Следует подчеркнуть, что мощность сигналов в электронных усилителях усиливается за счет энергии источников питания.

Электронный усилитель является наиболее распространенным электронным устройством. Он непосредственно используется в проводной связи, в звуковом кино, в автоматике для усиления сигналов датчиков, измерения электрических и неэлектрических величин, в управляющих и регулирующих устройствах, а также в аппаратуре геологической разведки, точного времени, медицинской, музыкальной и многих других случаях. Кроме того, электронные усилители применяют в других электронных устройствах: электронных генераторах, преобразователях формы и частоты сигналов и др.

Усилители можно подразделить на ряд типов по различным признакам. Наиболее часто их классифицируют по диапазонам частот усиливаемых сигналов.

Усилители постоянного тока (УПТ) предназначены для усиления напряжения постоянного тока или медленно изменяющихся сигналов. Их используют для усиления сигналов различных датчиков, называемых также первичными преобразователями.

Усилители звуковых частот (УЗЧ) предназначены для усиления электрических сигналов в звуковом диапазоне частот (от 20 Гц до 20 кГц). Усилители низкой частоты (УНЧ) используют для усиления сигналов в диапазоне частот от 20 Гц до 100 кГц.

Избирательные, или селективные (резонансные), усилители усиливают сигналы в сравнительно узкой полосе частот. Наиболее часто их используют в радиоэлектронной аппаратуре, в частности для усиления высокочастотных колебаний в радиоприемниках, сокращенно их обозначают УВЧ-усилители высокой частоты.

Широкополосные усилители предназначены для усиления широкого спектра частот (от десятков герц до нескольких мегагерц) и используются, например, в телевизионных приемниках.

Усилитель на биполярном транзисторе с общим эмиттером

Рассматриваемый усилитель (рис. 109) предназначен для усиления гармонических сигналов (сигналов синусоидальной формы) в диапазоне низких частот. Название такой схемы объясняется тем, что эмиттер здесь является общим для входной и выходной цепей. Схема имеет наибольшее

распространение, так как она обеспечивает наибольшее усиление мощности сигнала.

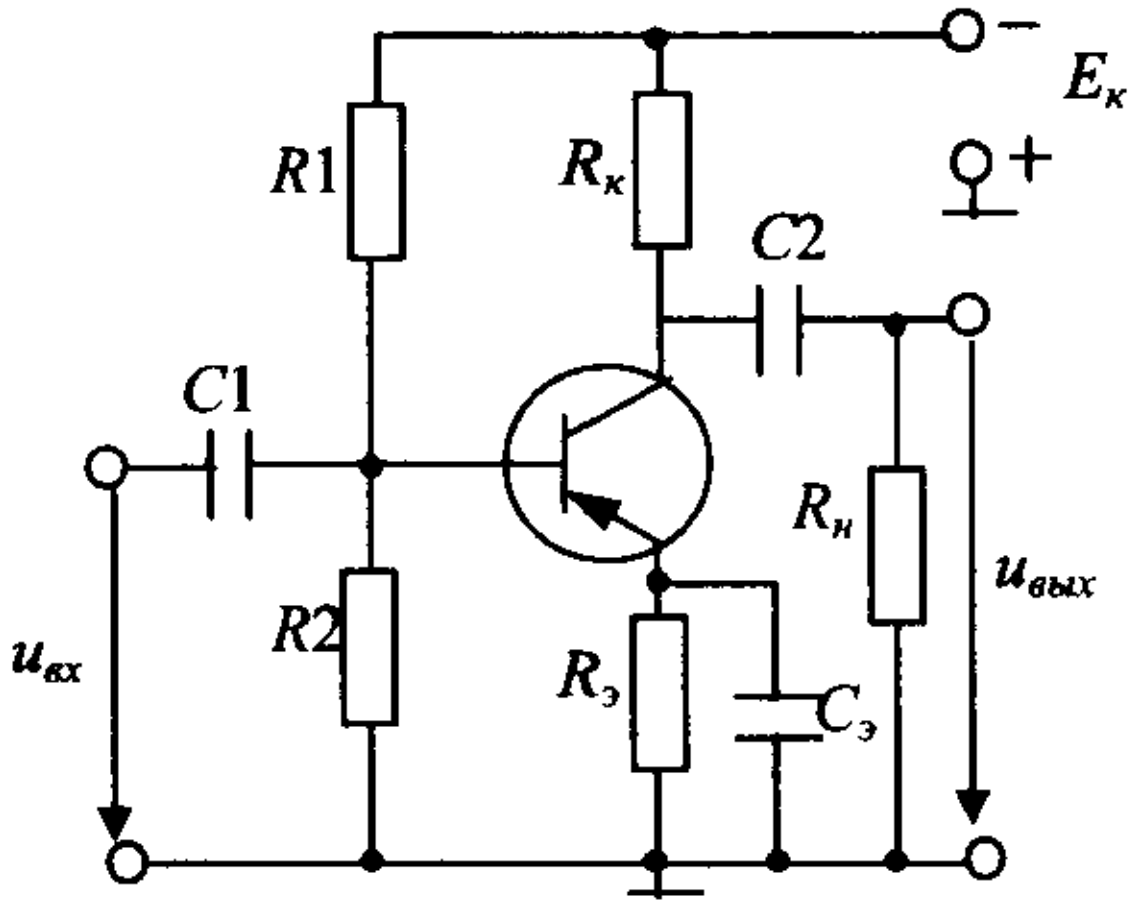


Рис. 109. Схема электронного усилителя на биполярном транзисторе с общим эмиттером

Приведенные на рис. 109 элементы имеют следующее назначение: транзистор *p-n-p* – усилительный элемент; $+E_к$ и $-E_к$ – зажимы источника питания схемы; $R1$, $R2$ – резисторы делителя напряжения, обеспечивающего подачу напряжения питания базы для установки нужного режима работы усилительного элемента (транзистора); $R_к$ – резистор коллекторной нагрузки; $R_э$, $C_э$ – элементы схемы температурной стабилизации режима работы транзистора; $C1$ и $C2$ – конденсаторы, служащие для разделения постоянных и переменных токов в схеме.

Для анализа работы усилителя используют входную характеристику транзистора $I_б = f(U_{бэ})$ (рис. 110а) и семейство выходных характеристик $I_к = f(U_{кэ})$ (рис. 110б). На рисунке $U_{бэ0}$ – напряжение смещения базы, т.е. напряжение питания базы (при отсутствии сигнала); $U_{бm} = U_{вх.m}$ – амплитуда синусоидального напряжения сигнала, подаваемого на базу;

$I_{б0}$ – ток базы при отсутствии сигнала (ток покоя); $I_{бm}$ – амплитуда переменной составляющей тока базы; $U_{кэ0}$ – напряжение питания коллектора (напряжение на коллекторе при отсутствии сигнала); $U_{кm}$ – амплитуда переменной составляющей напряжения на коллекторе; $I_{к0}$ – ток коллектора при отсутствии сигнала (ток покоя коллектора).

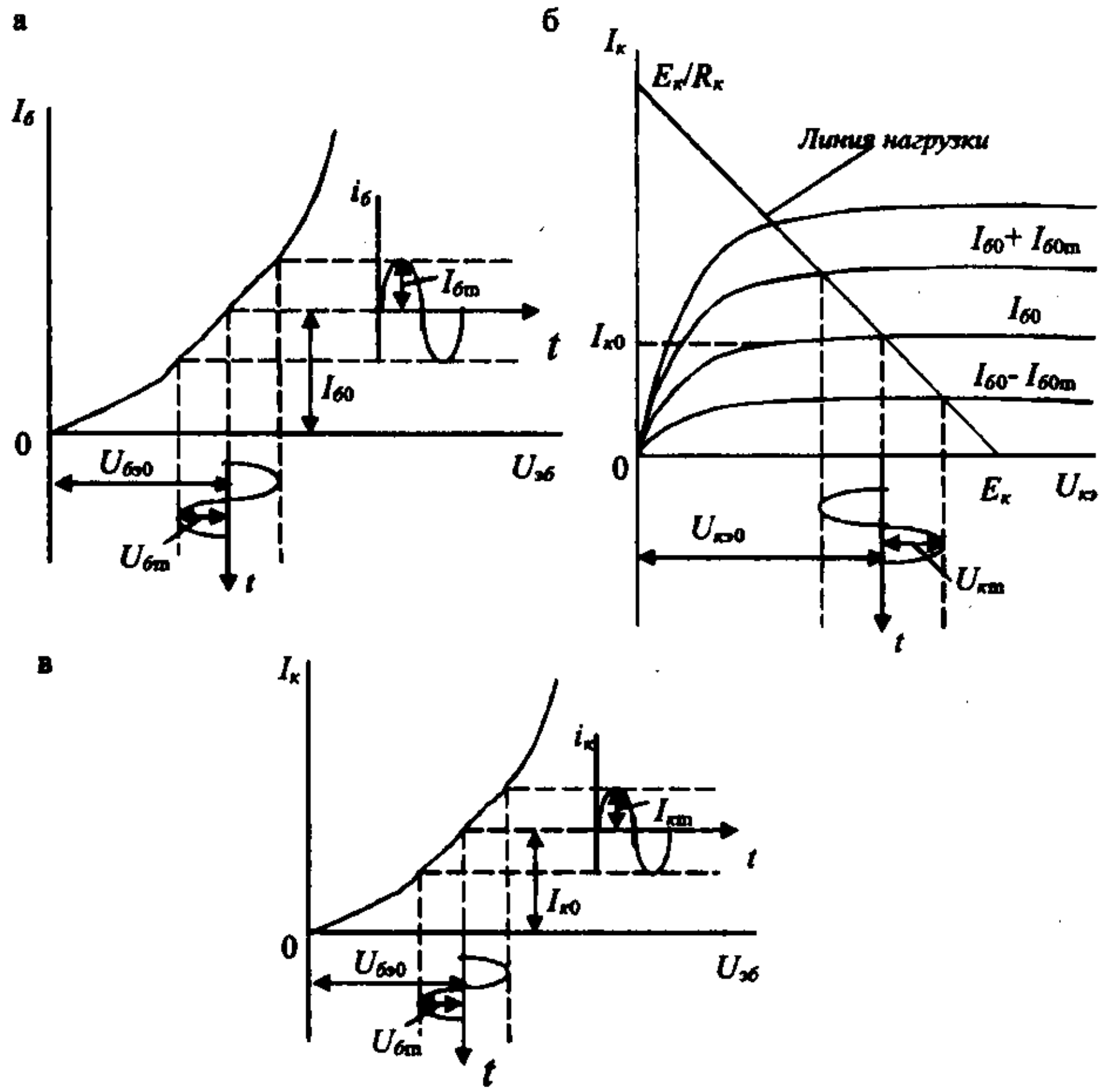


Рис. 110. Вольт-амперные характеристики усилителя: входная (а); выходные (б); проходная и передаточная (в)

При выборе точки покоя на прямолинейном участке проходной характеристики (рис. 110в) и при условии, что напряжения и токи не выходят за пределы линейного участ-

ка, можно получить переменную составляющую коллекторного тока такой же формы, как напряжение сигнала, подаваемого на базу, т.е. получить неискаженное усиление сигнала. Усиление здесь достигается за счет того, что ток коллектора, образуемый от энергии источника питания, во много раз больше, чем ток базы, а напряжение сигнала на коллекторной нагрузке, определяемое произведением тока на сопротивление нагрузки, также во много раз больше напряжения сигнала, подаваемого на базу.

