

Дисциплина – «Электротехника и электроника»

Часть 1 (весенний семестр 2019/20 учебного года)
для групп 2 курса (механический факультет)

Электрические и магнитные цепи

Измерения и основы электроники



*Кафедра Теоретической
электротехники и
электрообеспечения нефтяной и
газовой промышленности
д.т.н., профессор Портнягин
Николай Николаевич*

[Раб. место Ауд. 313](#)

Рекомендуемая литература

- Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 440 с., ил.
- Электротехника и электроника в 3-х кн. Под ред. В.Г. Герасимова Кн.2. Электромагнитные устройства и электрические машины. – М.: Высшая шк. – 2007 г.
- С.Г. Максютов, Н.Н. Леонова, А.Ю.Зверьков Сборник типовых контрольных работ по курсу «Общая электротехника и электроника» для студентов факультета инженерной механики. Под ред. Проф. М.С. Ершова.-М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2011.-82с

- **пароли назначаете сами при регистрации.**
Поэтому прошу всех до 15 зарегистрироваться с вводом Ф.И. и каждый в свою группы и назначить себе пароли запомнить их и не передавать другим студентам. Эти пароли будут действовать до конца осеннего семестра.

20 февраля регистрация будет закрыта, не зарегистрированные проходят Тестирование на кафедре во время консультаций. Для защиты рекомендуется пароль Из 5-7 знаков с использованием букв латинского алфавита и цифр(не используйте при паролях свои реальные имена, если используете то добавляйте какой-нибудь символ или две цифры Длинные пароли не применяйте

Перечень групп для регистрации Вам выдаст сервер при входе, естественно выбираете свою группу и регистрируетесь

IP адрес входа

95.154.166.124 (набирается в адресной строке любого браузера,

ИЛИ

95.154.166.124: 8080 (в том случае если Ваш браузер не находит сервер тестирования)

Далее если хотите получать мои консультации при прохождении тестов и электронную копию всех метод указаний и презентации лекций

Пришлите на адрес pornic2@yandex.ru письмо для установки с вами связи укажите ФИО и группу, если этой информации не будет связь не установлю и материалы не вышлю.

- **УСПЕШНОЙ РЕГИСТРАЦИИ**

План изучения дисциплины

Лекции (тестовый контроль)

- 1. Электрические цепи постоянного и переменного тока(8 недель), Тест №1(5 баллов)
- 2. Магнитные цепи, трансформаторы(4 недели)
Тест №2(5 баллов)
- 3. Измерения и основы электроники(4 недели) Тест №3(9 баллов)
- **7 Лабораторных работ по 3 балла – 21 балл**

Лекция №1

- *План лекции*
- ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И
ОПРЕДЕЛЕНИЯ
- РЕЗИСТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
- ИНДУКТИВНЫЙ И ЕМКОСТНЫЙ
ЭЛЕМЕНТЫ
- ИСТОЧНИКИ ПОСТОЯННОГО

Основные понятия и определения

- Электротехника – наука о практическом применении электрических и магнитных явлений.
- На предприятиях по переработке технологические потоки входят традиционные для многих отраслей производства механические и гидромеханические процессы (перекачка, дозирование, смешивание, разделение неоднородных и однородных жидкостей и т.п.), тепловые процессы, а также целый ряд специфических операций
- Механизация и автоматизация технологических процессов во многом зависит от уровня электрификации этих процессов

Основные понятия и определения

- Для работы любого электротехнического устройства необходимо, чтобы через него проходил электрический ток, обязательным условием существования которого является наличие замкнутого контура – электрической цепи.
- Основными элементами электрической цепи являются источники и приемники электрической энергии. Кроме этих элементов, электрическая цепь содержит измерительные приборы, коммутационную аппаратуру, соединительные линии, провода.
- В источниках электрической энергии различные виды энергии преобразуются в электрическую.
- Так, в генераторах электростанций в электрическую энергию преобразуется энергия механическая, в гальванических элементах и аккумуляторах – химическая, в солнечных батареях – световая и т.д.
- В приемниках электрическая энергия источников преобразуется в тепловую (нагревательные элементы),⁷ световую (электрические лампы), и т.д.

Резистивные элементы

- Приемники электрической энергии по характеру физических процессов, протекающих в них, делятся на три основных вида:

резистивные; индуктивные; емкостные.

- Основной характеристикой резистивного элемента является его вольтамперная характеристика (ВАХ).) $U=f(I)$ (1.1)

где U – напряжение, В;

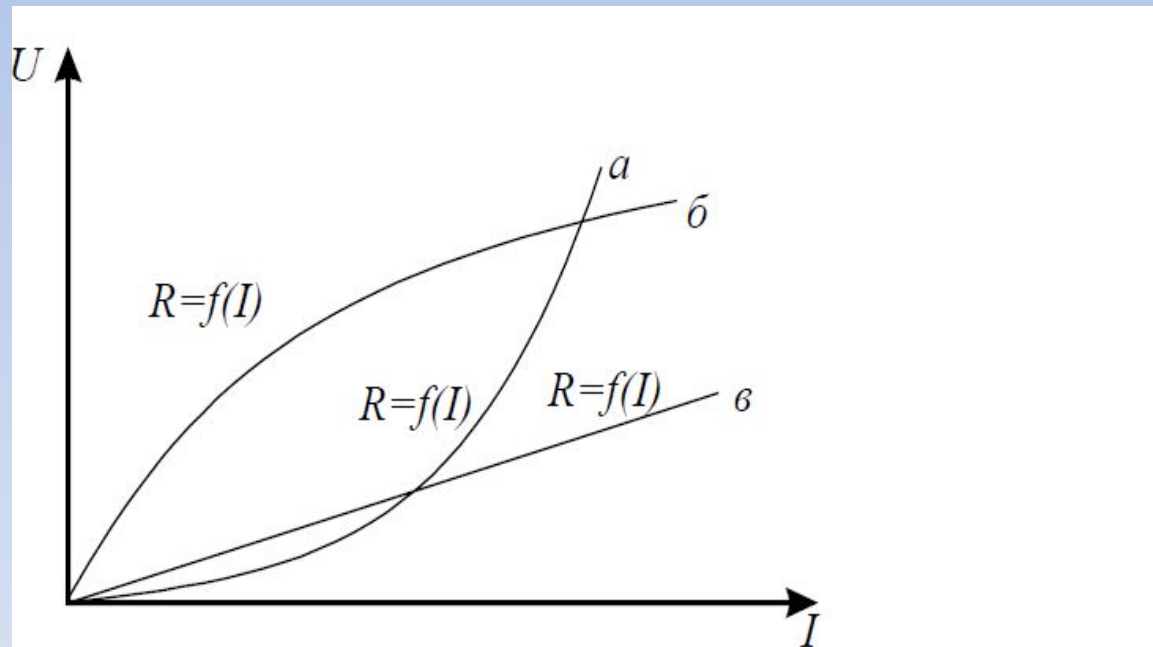
I – сила тока, А.

известный как закон Ома: $U=R*I$ (1.2)

Резистивные элементы

$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$ где R_0, R – сопротивления проводников при температуре T_0, T , Ом

T_0 – начальная температура проводника, К;
 T – конечная температура проводника, К;
 α – температурный коэффициент сопротивления.