Основные характеристики усилителя:

Амплитудно-частотная характеристика (рис. 111а) представляет собой зависимость коэффициента усиления K_U от частоты сигнала f

$$K_U = \varphi(f).$$

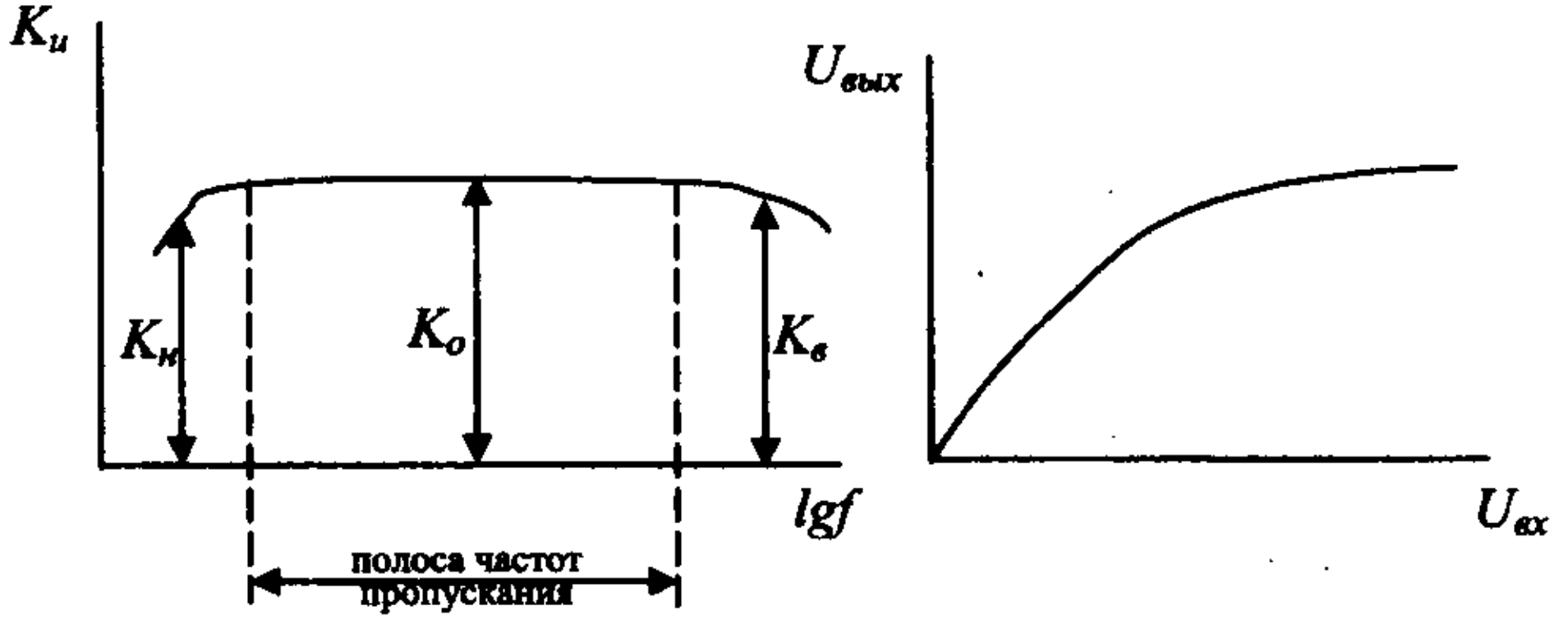


Рис. 111. Амплитудно-частотная (а) и амплитудная (б) характеристики усилителя

Коэффициент усиления уменьшается на нижних частотах вследствие увеличения реактивного сопротивления разделительных конденсаторов $X_c = 1 / \omega C$, включенных последовательно в цепях прохождения сигналов. В резуль-

тате бóльшая часть напряжения падает на этих конденсаторах и выходное напряжение уменьшается.

Уменьшение коэффициента усиления на верхних частотах объясняется уменьшением реактивного сопротивления паразитной емкости, шунтирующей (включенной параллельно) нагрузочное сопротивление на выходе усилителя. Эта паразитная емкость обусловлена емкостью монтажных проводов, измерительных приборов или усилительных элементов последующих каскадов усилителя.

Уменьшение коэффициента усиления на нижних $K_н$ и верхних $K_в$ частотах по сравнению с коэффициентом усиления на средних частотах K_0 оценивают коэффициентами частотных искажений

$$M_н = K_0 / K_н \quad \text{и} \quad M_в = K_0 / K_в.$$

По частотной характеристике можно определить ширину полосы частот пропускания усилителя, т.е. полосу частот, в пределах которой коэффициент усиления уменьшается не более чем в $\sqrt{2}$ раз.

Полоса частот пропускания усилителя определяет качество его работы, так как для неискаженного усиления сигналов усилитель должен обеспечивать равномерное усиление всех частотных составляющих сигнала. Так, например, звуковая аппаратура высокого класса имеет полосу пропускания до 20 кГц, а аппаратура радиосвязи горноспасателей ограничивается полосой пропускания 300–3000 Гц.

Амплитудная (динамическая) характеристика (рис. 103б) усилителя представляет собой зависимости выходного напряжения от входного.

$$U_{вых} = f(U_{вх}).$$

С ростом входного напряжения $U_{вх}$ выходное напряжение $U_{вых}$ сначала увеличивается пропорционально, а с

некоторого значения $U_{вх}$ рост $U_{вых}$ замедляется и прекращается. Это объясняется тем, что усиливаемый сигнал начинает выходить за пределы линейного участка проходной характеристики транзистора (рис. 110в). Действительно, каждый транзистор обладает своим предельно максимальным током коллектора, который не возрастает при увеличении напряжения на базе.

По амплитудной характеристике усилителя можно судить о диапазоне входных напряжений, которые он охватывает.

Эмиттерный повторитель

На рис. 112 приведена электронная схема эмиттерного повторителя.

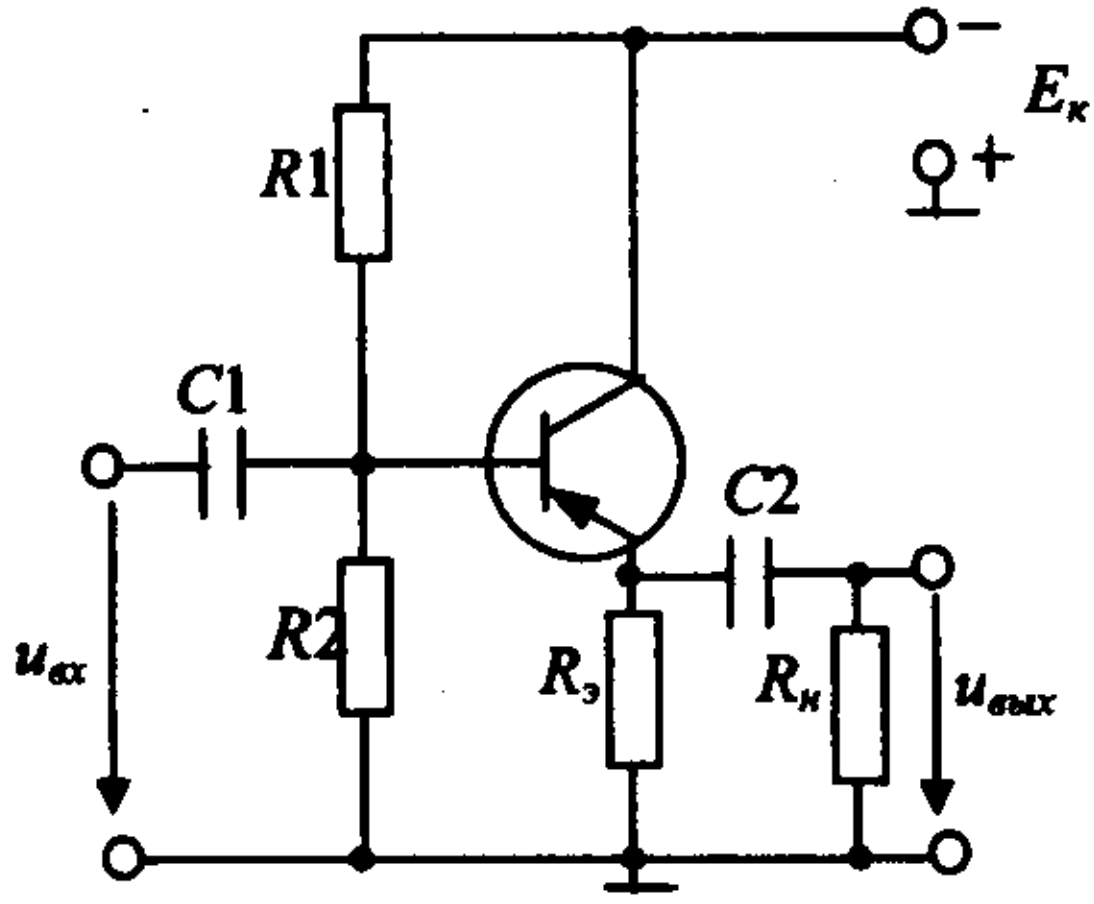


Рис. 112. Электронная схема эмиттерного повторителя

Выход усилителя – коллектор – по переменной составляющей напряжения соединен с входом (с общим за-

землением), так как внутренним сопротивлением источника питания $E_к$ из-за его малости можно пренебречь.

В указанном усилителе нагрузочный резистор $R_н$, с которого снимается выходное напряжение, включен в эмиттерную цепь.

В приведенной на рис.104 схеме так же, как и в усилителе с общим эмиттером, используется транзистор типа *p-n-p*, источник питания $E_к$, резисторы делителя напряжения питания базы $R1$, $R2$, разделительные конденсаторы $C1$, $C2$.

Коэффициент усиления мощности сигнала определяется только усилением тока. Выходное напряжение совпадает по фазе с входным и по величине $U_{вых} \approx U_{вх}$, поэтому указанную схему и называют эмиттерным повторителем.

Эмиттерный повторитель имеет большое входное и малое выходное сопротивления, поэтому его применяют для согласования высокоомного источника усиливаемого сигнала с низкоомным нагрузочным устройством.

Операционные усилители

Операционным называют усилитель постоянного тока, имеющий большой коэффициент усиления и предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми величинами. Операционный усилитель (ОУ) имеет дифференциальный вход (два входных ввода) и один общий выход. На рис. 113 приведено обозначение операционного усилителя на схемах.

Идеальный ОУ имеет коэффициент усиления по напряжению $K_U \to \infty$, большое входное сопротивление $R_{вх} \to \infty$, малое выходное сопротивление $R_{вых} \to 0$, усиливает широкий спектр частот вплоть до постоянной составляющей. Дрейф нуля операционного усилителя мал.

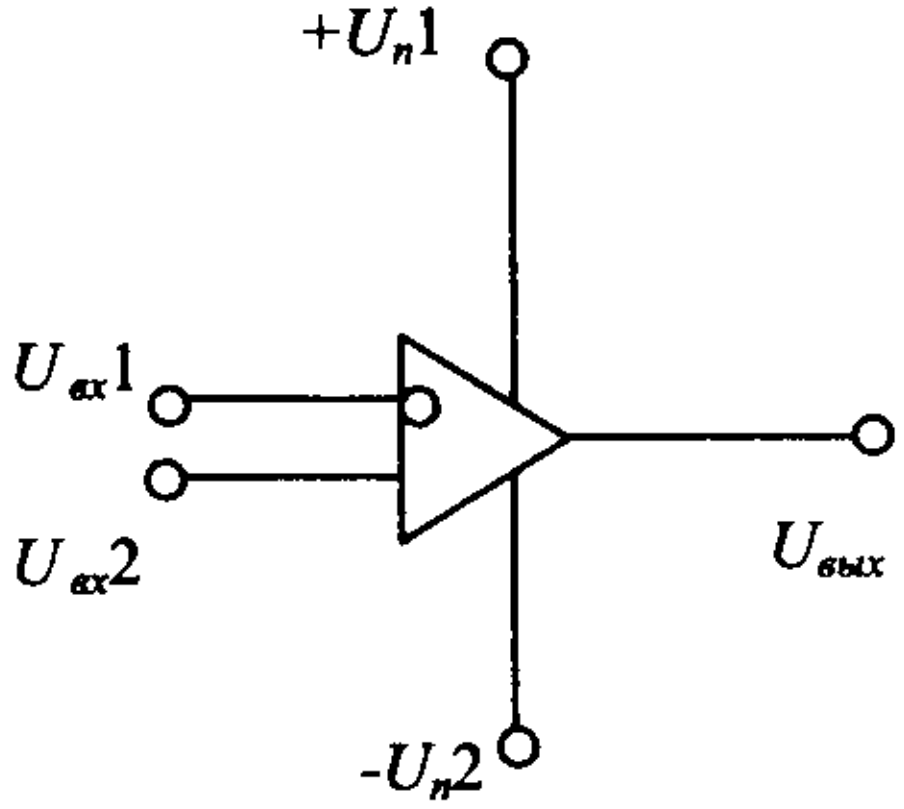


Рис. 113. Обозначение ОУ на схемах

Использование двух источников питания (рис. 113) позволяет подавать на вход ОУ как положительные, так и отрицательные сигналы. Вход 1 ОУ называют инвертирующим и обозначают знаком минус или кружком; вход 2 называют неинвертирующим и обозначают знаком плюс или употребляют без знака.

В области низких частот выходное напряжение $U_{вых}$ ОУ находится в той же фазе, что и разность входных напряжений

$$U_{вх} = U_{вх}2 - U_{вх}1.$$

Зависимость $U_{вых}$ ОУ от $U_{вх}$ представлена на рис. 114. Она практически линейна в диапазоне $U_{вх.min} < U_{вх} < U_{вх.max}$. Этот диапазон называется *областью усиления*. Вне диапазона усиления находится *диапазон насыщения*.

Дифференциальный коэффициент усиления ОУ определяется соотношением

$$K_Д = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}} = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta(U_{вх}2 - U_{вх}1)}.$$

при $U_{вх}1$ = const и $U_{вх}2$ = const, соответственно.

Непосредственно в качестве усилителя ОУ без обратной связи не используют, что обусловлено двумя причинами: линейный участок передаточной характеристики ограничен малыми входными напряжениями, коэффициент усиления по напряжению K_u нестабилен.

Наибольшее практическое применение имеют *инвертирующие ОУ с параллельной отрицательной обратной связью (ООС) по напряжению* (рис. 115). Для такой схемы при чисто активных сопротивлениях Z1=R1 и Z2=R2 коэффициент усиления усилителя определяется по формуле $K_{oc} = -R2/R1$.

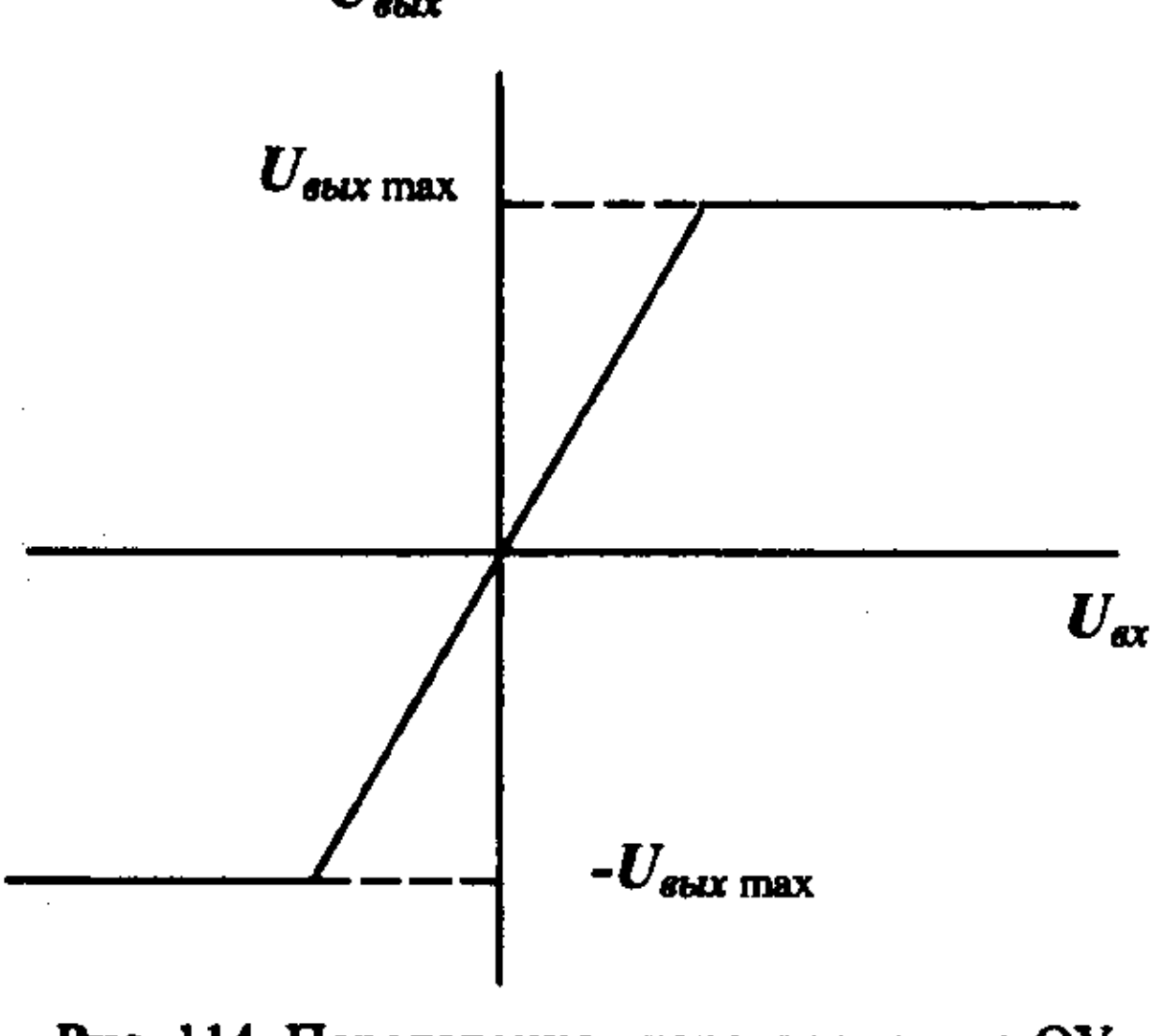


Рис. 114. Передаточная характеристика ОУ

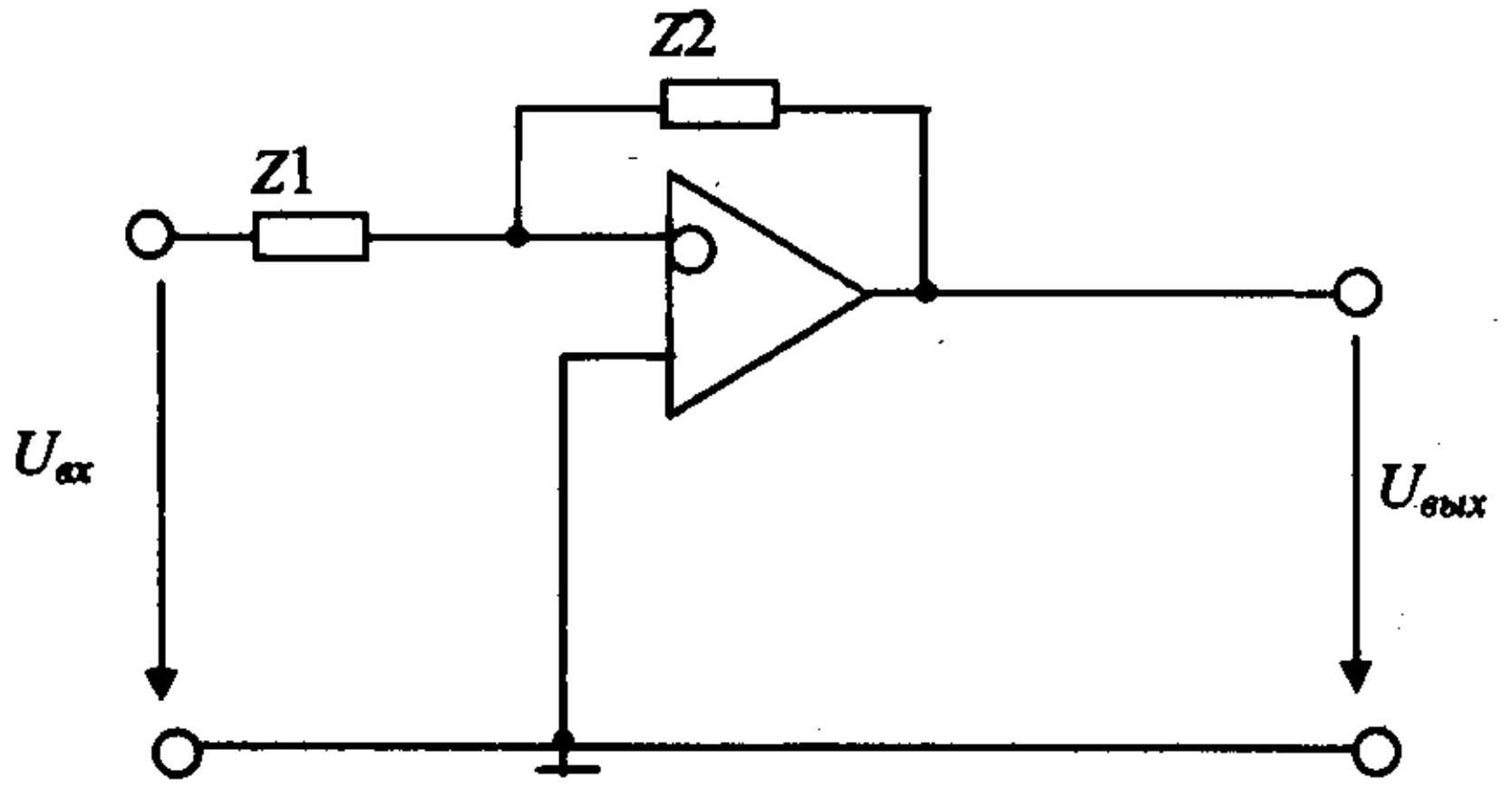


Рис. 115. Инвертирующий усилитель на ОУ с параллельной ООС

На базе таких ОУ создаются схемы, предназначенные для выполнения различных математических операций над входными сигналами. Такие схемы находят широкое применение в устройствах автоматического управления, они составляют основу аналоговых вычислительных машин.

5. ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Электронным генератором называется устройство, преобразующее энергию источника питания в энергию переменного тока определенной формы и частоты с помощью электронных приборов.

Электронные генераторы находят широкое применение в различных областях техники и в быту. Впервые их начали применять в радиопередающих устройствах для связи и радиовещания. Электронные генераторы используют для решения всевозможных технических задач, таких как высокочастотная закалка и сушка, разупрочнение мерзлых пород, влагометрия. Наконец, электронные генераторы начали использовать и в быту – в качестве примера можно назвать микроволновые печи, обладающие определенными преимуществами при приготовлении пищи.

Электронные генераторы можно классифицировать по различным признакам:

по способу возбуждения – с посторонним возбуждением и самовозбуждением (автогенераторы);

по форме генерируемых колебаний – генераторы гармонических (синусоидальных) колебаний и несинусоидальных (релаксационных) колебаний;

по диапазону генерируемых частот – низкочастотные (до 100 кГц), высокочастотные (100 кГц–100 МГц), ге-

нераторы сверхвысоких частот (СВЧ) – свыше 100 МГц, генераторы оптического диапазона.

Электронные генераторы с постоянным возбуждением, по существу, являются избирательными (резонансными) усилителями. Генератор с самовозбуждением называется автогенератором.

По принципу действия автогенераторы можно разделить на три вида:

1) *автогенераторы с положительной обратной связью* – такие генераторы имеют наибольшее распространение;

2) *генераторы с отрицательным сопротивлением*, например, построенные на туннельных диодах;

3) *автогенераторы*, в которых используется устройство, сопротивление которого в процессе работы изменяется скачком (например, электронный прибор в ключевом режиме).

Рассмотрим принцип действия автогенератора с положительной обратной связью (рис. 116).

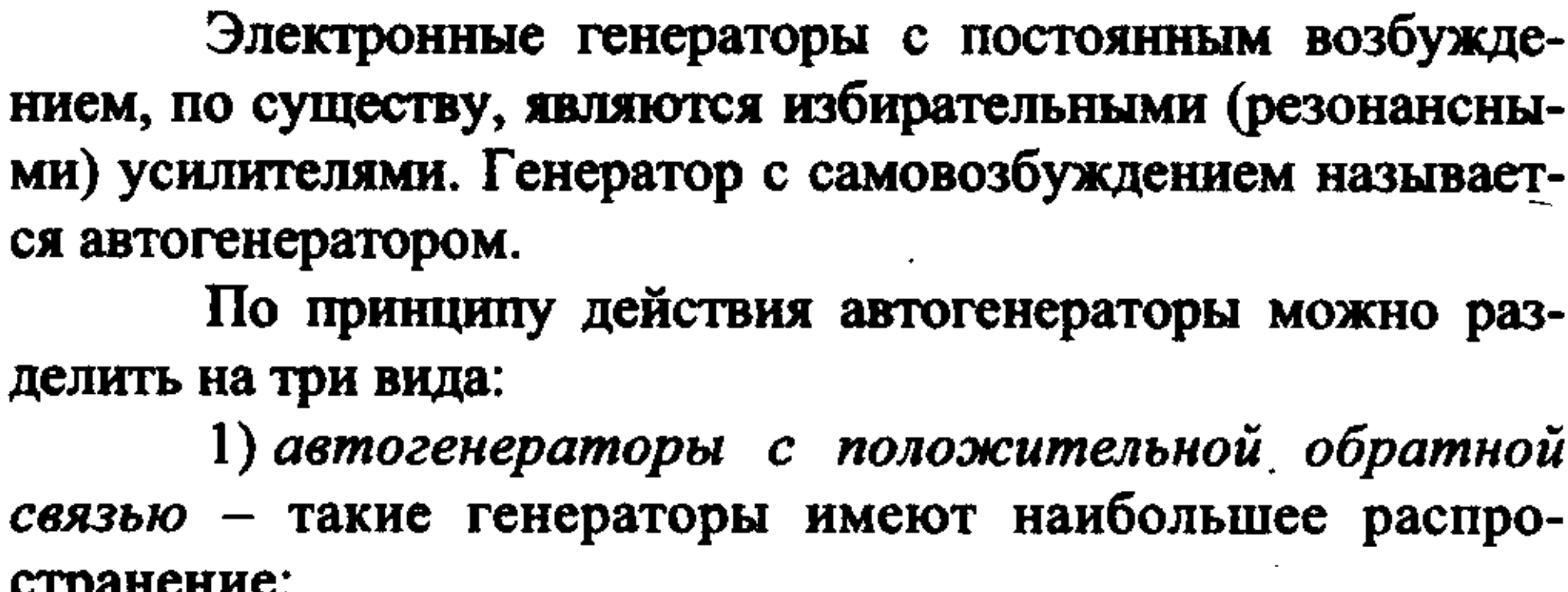


Рис. 116. Структурная схема усилителя с разомкнутой цепью обратной связи (а) и превращение его в автогенератор (б)

Коэффициент усиления по напряжению $k = U_{вых} / U_{вх}$, коэффициент обратной связи $\beta = U_{о.с} / U_{вых}$; $U_{о.с}$ – напряжение обратной связи.

Из выражений для K и β следует, что

$$U_{о.с} = \beta U_{вых} = \beta k U_{вх}.$$

Если за счет подбора β добиться, чтобы $\beta k = 1$, то $U_{о.с} = U_{вх}$.

Если при выполнении этих условий отключить напряжение $U_{вх}$ от постороннего источника и подключить на вход усилителя $U_{о.с} = U_{вх}$, то усилитель будет в тех же условиях, в каких он находился, когда на его вход подавалось напряжение от постороннего источника, и, таким образом, усилитель превращается в автогенератор.

Выполнение условия $U_{о.с} = U_{вх}$. называется выполнением *условия баланса амплитуд*. Кроме выполнения этого условия для превращения усилителя в автогенератор необходимо также выполнение *условия баланса фаз*, при котором напряжение $U_{ос}$ совпадает по фазе с напряжением $U_{вх}$. При этом потери энергии в автогенераторе восполняются через цепь обратной связи от источника питания автогенератора. Колебания на выходе схемы поддерживаются в такт (в фазе) колебаниям, поступающим на вход через цепь обратной связи. При $\beta < 1 / k$ напряжение на входе через цепь обратной связи окажется слишком малым и колебания на входе прекратятся. При $\beta > 1 / k$ напряжение на выходе будет возрастать до тех пор, пока нелинейность вольт-амперной характеристики усилителя не приведет к уменьшению k до значения, при котором будет выполняться условие $U_{о.с} = U_{вх}$.

Если условия баланса амплитуд и фаз выполняются для одной частоты, автогенератор будет генерировать гармонические колебания. Если условия выполняются для по-

лосы частот, то в генераторе будут возникать несинусоидальные колебания.

При использовании в генераторе *LC колебательного контура* образуются *LC-автогенераторы*, работающие на высоких частотах. В случае применения в качестве элементов схемы резисторов и конденсаторов образуются *RC-автогенераторы*, используемые для генерирования низких частот.

На рис. 117 показана упрощенная схема *LC*-автогенератора синусоидальных колебаний с индуктивной обратной связью. Она состоит из транзистора типа *n-p-n*, колебательного контура $L_к C_к$, катушки обратной связи $L_{о.с}$ и источника питания $E_п$. При замыкании ключа *K* напряжение источника питания вызывает коллекторный ток, который из-за индуктивности катушки $L_к$ будет нарастать постепенно, при этом заряжается конденсатор $C_к$. В генераторе используется контур с малыми потерями, т.е. с высокой *добротностью*, поэтому разряд конденсатора через катушку $L_к$ будет носить колебательный характер. Переменный ток в контуре через взаимоиндукцию *M* возбудит напряжение в катушке обратной связи $L_{о.с}$, которое попадает на базу транзистора и вызывает пульсацию тока базы и коллекторного тока. Переменная составляющая коллекторного тока создаст переменное напряжение на колебательном контуре, которое при выполнении условий баланса фаз и амплитуд превратит колебания в контуре в незатухающие.

Частота возникающих колебаний определяется частотой собственных колебаний контура.