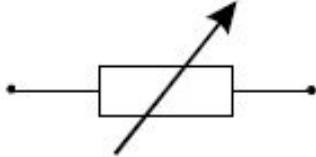
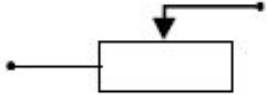
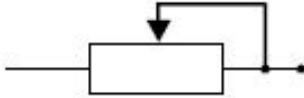
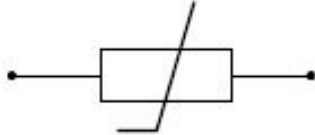
– Общий вид ВАХ металлического (а), полупроводникового (\bar{b}), и константанового (в) резистивных элементов.

Резистивные элементы

Наименование материала	Удельное сопротивление при 20 °С, мкОм м	Температурный коэффициент сопротивления, 1/°К
Медь	0,0172-0,0182	0,0041
Алюминий	0,0295	0,0040
Сталь	0,125-0,146	0,0057
Вольфрам	0,0508	0,0048
Уголь	10-60	-0,005
Манганин (Cu-80 %, Mn-12 %, Ni-3 %)	0,4-0,52	$3 \cdot 10^{-5}$
Константан	0,44	$5 \cdot 10^{-5}$
Нихром (Cr-20 %, Ni-80 %)	1,02-1,12	0,0001
Полупроводники (Si, Ge)	1,0-14	-(0,2-0,8)

Резистивные элементы

Условные обозначения резисторов

Наименование	Обозначение
Резистор постоянный (линейная ВАХ)	
Резистор переменный:	
общее обозначение	
с разрывом цепи	
без разрыва цепи	
Резистор нелинейный (нелинейная ВАХ)	

Индуктивный и емкостный элементы

- Эти элементы имеют принципиальное отличие от резистивных элементов в том, что в них не происходит необратимого преобразования электрической энергии в другие виды энергии.
- Когда сопоставляют элементы по своему характеру, то резистивные элементы называют активными, а индуктивный и емкостный элементы

Индуктивный и емкостный элементы

$$u_L = L \frac{di_L}{dt},$$

где L – индуктивность элемента, Гн.

$$i_C = C \frac{du_C}{dt},$$

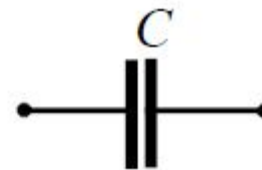
где C – емкость элемента, Ф.

Условное обозначение в схемах электрических цепей:

идеального индуктивного элемента:



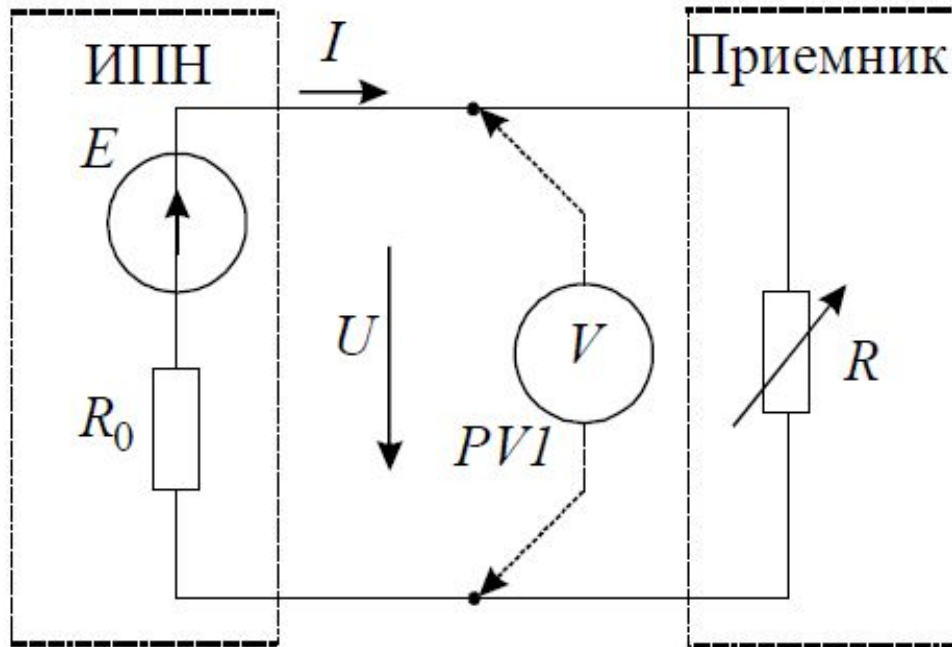
идеального емкостного элемента:



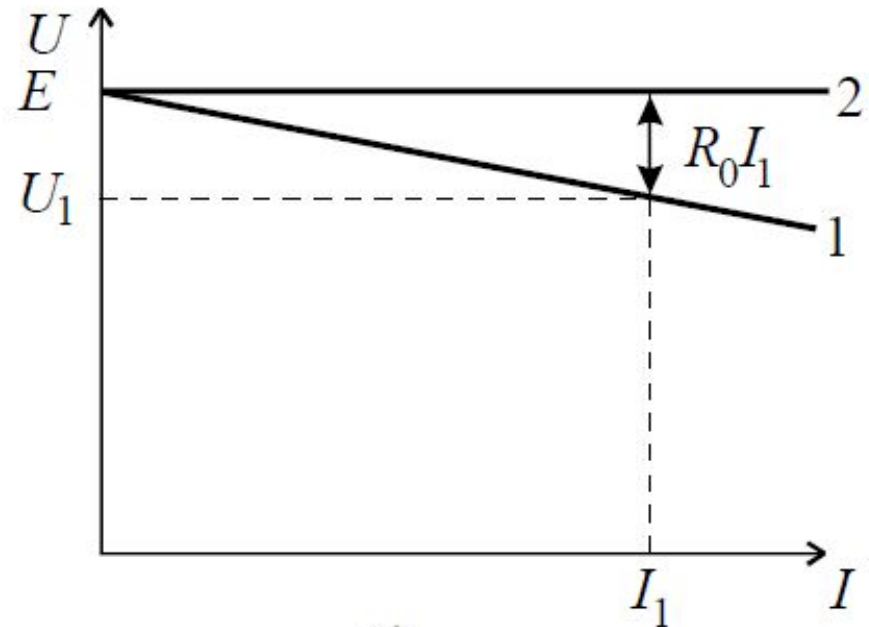
Источник постоянного напряжения

Источником постоянного напряжения (ИПН) характеризуется следующими основными параметрами: - электродвижущей силой (ЭДС) E ; - внутренним сопротивлением R_0 ; - напряжением U на зажимах (полюсах) источника.

$$E = U_V + R_0 I = IR_V + R_0 I \approx U_V. \quad (1.9)$$



а)



б)

Рисунок 1.2 – Схема простейшей электрической цепи (а) и ВАХ ИПН (б)

Электрические цепи постоянного тока

- Электротехнические устройства, установки и системы постоянного тока имеют большое практическое применение на транспорте (двигатели подъемных механизмов, трамваев, троллейбусов, электровозов, электрокар), при электрохимическом получении металлов (электролизные ванны), в космической технике, в радиоэлектронике, компьютерной