$$\omega_0 = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{L_к C_к}}$$

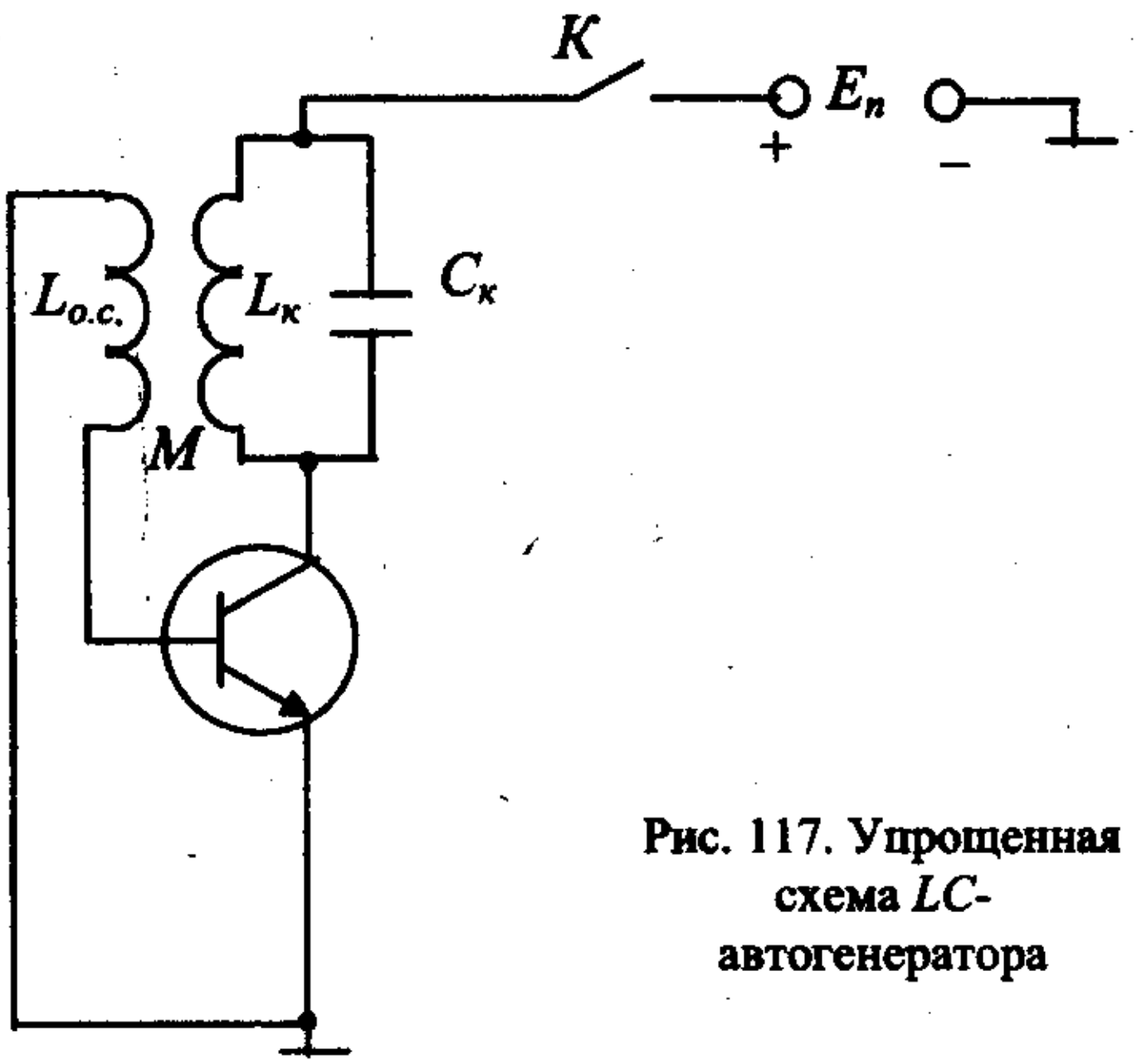


Рис. 117. Упрощенная схема *LC*-автогенератора

При необходимости построения автогенераторов в диапазоне низких частот использование *LC*-колебательных контуров нецелесообразно, так как такие контуры становятся громоздкими и имеют добротность меньшую, чем необходимо для самовозбуждения генератора. Генераторы самовозбуждения низкой частоты строят по другим схемам и в качестве цепей обратной связи используют элементы в виде резисторов и конденсаторов.

В схеме *RC-автогенератора с двойным Т-образным мостом* (рис. 118) на очень низких частотах, при $\omega \to 0$ коэффициент обратной связи $\beta \to 1$, так как сопротивления конденсаторов становятся большими и все напряжение $u_{вых}$ через один «верхний» *Т*-образный мост (R, $2C$, R) передается на вход в виде напряжения обратной связи $u_{o.c}$. На очень высоких частотах при $\omega \to \infty$ коэффициент $\beta \to 1$, так как сопротивления конденсаторов становятся малыми и все напря-

жение с выхода схемы через «нижний» *T*-образный мост (*C*, *R*/2, *C*) передается на ее вход.

На квазирезонансной частоте $\omega_0 = 1/RC$ (когда реактивное сопротивление $1/\omega_0 C$ становится равным *R*) общий коэффициент передачи $\beta = 0$, так как на этой частоте каждый из одинарных *T*-образных мостов, из которых состоит двойной *T*-образный мост, имеет равные по модулю и противоположные по фазе коэффициенты передачи и их выходные токи взаимно компенсируются, так что $u_{o.c} = 0$. На этой частоте в *RC*-автогенераторе возбуждаются колебания.

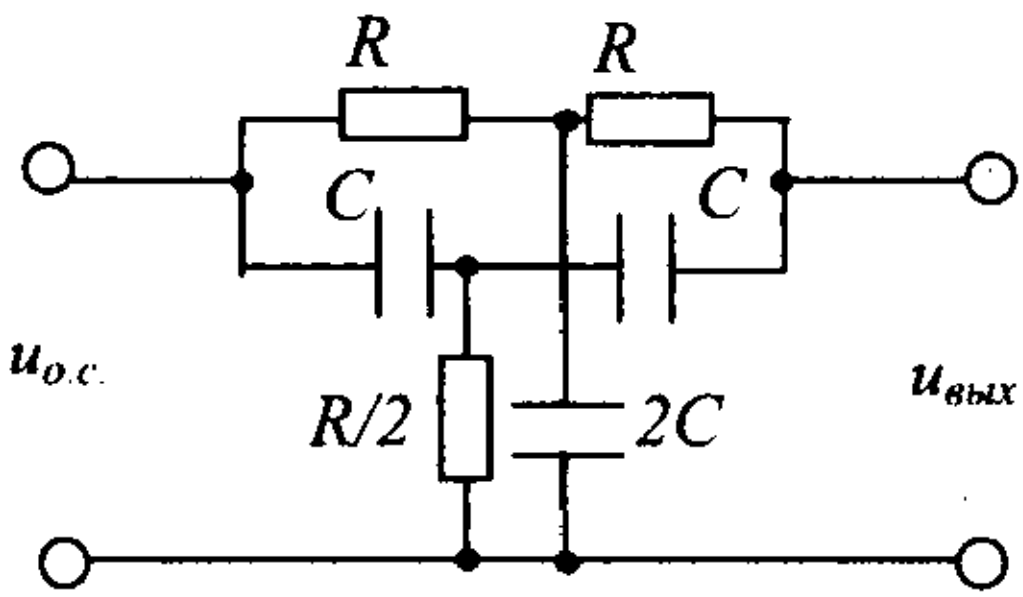


Рис. 118. Схема двойного Т-образного моста

6. ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Логические элементы – это электронные приборы, выполняющие простейшие логические операции. В настоящее время промышленность выпускает такие элементы в основном в интегральном исполнении. Логические элементы используются в большинстве цифровых интегральных микросхем, являясь их основными элементарными кирпичиками, которые во многом определяют их параметры.

Анализ работы логических интегральных микросхем базируется на использовании аппарата математиче-

ской логики. Все переменные в алгебре логики принимают только два значения, *«1»* или *«0»*, и любые математические действия над этими переменными обеспечивают результат так же либо в виде *«1»*, либо *«0»*. Логические элементы дают возможность изображать логические переменные с помощью электрических сигналов (напряжения или тока). Используются два возможных способа представления логической переменной: *потенциальный* и *импульсный*. При потенциальном способе «1» и «0» соответствуют два различных уровня напряжения; при импульсном – значениям «1» и «0» соответствуют появление и непоявление импульса в определенные промежутки времени. Наибольшее распространение получил потенциальный способ. При потенциальном способе задания различают положительную и отрицательную логику. При положительной логике высокий уровень напряжения соответствует «1», низкий – «0»; при отрицательной логике – наоборот.

Логические интегральные микросхемы отличаются большим разнообразием, поэтому широко используются их классификации:

по выполняемым логическим функциям (операциям);

по типу транзисторов, на основе которых они построены.

Решение любой логической задачи может быть выполнено с помощью трех основных логических операций: отрицания («НЕ»), сложения («ИЛИ») и умножения («И»).

Операция «НЕ», или логическая операция *отрицания* означает, что при этой операции логическая функция Y противоположна аргументу X.

Аналитически это может быть записано как $Y = \overline{X}$ (читается «не X»). Таблица истинности (таблица состояния входных и выходных переменных) имеет вид:

X	Y
0	1
1	0

Логический элемент, выполняющий операцию отрицания, называется *элементом «НЕ»* (инвертором), условное обозначение приведено на рис. 119а.

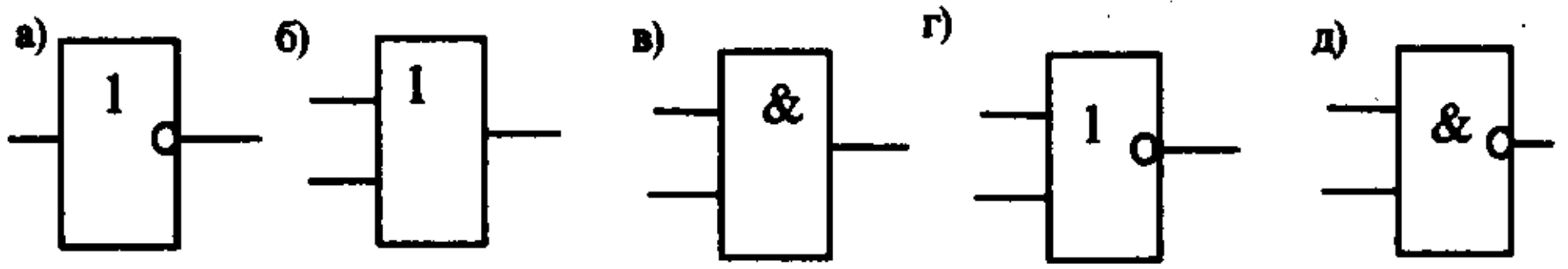


Рис. 119. Условные обозначения логических элементов: элемента «НЕ» (а); элемента «ИЛИ» (б); элемента «И» (в); элемента «ИЛИ-НЕ» (г); элемента «И-НЕ» (д)

Операция «ИЛИ» (*логическое сложение или дизъюнкция*) обозначается символами «+» или ∨, аналитически записывается как

$$Y = X1 + X2 + \ldots + Xn$$

или

$$Y = X1 \vee X2 \vee \ldots \vee Xn.$$

Таблица истинности при двух аргументах имеет вид:

X1	X2	Y
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

Логический элемент, осуществляющий операцию дизъюнкции, называется *элементом «ИЛИ»*, реализуется логической интегральной микросхемой, имеющей два и более входов и один выход, который принимает значение «1» всякий раз, когда хотя бы один из его входов равен «1». Условное обозначение элемента приведено на рис. 119б.

Операция «И» (*логическое умножение или конъюнкция*) обозначается символами «•» или $\wedge$, аналитически записывается как

$$Y = X1 \bullet X2 \bullet \ldots \bullet Xn$$

или

$$Y = X1 \wedge X2 \wedge \ldots Xn .$$

Таблица истинности (при двух аргументах) следующая:

*X*1	*X*2	*Y*
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Элемент, осуществляющий операцию конъюнкции, называется *элементом «И»*, реализуется логической интегральной микросхемой с двумя и более входами и одним выходом, на котором появляется сигнал «1» только тогда, когда на все входы одновременно поданы «1». Условное обозначение элемента «И» приведено на рис. 119 в.