Электрические цепи постоянного тока

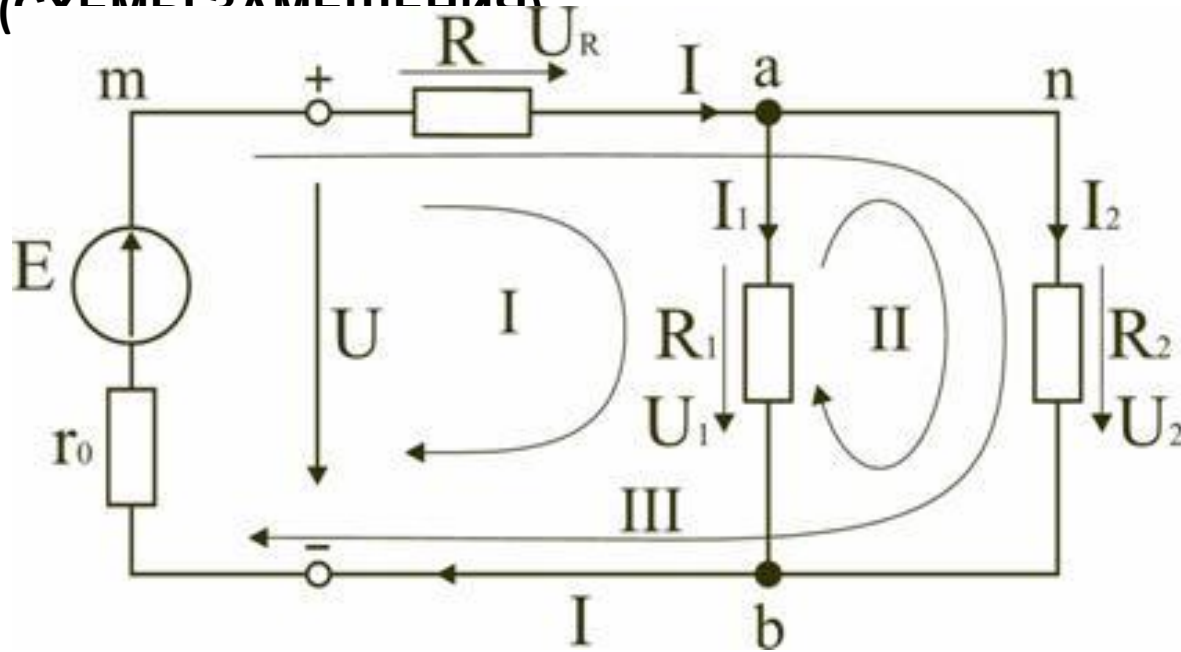
- Первые шаги электротехники были связаны с освоением энергии постоянного тока, которая вырабатывалась гальваническими элементами.
- В настоящее время основными источниками постоянного тока (ИПТ) являются выпрямительные преобразователи (выпрямители), химические аккумуляторы, электромашинные генераторы постоянного тока.
- Развиваются и совершенствуются новые виды ИПТ:
- – источники, преобразующие лучистую энергию Солнца при помощи фотоэлементов, являющихся основными источниками электрической энергии космических аппаратов;
- – магнитогидродинамические генераторы (МГД-генераторы);
- – имеются сообщения о создании в США электрохимических ИПТ для электромобилей, в которых электрическая энергия будет получаться в результате реакции кислорода атмосферного воздуха с бензиновым

Электрические цепи постоянного тока

- *Электрической цепью* называют совокупность элементов и устройств, предназначенных для прохождения тока по определенному, заранее заданному алгоритму и описываемых с помощью понятий тока и напряжения.
- Понятия электрического тока и напряжения являются одними из основных в теории электрических цепей. Напряжения и токи представляют собой скалярные величины, которые могут принимать лишь вещественные значения - положительные или отрицательные. Значение напряжения (тока) в данный момент времени называют мгновенным значением напряжения (тока). Мгновенные значения напряжений и токов принято обозначать соответственно буквами $u(t)$, $i(t)$. Чтобы подчеркнуть их зависимость от переменной t
- В цепях постоянного тока напряжения и токи постоянны во времени и обозначаются U , I

Электрические цепи постоянного тока

- для расчета и анализа реальная электрическая цепь представляется графически в виде расчетной электрической схемы (схемы замещения)

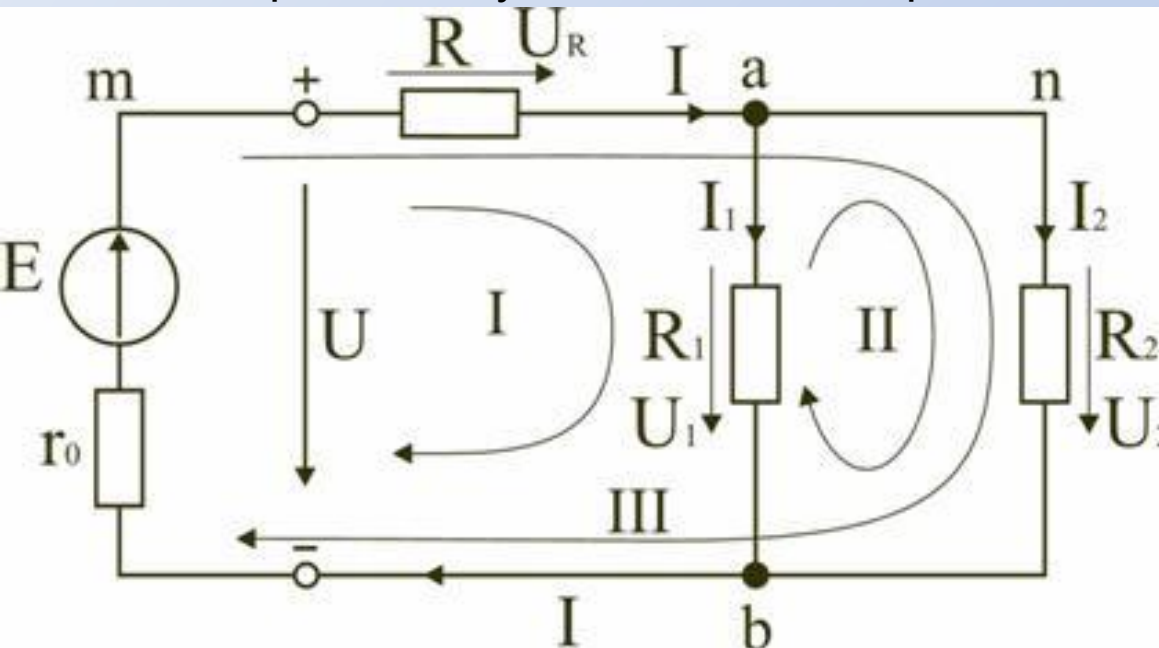


ВЕТВЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ (СХЕМЫ) – участок цепи с одним и тем же током. Ветвь может состоять из одного или нескольких последовательно соединенных элементов. Схема на рис. имеет три ветви: ветвь bma , в которую включены элементы r_0, E, R и в которой возникает ток I ; ветвь ab с элементом R_1 и током I_1 ; ветвь anb с элементом R_2 и током I_2 .

Электрические цепи постоянного тока

УЗЕЛ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ (СХЕМЫ) – МЕСТО СОЕДИНЕНИЯ ТРЕХ И БОЛЕЕ ВЕТВЕЙ.