Помимо рассмотренных логических элементов широко используются универсальные, осуществляющие две и более логических операций одновременно. Чаще

всего применяются логические элементы «ИЛИ-НЕ» (элементы Пирса) и «И-НЕ» (элемент Шеффера). Уравнение функции «ИЛИ-НЕ» $Y = \overline{X1 + X2}$, а функции «И-НЕ» $Y = \overline{X1 \bullet X2}$. Условные обозначения этих элементов приведены на рис. 119г, д.

Для оценки качества логических интегральных микросхем используются их основные параметры и характеристики.

К основным параметрам относятся:

1. *Быстродействие* – время реакции на изменение сигнала на входе.

2. *Коэффициент объединения по входу* $K_{об}$ – число входов, с помощью которых реализуется логическая функция. Обычно $K_{об} = 2 \div 8$.

3. *Коэффициент разветвления по выходу* $K_{раз}$ характеризует нагрузочную способность и показывает максимальное число аналогичных элементов, которые можно подключить к выходу данного элемента без нарушения его работы ($K_{раз} = 4 \div 10$).

4. *Помехоустойчивость* – максимальное значение помехи на входе, при которой сохраняется нормальная работа.

5. *Потребляемая мощность* – мощность, потребляемая в состоянии «1» и «0».

Основные характеристики позволяют:

- *входная* – рассчитывать условия согласования при подключении к выходу какого-либо источника сигнала;
- *выходная* – определять нагрузочную способность;

- *передаточная* – определять порог срабатывания (значение напряжений, соответствующих логической «1» и логическому «0»), и помехоустойчивость при работе друг на друга.

Цифровые интегральные микросхемы в подавляющем большинстве могут быть выполнены на одних активных элементах (транзисторах, диодах). Они не критичны к абсолютному уровню напряжений и токов и отличаются регулярностью структуры.

Можно выделить четыре основных типа интегральных микросхем на основе биполярных транзисторов:

– диодно-транзисторная логика, характерны высокая помехоустойчивость и невысокое быстродействие;

– транзисторно-транзисторная логика, характерны высокое быстродействие, хорошая нагрузочная способность, малая потребляемая мощность;

– эмиттерно-связанная логика, обладающая самым высоким быстродействием;

– инжекционно-интегральная логика, имеет высокое быстродействие, высокую степень интеграции и плотность упаковки, но низкую помехоустойчивость и малый перепад логических уровней.

Базовым элементом логических интегральных микросхем на МДП-транзисторах также является инвертор, состоящий из транзистора и нагрузочного резистора в стоковой цепи, причем в качестве резистора тоже используется МДП-транзистор. Такие интегральные микросхемы делятся на одноканальные, в которых и МДП-транзистор и МДП-резистор имеют канал одного «*p*» или «*n*»-типа, и комплементарные, в которых используется пара МДП-транзисторов с каналами разного типа. Последние предпочтительнее, так как их отли-

чают высокая технологичность, малая потребляемая мощность, высокая степень интеграции.

7. ГЕНЕРАТОРЫ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Для получения прямоугольных импульсов используют *релаксационные генераторы*. Если релаксатор работает в ждущем режиме, то он имеет состояние устойчивого равновесия и состояние квазиравновесия. Переход из первого состояния во второе происходит под воздействием внешнего запускающего импульса, а обратный переход – самопроизвольно по истечении некоторого времени, определяемого параметрами схемы. Такой релаксатор называют *одновибратором*. В режиме автоколебаний релаксатор имеет два состояния квазиравновесия, переходит из одного состояния в другое без внешних воздействий, генерируя импульсы, параметры которых зависят от параметров релаксатора. Такой релаксатор называют *мультивибратором*.

Простейший мультивибратор на биполярных транзисторах (рис. 120) представляет собой двухкаскадный усилитель с положительной обратной связью. Схема симметричная, т.е. *VT1* и *VT2* – транзисторы одного типа; $C1=C2$; $R_к1=R_к2$; $R_б1=R_б2$.

Пусть в момент времени $t=t_0$ транзистор *VT1* закрылся, а транзистор *VT2* открылся. В этом состоянии квазиравновесия, т.е. в первом полупериоде колебаний, разряжается конденсатор *C1* по цепи: $C1\text{-}R_б1\text{-}E_к\text{-}VT2\text{-}C1$, по мере убыли разрядного тока, протекающего через $R_б1$, убывает напряжение на базе *VT1*. В момент, когда напряжение на базе *VT1* достигнет нулевого уровня, отпирается *VT1*; рост коллекторного тока последнего приводит к выводу *VT2* из насыщенного состояния и восстановлению положительной обратной связи. В результате развивается лавинообразный

процесс, завершающийся запиранием *VT2* и переходом схемы во второе состояние квазиравновесия. Теперь разряжается *C2* через $R_б2$ и насыщенный *VT1*. Второй полупериод колебаний завершается в момент достижения напряжением на базе *VT2* нулевого уровня; в этот момент отпирается *VT2* и происходит обратное опрокидывание в первое состояние квазиравновесия. Заметим, что в первом полупериоде наряду с разрядом *C1* идет заряд конденсатора *C2* по цепи: $E_к$-$R_к1$-*C2*-*VT2* с постоянной времени $\tau_з=R_к1\cdot C2$, а во втором полупериоде – заряд конденсатора *C1* с постоянной времени $\tau_з=R_к2\cdot C1$. Спустя промежуток времени $t\approx3\tau$, заряд конденсатора заканчивается, и напряжение на коллекторе становится равным $E_к$. Для улучшения формы импульсов в схему включают отсекающие диоды (на схеме не показаны).

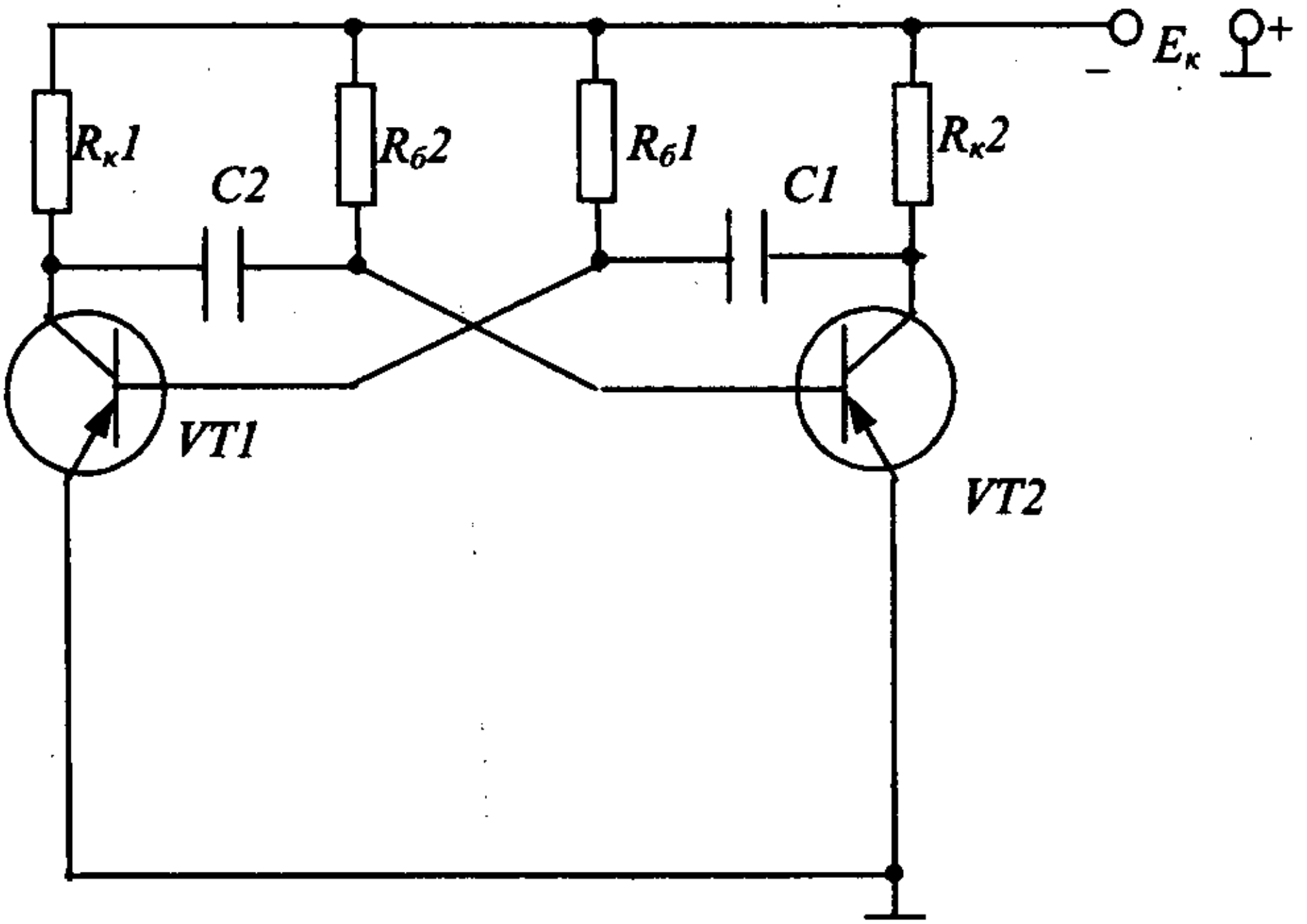


Рис. 120. Схема мультивибратора на биполярных транзисторах

Построение симметричного автоколебательного мультивибратора на цифровых микросхемах транзисторно-транзисторной логики аналогично устройству подобных приборов на дискретных элементах, с той лишь разницей, что усилительный каскад на транзисторе заменяется логическим элементом «И-НЕ».

Генераторы прямоугольных импульсов, построенные на цифровых логических элементах, получили широкое распространение на практике. Они отличаются высокой надежностью, хорошей стабильностью, простотой и требуют малого количества радиоэлементов для своего построения. Они могут создаваться как на основе простых логических элементов, выполняющих одну функцию «И», «ИЛИ», «НЕ», так и на основе сложных, выполняющих две и более функции, например, «ИЛИ-НЕ», «И-НЕ» и др.

8. ТРИГГЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА

Триггер – это устройство, имеющее два состояния устойчивого равновесия и способное скачком переходить из одного состояния в другое под воздействием внешнего управляющего сигнала.

В современной электронике триггеры выполняются либо на основе интегральных логических элементов, либо в виде интегральной микросхемы, представляющей собой завершенный функциональный элемент.

Триггер на цифровых интегральных микросхемах имеет в своем составе собственно триггер и логическое управляющее устройство, которое определяет функциональные возможности триггера. Управляющее устройство преобразует

поступающую на вход информацию в сигналы, управляющие собственно триггером. Сам триггер можно считать элементом памяти, записывающим полученную информацию.

Триггерное устройство имеет информационные и тактовые (синхронизирующие) входы и два выхода: прямой и инверсный. Состояние триггера определяется выходным сигналом в единичном или в нулевом состоянии.