В схеме на рис. – два узла а и b. Ветви, присоединенные к одной паре узлов,



находящаяся в параллельных ветвях, находятся в параллельных ветвях. В схеме можно выделить три контура: I – bma**б**; II – anba; III – manbm, на схеме стрелкой показывают направление обхода контура.

УСЛОВНЫЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЭДС ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ, ТОКОВ ВО ВСЕХ ВЕТВЯХ, НАПРЯЖЕНИЙ МЕЖДУ УЗЛАМИ И НА ЗАЖИМАХ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПИ НЕОБХОДИМО ЗАДАТЬ ДЛЯ ПРАВИЛЬНОЙ ЗАПИСИ УРАВНЕНИЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ИЛИ ЕЕ ЭЛЕМЕНТАХ. НА СХЕМЕ СТРЕЛКАМИ УКАЖЕМ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЭДС

Лекция №2

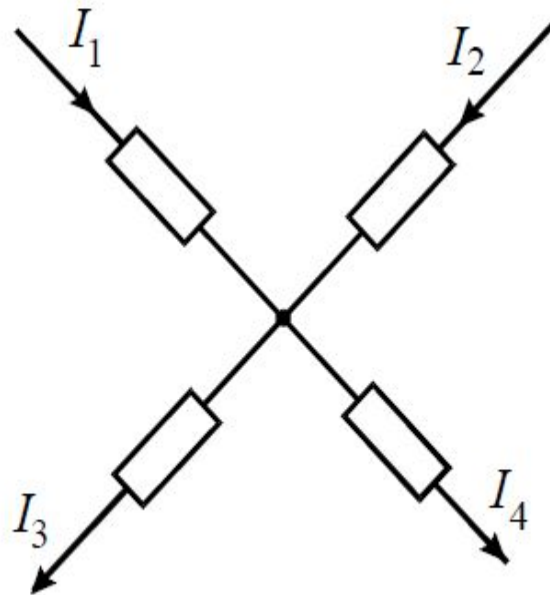
План лекции

- ПЕРВЫЙ ЗАКОН КИРХГОФА
- ВТОРОЙ ЗАКОН КИРХГОФА
- РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ВДОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ
- ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЯ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
- ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

ПЕРВЫЙ ЗАКОН КИРХГОФА

$$\sum I = 0. \quad (2.1)$$

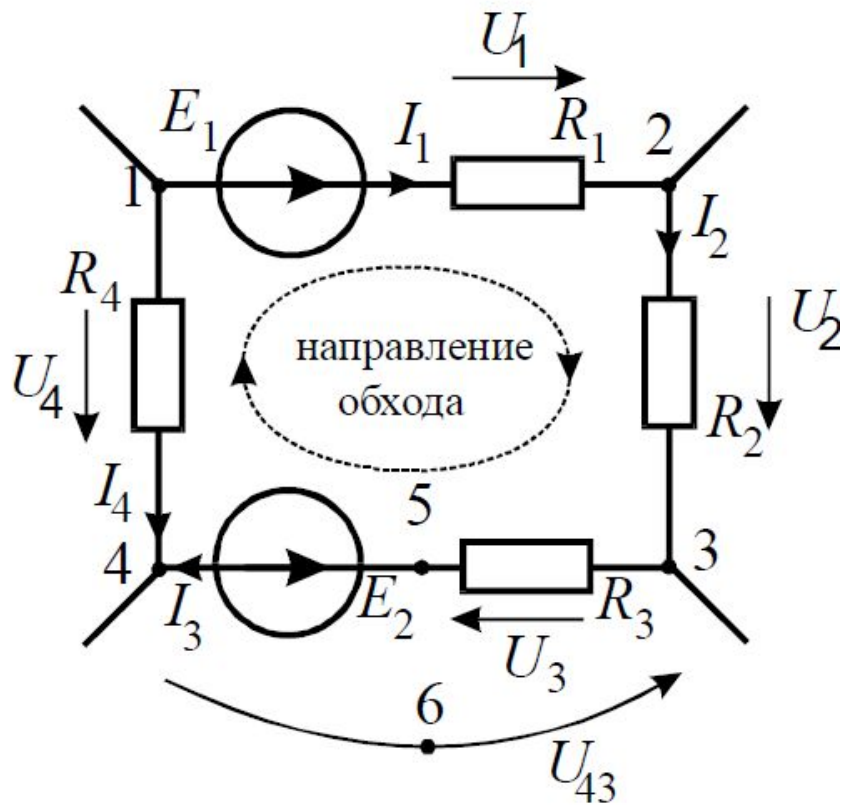
Всем токам, направленным *от узла*, в уравнении (2.1) приписывается одинаковый знак, например, *положительный*, тогда все токи, направленные *к узлу*, войдут в уравнение с *отрицательным* знаком.



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

ВТОРОЙ ЗАКОН КИРХГОФА

Алгебраическая сумма ЭДС в любом контуре цепи равна алгебраической сумме напряжений на элементах этого контура:



$$E_1 - E_2 = U_1 + U_2 + U_3 - U_4$$

Потенциальная диаграмма последовательной электрической цепи

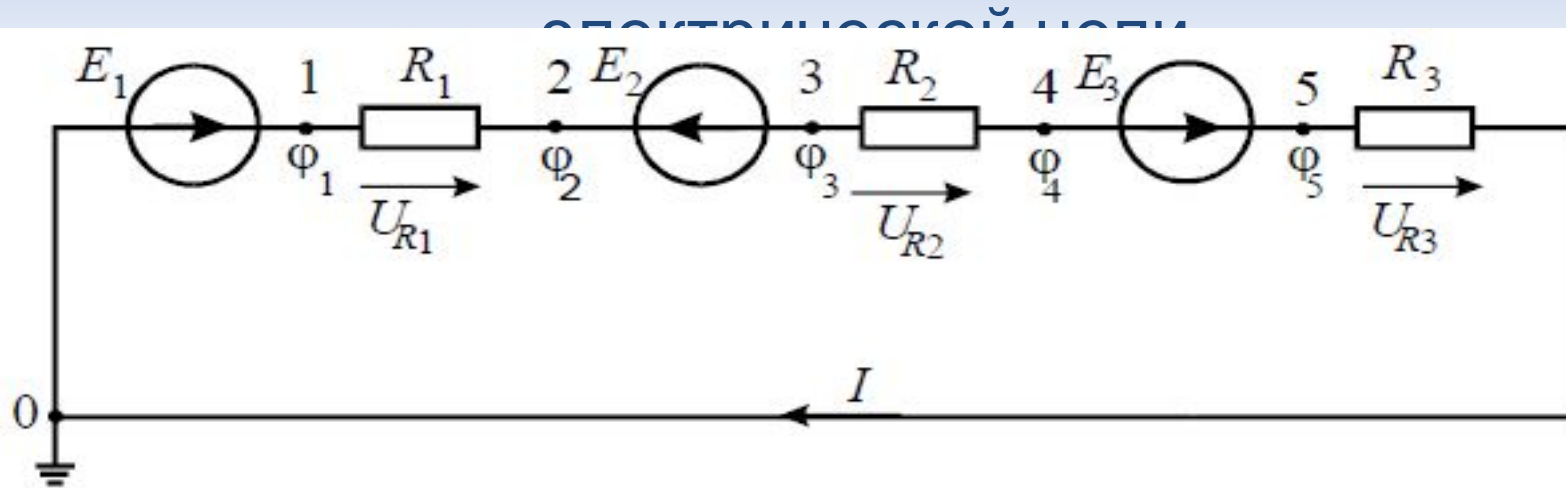
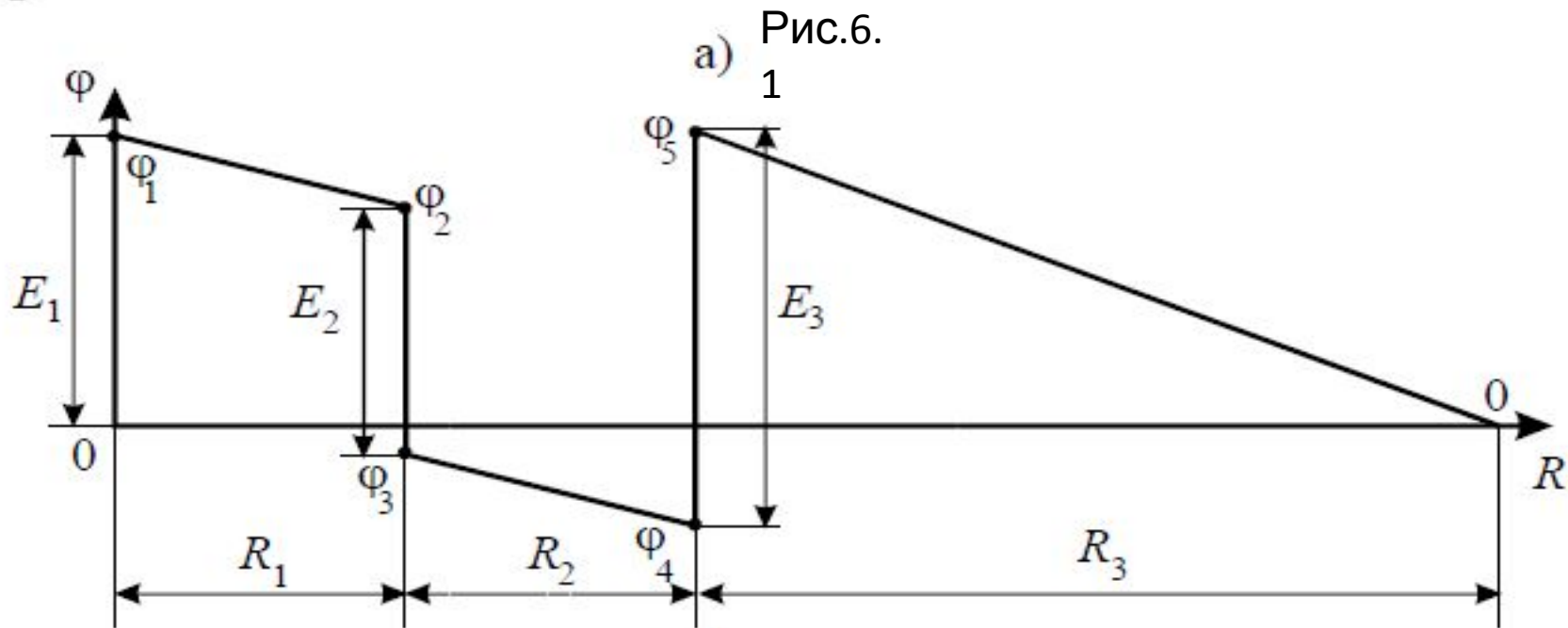


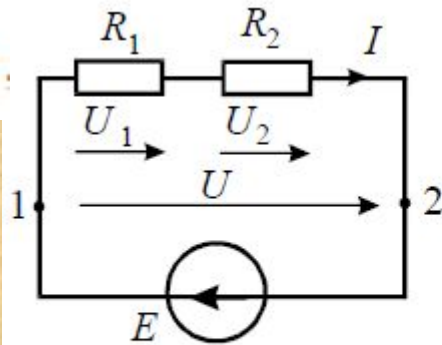
Рис.6.



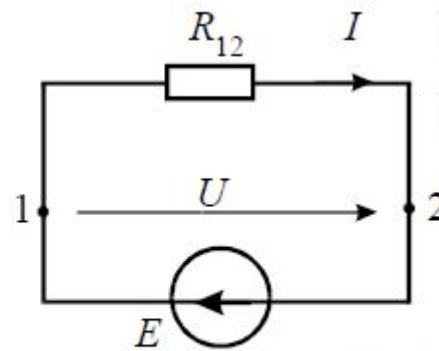
б) Рис.6.

Последовательное и параллельное соединения резистивных элементов

$$U = U_1 + U_2 \quad (7.1)$$



а) Рис. 7.1



б)