По способу записи информации триггеры подразделяются на асинхронные и синхронные (тактируемые). В асинхронных триггерах запись информации осуществляется непосредственно с поступлением информационного сигнала на его вход. В синхронных триггерах запись информации происходит при подаче разрешающего (синхронизирующего) импульса по уровню или по фронту 1/0 (0/1). В течение паузы между синхроимпульсами состояние триггера сохраняется при любых изменениях информационных сигналов.

По функциональному назначению триггерные устройства разнообразны. На практике наибольшее применение получили RS-, D-, T-, JK-триггеры. Работу триггера удобно описать с помощью таблицы истинности, выражающей зависимость выходного сигнала триггера в момент времени t_{n+1} от входных сигналов и состояния триггера в предыдущий момент времени t_n.

Для асинхронного триггера момент времени t_{n+1} наступает, когда под действием входных сигналов и в зависимости от внутреннего состояния в момент времени t_n выходной сигнал принимает значение, соответствующее последующему состоянию. Для синхронного триггера время t_n и t_{n+1} означает время до и после прихода синхроимпульса.

RS-триггер

Асинхронные *RS*-триггеры являются простейшими и получили широкое распространение в импульсной и цифровой технике. В частности, они служат основой триггеров других типов и легко могут быть построены на логических элементах типа «ИЛИ-НЕ» или «И-НЕ».

Условное обозначение асинхронного *RS*-триггера приведено на рис. 121а, характер функционирования – в таблице истинности.

Как видно из третьей строки, при отсутствии на входе *RS*-триггера импульсов сохраняется предыдущее состояние его входов. Одновременная подача логической «1» на оба входа запрещена из-за неопределенности состояния на выходе.

Вход S	Вход R	Q_{t+1}	$\overline{Q}_{t+1}$
0	1	0	1
1	0	1	0
0	0	Q_t	$\overline{Q}_t$
1	1	*	*

Примечание. *R* **и** *S* **– информационные сигналы на входе триггера;** Q_t, Q_{t+1} **– состояние триггера соответственно до и после прихода информационных сигналов; * – неопределенное состояние триггера**

В отличие от асинхронного *RS*-триггера, срабатывающего с приходом информационных сигналов *R* и *S*, синхронный триггер будет сохранять состояние Q_t, несмотря на наличие информационных сигналов на входах, и только с

приходом тактового импульса воспринимает информацию по входам и переходит в новое устойчивое состояние.

D-триггер

Название происходит от английского слова *delay* – задержка, поэтому этот триггер называется триггером задержки. Он имеет информационный вход *D* и вход синхронизации *C* (рис. 121б).

Триггер является тактируемым и работает по простейшей логике, соответствующей таблице истинности:

C	D	Q_{t+1}	$\bar{Q}_{t+1}$
1	1	1	0
1	0	0	1
0	1	Q_t	$\bar{Q}_t$
0	0	Q_t	$\bar{Q}_t$

Триггер меняет свои значения на выходах (переключается) только при подаче тактирующих импульсов на вход *C*.

Тактируемые *D*-триггеры могут быть с потенциальным и динамическим управлением. У первых из них информация записывается в течение времени, при котором уровень сигнала $C = 1$. В триггерах с динамическим управлением информация записывается только в течение перепада напряжения на входе синхронизации. Динамические входы изображают на схемах треугольником.

T-триггер

T-триггер имеет один управляющий счетный вход (*T*) и два выхода (Q и $\bar{Q}$) (рис. 121в). Информация на выхо-

де меняет значение на противоположное при каждом перепаде напряжения на входе. Таблица истинности:

T	Q_{t+1}	$\bar{Q}_{t+1}$
0	Q_t	$\bar{Q}_{t+1}$
1	$\bar{Q}_t$	Q_t

Триггер является асинхронным. *T*-триггер подсчитывает входные сигналы по модулю 2 , т.е. частота выходных импульсов в два раза меньше входных. Это свойство используется при построении двоичных счетчиков.

JK - триггер

Это универсальный триггер, специфичный только для ИМС. *JK*-триггеры могут быть синхронными и асинхронными. Условное обозначение синхронного *JK*-триггера показано на рис. 121г.

При поочередном поступлении импульсов на входы *JK*- триггер работает подобно *RS*-триггеру, но при одновременной подаче импульсов на оба входа *JK*-триггер меняет свое состояние на противоположное.

J	*K*	Q_{t+1}	$\bar{Q}_{t+1}$
0	0	Q_t	$\bar{Q}_t$
1	0	1	0
0	1	0	1
1	1	$\bar{Q}_t$	Q_t

JK-триггер универсален, так как путем внешней коммутации может быть преобразован в *RS*-,*D*-,*T*-триггеры.

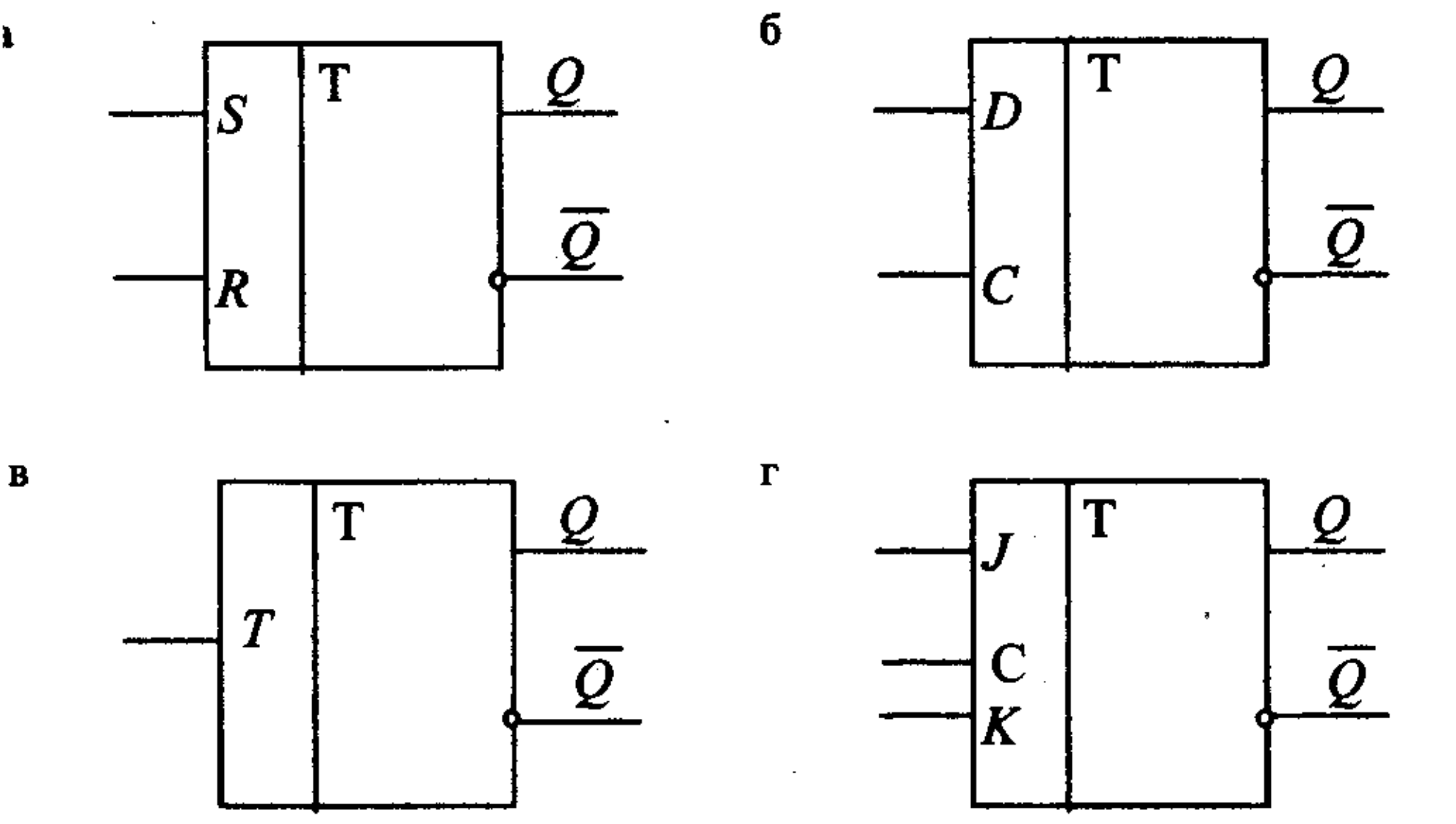


Рис. 121. Условное обозначение *RS*-триггера (а), *D*- триггера (б), *T*-триггера (в), *JK*- триггера (г)

9. НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

В последнее время крупные разработчики полупроводниковых приборов уделяют особое внимание созданию новых светодиодов, лазерных диодов и диодов Шоттки.

Совместная работа исследовательских лабораторий японской корпорации Toshiba и Кембриджского университета привела к созданию светодиодов, позволяющих сделать оптоволоконную связь практически неуязвимой для перехвата. Ученым удалось за счет внедрения полупроводниковых нанотехнологий получить новый тип излучающих светодиодов, испускающих по одному фотону в заданный про-

межуток времени. Одним из назначений данного изобретения является борьба против хакеров.

Исследователи из Sandia National Laboratories осуществили интеграцию квантовых точек в светодиод, в результате чего был получен источник белого света. Основным отличием «квантовых» светодиодов Sandia от белых светодиодов, флуоресцирующих источников света и ламп накаливания являются их высокая эффективность, дешевизна и простота изготовления, обусловленная отсутствием сложных фосфористых соединений. Под квантовыми точками подразумеваются наноструктуры размером меньше длины волны видимого света. Наноструктуры переводятся в возбужденное состояние поглощением высокоэнергетичных ультрафиолетовых фотонов, а затем переизлучают тепловые фотоны в непрерывном спектре. На данный момент используются наноструктуры (микрокристаллы сульфата кадмия), которые излучают в видимом диапазоне только при возбуждении ультрафиолетом. Обычно эффективность (аналогичная коэффициенту полезного действия) у фосфористых источников не превышает 50% из-за рассеяния света, в то время как в новом светодиоде эффективность может быть близка к 100%, так как рассеяние сводится к минимуму (из-за того, что размер наноструктур меньше длины волны).

Японская компания Sony разработала новый двухволновой лазерный диод, предназначенный для использования в приводах дисков CD/DVD. При изготовлении диодов использована специальная гибридная технология, благодаря которой удалось разместить элементы лазера в столь малом

объеме. Диоды крайне малы, их диаметр составляет 5,6 мм, при толщине в 3 мм.

Диоды Шоттки основаны на эффекте образования потенциального барьера на границе между металлом и полупроводником и характеризуются малым временем переключения.

Фирма Infineon, дочернее предприятие немецкого концерна Simens, приступила к промышленному производству мощных диодов Шоттки на основе карбида кремния (SiC). Этот материал имеет ряд существенных преимуществ: по электропроводности не уступает меди, обеспечивает граничную частоту до 500 килогерц и выдерживает в десять раз более высокие напряжения, чем такие традиционные полупроводниковые материалы, как арсенид галлия, кремний, германий или селен. Благодаря таким параметрам новые диоды получат широкое применение при создании компактных и дешевых электронных схем для компьютерной и телекоммуникационной техники (например, малогабаритных блоков питания для компьютеров, которые не нуждаются в радиаторах и шумящих вентиляторах).