$$U = IR_1 + IR_2;$$

$$U = I(R_1 + R_2) = IR_{12}, \quad (7.2)$$

$$R_{1,2,\dots,n} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Рис. 7.2

$$(7.3)$$

$$I = I_1 + I_2 \quad (7.4)$$

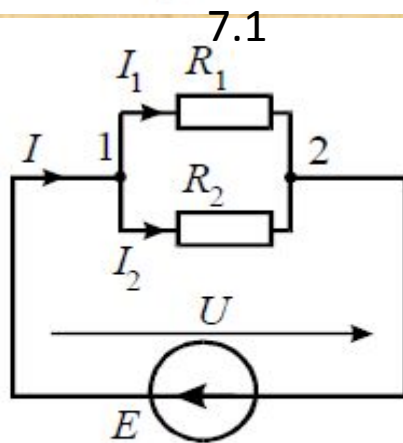


Рис. 7.3
а) 7.3

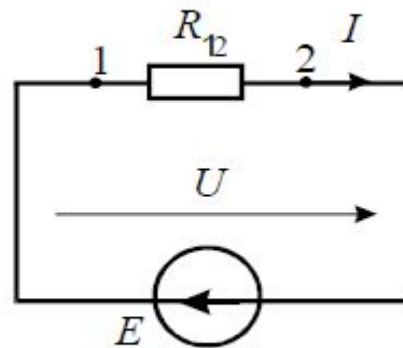


Рис. 7.4
б) 7.4

$$\frac{U}{R_{12}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

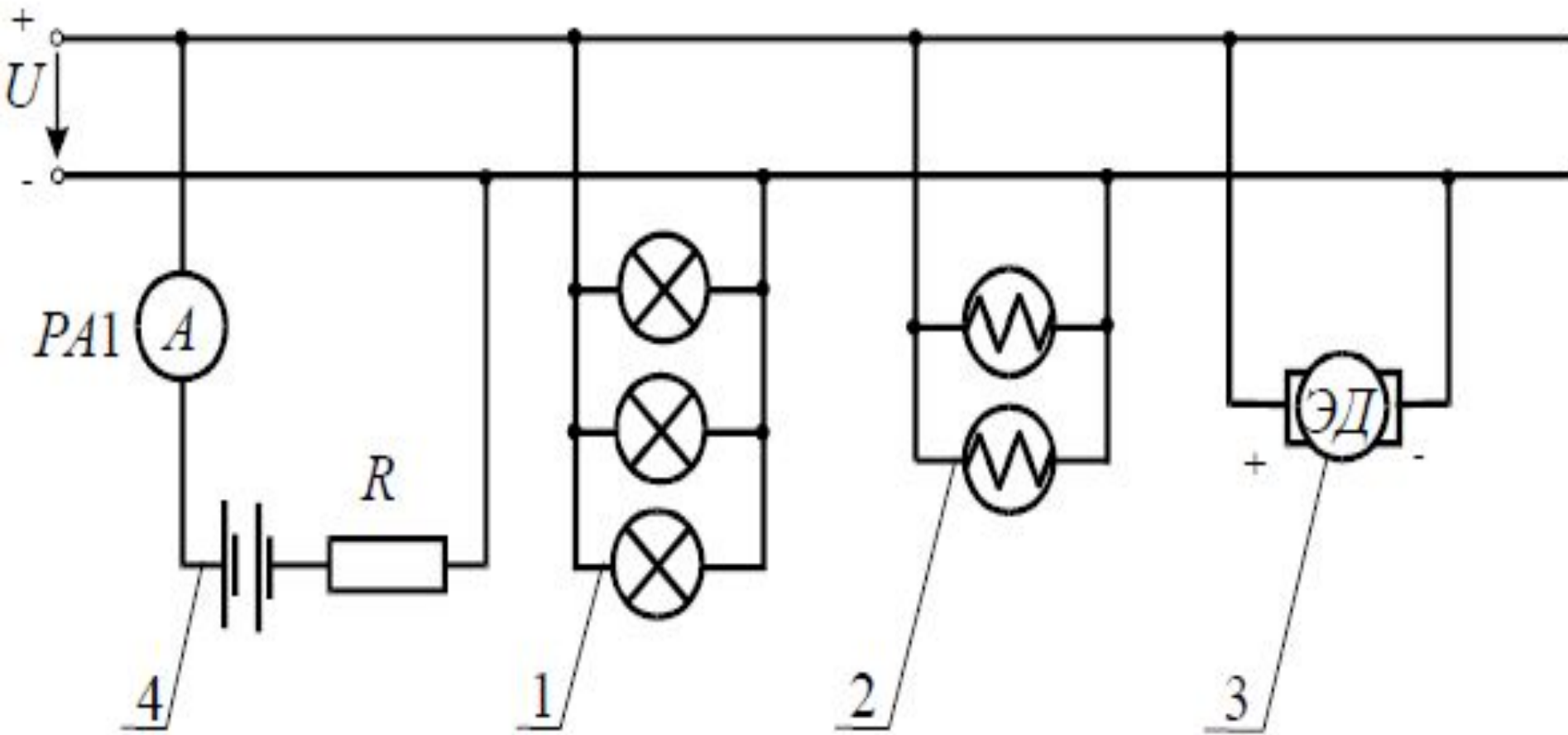
$$\frac{1}{R_{1,2,\dots,n}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

$$(7.5)$$

$$(7.6)$$

$$G_{1,2,\dots,n} = G_1 + G_2 + \dots + G_n$$

Схема ЭЦ с параллельно включенными приемниками электрической энергии



- 1 – лампы накаливания,
- 2 – нагревательные приборы,
- 3 – электродвигатель,
- 4 – аккумулятор

Рис.
8.1

Лекция №3

План лекции

- **СОЕДИНЕНИЕ РЕЗИСТОРОВ ТРЕУГОЛЬНИКОМ И ЗВЕЗДОЙ**
- **ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ И МОЩНОСТЬ, УРАВНЕНИЕ БАЛАНСА МОЩНОСТИ**
- **РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ**
- **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Соединение резисторов треугольником и звездой

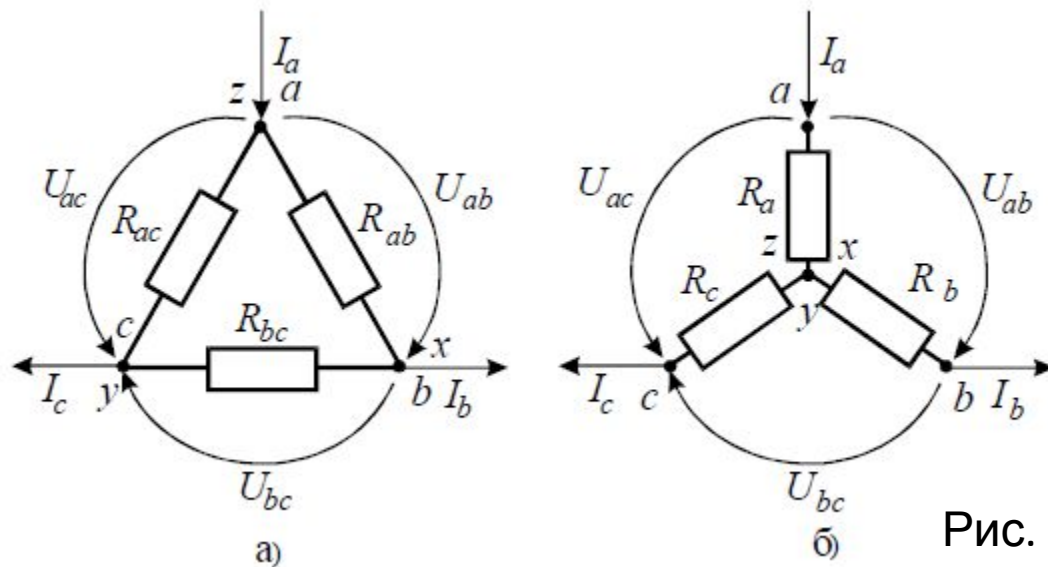


Рис. 9.1

Для упрощения анализа и расчета некоторых электрических цепей, содержащих соединения резисторов треугольником, целесообразно заменить эти резисторы эквивалентными резисторами R_a, R_b, R_c соединенными звездой

$$R_a = \frac{R_{ae} \cdot R_{ac}}{\sum R}; R_e = \frac{R_{ae} \cdot R_{ec}}{\sum R}; R_c = \frac{R_{ac} \cdot R_{ec}}{\sum R} \quad (9.1.)$$

$$\sum R = R_{ae} + R_{ec} + R_{ac} \quad (9.2.)$$

$$R_{ae} = R_a + R_e + \frac{R_a \cdot R_e}{R_c};$$

$$R_{ec} = R_e + R_c + \frac{R_e \cdot R_c}{R_a}; \quad (9.3.)$$

$$R_{ac} = R_a + R_c + \frac{R_a \cdot R_c}{R_e}.$$

Электрическая энергия и

МОЩНОСТЬ

Основными единицами электрической энергии (ЭЭ) и мощности являются 1 джоуль (1 Дж=1 ВАс) и 1 ватт (1 Вт=1 Дж/с=1 ВА). Для мощности и энергии промышленных установок часто используются более крупные единицы: 1 киловатт (1 кВт=10³ Вт), 1 мегаватт (1 МВт=10⁶ Вт), 1 киловатт-час (1

$$W = I^2 R t$$

(10.1)

$$W = \left(\frac{U^2}{R} \right) \cdot t$$

$$W = UI t .$$

$$P_u = E \cdot I \quad (10.2)$$

$$P_u = -E \cdot I$$

$$P_{np} = I^2 R = \frac{I^2}{G};$$

(10.3)

$$P_{np} = \frac{U^2}{R} = U^2 G;$$

$$P_{np} = UI .$$

$$(10.4) \quad P_u = P_n,$$

$$\sum E_i I_i = \sum I_i^2 R_i ,$$

Режимы работы элементов электрической цепи

- Номинальный режим работы какого-либо элемента электрической цепи (источника, приемника) считается такой режим, в котором данный элемент работает при номинальных величинах.
- Согласованным называется режим, при котором мощность, отдаваемая источником или потребляемая приемником, имеет максимальное значение. Максимальные значения мощностей получаются при определенном соотношении (согласовании) параметров ЭЦ.
- Под режимом холостого хода (ХХ) понимается такой режим, при котором через источник или приемник не протекает ток. При этом источник не отдает энергию во внешнюю цепь, а приемник не потребляет ее.
- Режимом короткого замыкания (КЗ) называется режим, возникающий при соединении между собой без какого-либо сопротивления (накоротко) зажимов источника или иных

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

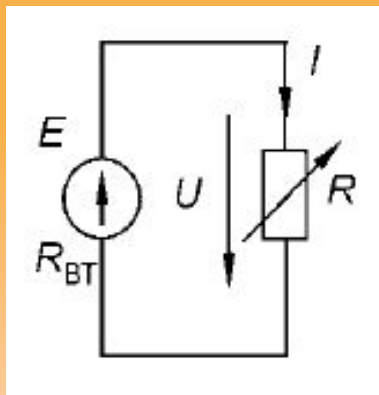


Рис.12.

1

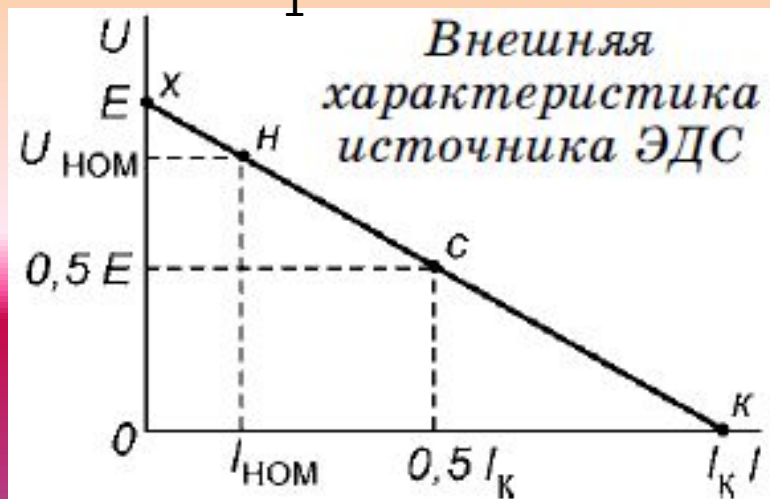


Рис.12.

2

$$E = RI + R_{\text{BT}}I \quad (12.1)$$

$$P_1 = P_2 + P_{\text{II}} \quad (12.2)$$

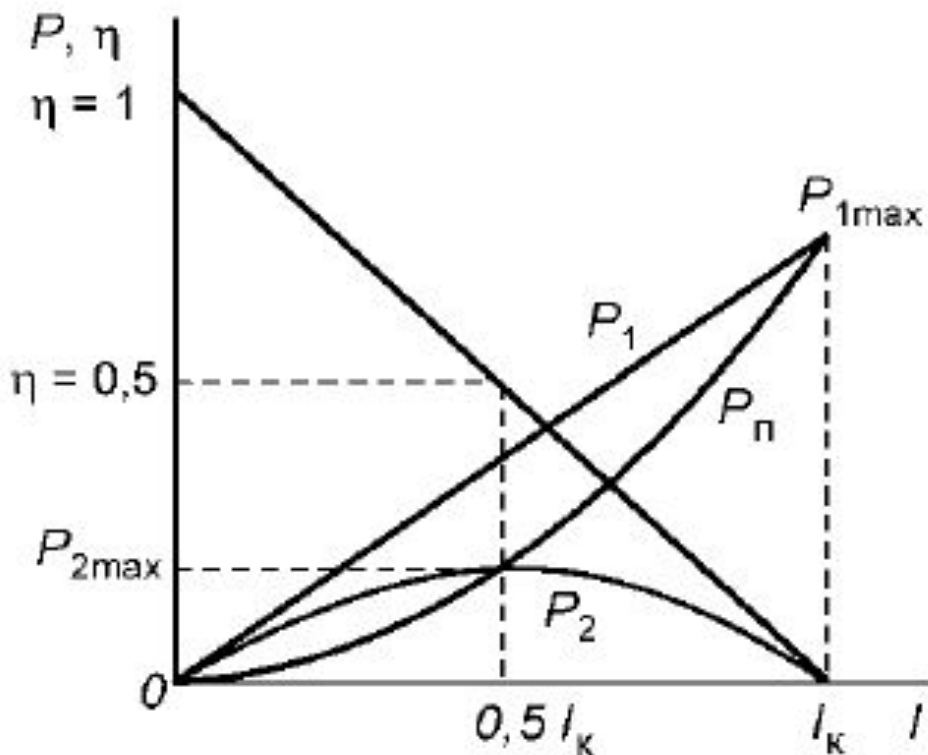
$$U = E - R_{\text{BT}}I \quad (12.3)$$

$$I = \frac{E}{R + R_{\text{BT}}} \quad (12.4)$$

$$P_2 = UI = RI^2 = \frac{E^2 R}{(R + R_{\text{BT}})^2} \quad (12.5)$$

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В ЦЕПЯХ

ТОКА



Энергетические зависимости
в цепях постоянного тока

$$P_2 = P_1 - P_{II} = EI - R_{BT}I^2 \quad (13.1)$$

$$\frac{dP_2}{dI} = E - 2R_{BT}I = 0 \quad (13.2)$$

$$R = R_{BT} \quad (13.3)$$

$$I = \frac{E}{2R_{BT}} = I_c = 0,5I_k \quad (13.4)$$

$$P_{2max} = P_{2c} = \frac{E^2 R_{BT}}{(2R_{BT})^2} = \frac{E^2}{4R_{BT}} \quad (13.5)$$

$$P_{1c} = EI_c = \frac{E^2}{2R_{BT}} \quad (13.6)$$

$$\eta_c = P_{2c}/P_{1c} = 0,5 \quad (13.7)$$

Рис.13.