Компания Royal Philips Electronics выпустила семейство диодов Шоттки для использования в высокочастотных цепях в мобильных телефонах. Новые диоды имеют чрезвычайно низкую электрическую емкость (меньше 1 пФ). Из-за рекордно низких показателей емкости новые диоды особенно перспективны для всех устройств, где есть блоки преобразования ВЧ-сигналов, в особенности для сотовых телефонов.

Полупроводниковый транзистор рассматривается современными исследователями как элемент микросхем.

Передовые достижения в области транзисторов обусловлены кризисом мощности, который заставляет инженеров пересматривать конструкцию таким образом, чтобы минимизировать потребляемый ток и/или выделяемую энергию.

Корпорация IBM разработала новый транзистор со сдвоенным затвором (Double Gate transistor). Новая конструкция позволяет удвоить пропускаемый по каналу электрический ток или уменьшить электрический потенциал, прилагаемый к затвору, без потери качества управления.

Технологией Double Gate IBM вклинивается в основные структурные элементы транзисторов. Транзистор состоит из трех базовых элементов: истока, затвора и стока. Затвор находится над истоком и стоком и на одинаковом расстоянии от них — как перекладина буквы П. Исток и сток, в свою очередь, расположены поверх кремниевой подложки, а в случае IBM – еще и поверх слоя, называемого «кремний на изоляторе» (Silicon on Insulator, SOI).

В транзисторах со сдвоенным затвором затвор не просто помещается над парой исток-сток, а охватывает ее с обеих сторон как тиски. Вся эта структура размещается на слое SOI. Причем буква П поворачивается на бок, так что все три элемента касаются слоя SOI, в результате качество изоляции улучшается.

Специалисты компании AMD (Advanced Micro Devices) считают, что ускорение работы транзисторов и их дальнейшая миниатюризация – основное условие получения более мощных процессоров, и предлагают для этого несколько путей.

Первый из предложенных способов основывается на технологии FDSOI (полностью обедненный кремний на изоляторе). Транзисторы, изготовленные по такой технологии, обгоняют в быстродействии транзисторы PMOS (металлоксидный полупроводник с P-каналом) на 30%. Еще одна технология, разработанная исследователями AMD, заключается в применении напряженного кремния (Strained Silicon) в сочетании с металлизированными затворами. Металлизированные затворы – новейшая разработка компании AMD, использующая для создания затворов силицид никеля, в отличие от обычных транзисторов, в которых для данной цели служит поликристаллический кремний. Быстродействие транзисторов, использующих металлизированные затворы, на 25% превышает скорость работы обычных транзисторов. Использование металлизированных затворов позволит усовершенствовать существующий процесс изготовления транзисторов и обеспечит их дальнейшую миниатюризацию.

Современные транзисторы SOI работают на тонком слое кремния, под которым находится изолятор, не допускающий утечки тока в подложку. Быстродействие такого транзистора зависит от толщины кремния, чем подложка тоньше, тем выше скорость тока, и, соответственно, ускоряется работа транзистора. Полностью обедненный кремний позволяет достичь наивысшего на данный момент быстродействия. Заряд может течь быстрее не только за счет уменьшенной толщины кремния, но и за счет того, что его кристаллическая решетка разрежена – атомы более удалены друг от друга. Исследователи полагают, что сочетание технологий полностью обедненного кремния и металлизиро-

ванных затворов обеспечит дополнительные преимущества при разработке микросхем на основе новых полупроводниковых технологий.

Корпорация Intel разработала транзисторы принципиально новой конструкции под кодовым названием TeraHerz и создала новые материалы для их изготовления. Новая технология устраняет выявленные в последнее время препятствия технического характера, замедляющие темпы развития полупроводниковых технологий. Результатом применения новых транзисторов станет резкое наращивание быстродействия компьютерных микросхем, повышение эффективности энергопотребления, снижение тепловыделения. Новый транзистор имеет сверхтонкую кремниевую подложку, которая отличается от устройств традиционной компоновки по принципу «полупроводник на изоляторе» прежде всего тем, что изготавливается из полностью обедненного материала, позволяющего генерировать максимальный ток возбуждения при включенном транзисторе, что повышает скорость выполнения циклических переключений.

При выключенном же транзисторе утечка тока снижается до минимума благодаря тончайшему изолирующему слою. Таким образом, утечка тока в транзисторе на обедненной подложке в 100 раз ниже аналогичного показателя транзисторов, скомпонованных по традиционной схеме «полупроводник на изоляторе». Еще одним новшеством, примененным в транзисторах на обедненной подложке, являются контакты с низким сопротивлением, встроенные в верхнюю часть полупроводникового слоя. Благодаря этому

транзистор отличается чрезвычайно малыми размерами, высоким быстродействием, низким энергопотреблением.

Вторая ключевая составляющая транзисторов следующего поколения – новый материал изготовления подложки, призванный заменить диоксид кремния. Во всех транзисторах имеется изолирующий слой, отделяющий «затвор» транзистора от его активной зоны. В современных транзисторах, обладающих рекордными показателями, толщина изолирующего слоя затвора, изготавливаемого из диоксида кремния, не превышает 0,8 нанометра, что примерно соответствует толщине трех слоев атомов. И тем не менее, утечка тока даже через столь тончайший изолирующий слой становится одним из главных факторов повышенного энергопотребления.

Новые транзисторы Intel способны побить рекорды быстродействия за счет применения материала нового типа, названного «высокоизолирующим диэлектриком К-затвора». По сравнению с диоксидом кремния, новый материал более чем в 10000 раз снижает утечку тока через затвор. Высокоизолирующий диэлектрик К-затвора изготавливается на основе принципиально новой технологии, названной «атомно-послойным осаждением» и позволяющей наращивать новый материал послойно. При этом толщина такого слоя не превышает одной молекулы. На практике это означает рост производительности, снижение тепловыделения, значительное продление сроков службы батарей питания мобильных устройств.

Одним из основных направлений является минимизация размеров микросхем, используемых в ноутбуках, мобильных телефонах, медицинской диагностической аппара-

туре, коммуникационных устройствах, оптоэлектронной технике. Японская компания Toshiba разработала многокристальную микросхему длиной всего 10 мм и шириной 7 мм. Размеры новой разработки примерно на тридцать процентов меньше предшественников, что упрощает использование таких микросхем в сотовых телефонах. Компания Linear Technology создала новые операционные усилители, обладающие низким уровнем шумов, высокой эффективностью усиления, быстрым нарастанием выходного напряжения, что делает эти продукты подходящими для применения в медицинской диагностической аппаратуре, коммуникационных устройствах и оптоэлектронной технике.

В силовой электронике в настоящее время получили распространение IGBT-транзисторы или биполярные транзисторы с изолированным затвором, в которых в отличие от классического биполярного транзистора инжекция носителей в базу осуществляется не p-n переходом база-эмиттер, а полевым транзистором с изолированным затвором. Такая конструктивная особенность приводит к следующим важным свойствам: база как конструктивный элемент, через который осуществляется пролет носителей, отсутствует; эмиттер имеет площадь, сравнимую с площадью коллектора; эмиттер и коллектор могут быть разнесены на значительное расстояние, что в совокупности с малым легированием коллектора позволяет достичь значительных пробивных напряжений; приборы этого типа не могут достичь частотных характеристик как полевых транзисторов, так и классических биполярных. Современные IGBT-транзисторы могут работать на частотах до 75 кГц при рабочем напряжении 1200 В и токе до 78 А.

При подготовке этого параграфа использованы материалы сайтов: cdrinfo.com, intel.com, philips.com, airtonspb.ru, baltnet.ru, CNews.ru, news.ferra.ru, old.computerra.ru,. pchome.ru, platan.ru, xterra.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

Электротехника. Электрические цепи 3

Введение 5
1. Основные понятия
электрических цепей 7
2. Топологические понятия электрических цепей .. 12
3. Законы электрических цепей 13
4. Режимы работы электрических цепей 13
4.1. Электрические цепи постоянного тока 14
4.2. Электрические цепи переменного тока 22
4.3. Мощность цепи переменного тока 29
4.4. Символический метод расчета цепей
переменного тока 31
4.5. Резонансные явления
в электрических цепях 37
5. Цепи с индуктивными связями 43
6. Переходные процессы в электрических цепях . 46
7. Трехфазные цепи 50
8. Нелинейные цепи 61
9. Периодические несинусоидальные токи
и напряжения в электрических цепях 64
10. Магнитные цепи 67
11. Средства измерения электрических величин ... 72
12. Электробезопасность
и методы ее обеспечения 79

Электротехника. Электрические машины 103

1. Трансформатор 105
2. Асинхронный двигатель 112
3. Синхронная машина 122
4. Машина постоянного тока 128
5. Виды защиты электрооборудования 135
   5.1. Тиристорные ключи 140
   5.2. Тиристорный регулятор напряжения 146
   5.3. Тиристорный регулятор мощности 148
   5.4. Тиристорный пускатель 151
   5.5. Микропроцессор 154
   5.6. Контроллер 166
6. Электропривод 172
7. Системы управления и регулирования электроприводов 182
8. Технические требования к электроприводу 186

Электротехника. Электроснабжение, электробезопасность 189

Основные понятия электроснабжения и электробезопасность 191

1. Влияние на уровень электробезопасности режимов нейтрали в трехфазных электрических сетях при коротких замыканиях 197
2. Технико-экономические показатели электропотребления 201

Электроника 203

Введение 205

1. Полупроводниковые приборы 207
2. Источники вторичного электропитания 232
3. Стабилизаторы напряжения постоянного тока 241
4. Электронные усилители 245
5. Электронные генераторы гармонических сигналов 255
6. Логические элементы 260
7. Генераторы прямоугольных импульсов 266
8. Триггерные устройства 268
9. Новые разработки в области полупроводниковых приборов 273

Справочное издание

Наталья Васильевна Нефедова,
Петр Михайлович Каменев,
Ольга Михайловна Большунова

Карманный справочник по электронике и электротехнике

Ответственные редакторы: *Оксана Морозова,*
Наталья Калиничева
Технический редактор: *Галина Логвинова*
Корректор: *Татьяна Краснолуцкая*
Макет обложки: *Инна Лойкова*
Компьютерная верстка: *Михаил Говоров*

Подписано в печать 16.04.2004.
Формат 70×100 $^{1}/_{32}$. Бумага типографская № 2.
Гарнитура ScoolBook. Тираж 3 000 экз. Зак. №

ООО «Феникс»
344082, г. Ростов-на-Дону, пер. Халтуринский, 80

Отпечатано с готовых диапозитивов в типографии ООО «КубаньПечать».
350059, г. Краснодар, ул. Уральская, 98/2, заказ № 2741 от 23.06.2008 г.
Качество печати соответствует качеству предоставленных диапозитивов.