1

Лекция №4

- **МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**
- **МЕТОД УЗЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ**
- **МЕТОД КОНТУРНЫХ ТОКОВ**
- **МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА**

Метод эквивалентных

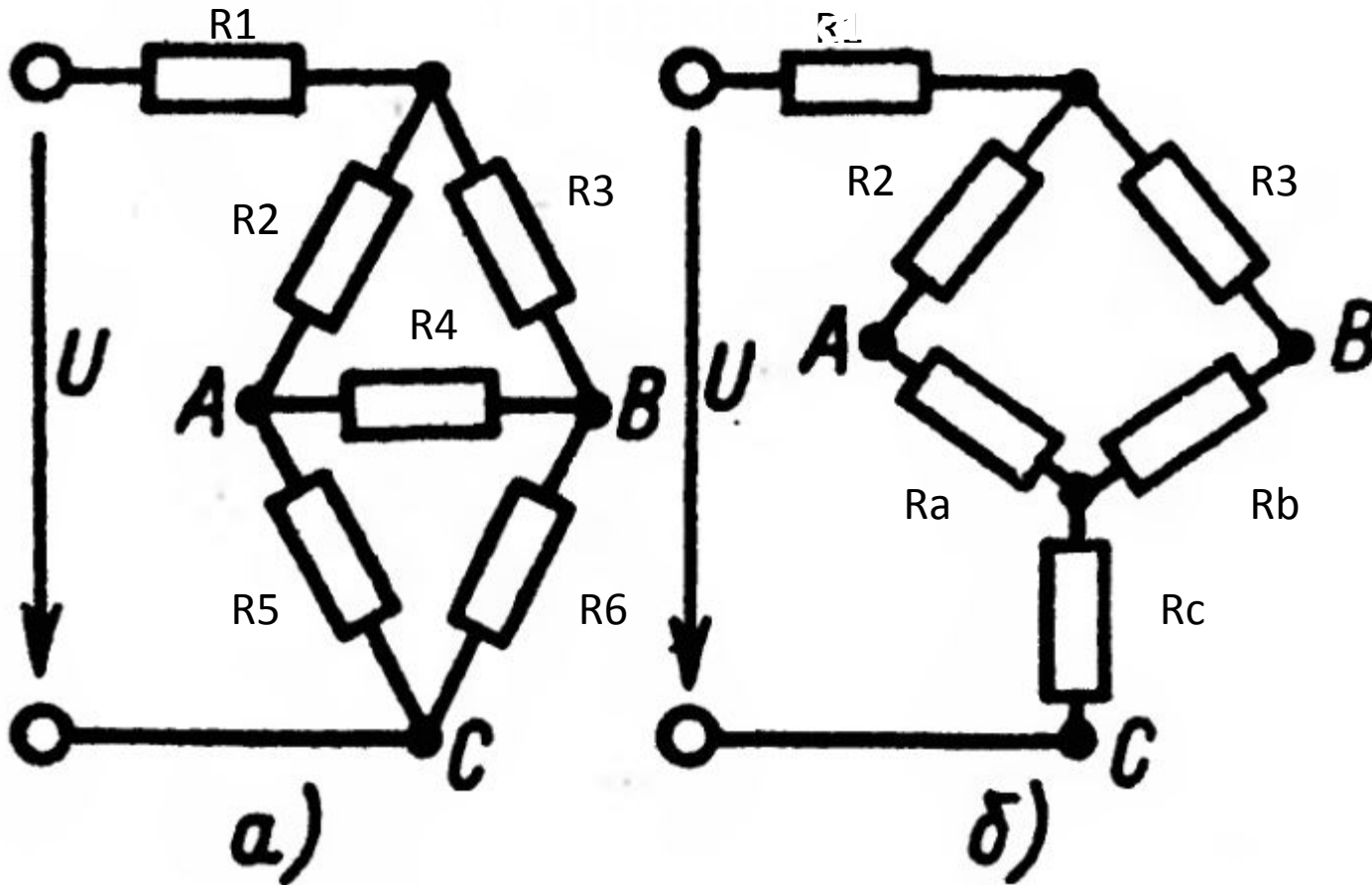


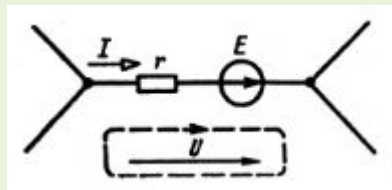
рис. 15а) Исходная электрическая цепь

рис.15 б) Эквивалентная цепь после преобразования треугольника R_4, R_5, R_6 в звезду R_a, R_b, R_c

Метод узловых потенциалов

Метод узловых потенциалов позволяет уменьшить число совместно решаемых уравнений до $U - 1$, где U - число узлов схемы замещения цепи. Метод основан на применении первого закона Кирхгофа и заключается в следующем:

- 1) один узел схемы цепи принимаем базисным с нулевым потенциалом. Такое допущение не изменяет значения токов в ветвях, так как ток в каждой ветви зависит только от разностей потенциалов узлов, а не от действительных значений потенциалов;
- 2) для остальных $U - 1$ узлов составляем уравнения по первому закону Кирхгофа, выражая токи ветвей через потенциалы узлов;
- 3) решением составленной системы уравнений определяем потенциалы $U - 1$ узлов относительно базисного, а затем токи ветвей по обобщенному закону Ома



$$I = (U + E) / r \quad (16.1)$$

Рис.
16.1

Метод узловых потенциалов (пример применения)

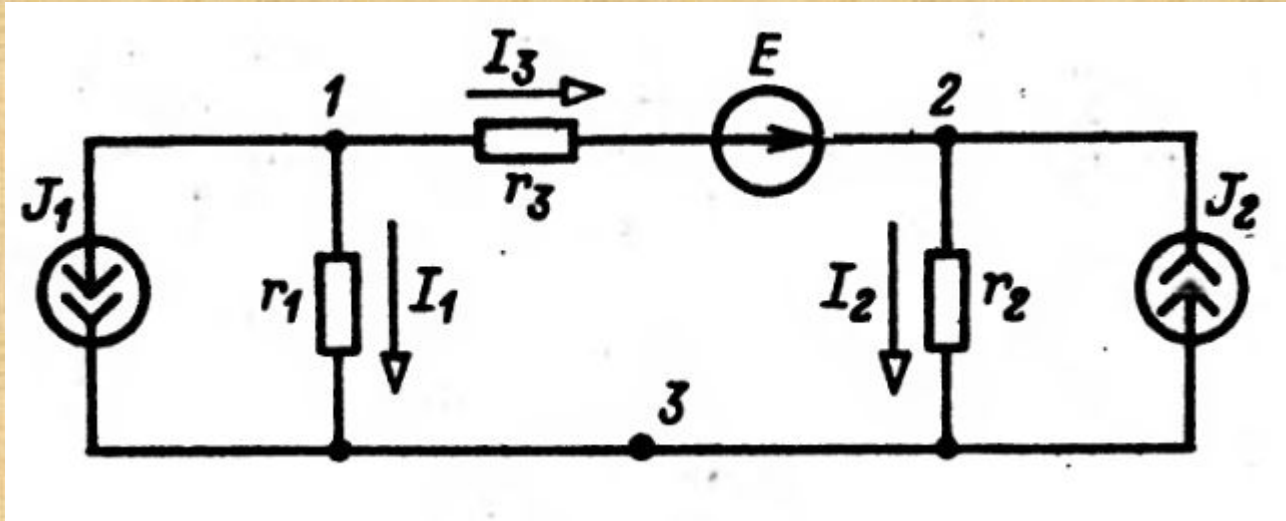


Рис.

17.1

Система уравнений по первому и второму

Закону Кирхгофа

$$I_3 + J_2 - I_2 = 0$$

$$-I_1 \cdot r_1 + I_3 \cdot r_3 + I_2 \cdot r_2 = E$$

(17.1)

Система уравнений по методу узловых потенциалов

$$\begin{cases} \phi_1 \cdot (1/(r_1+r_3)) - \phi_2 \cdot (1/r_3) = -J_1 - E \cdot (1/r_3) \\ -\phi_1 \cdot (1/r_3) + \phi_2 \cdot (1/(r_2+r_3)) = J_2 + E \cdot (1/r_3) \end{cases}$$

$$\phi_3 = 0$$

(17.2)

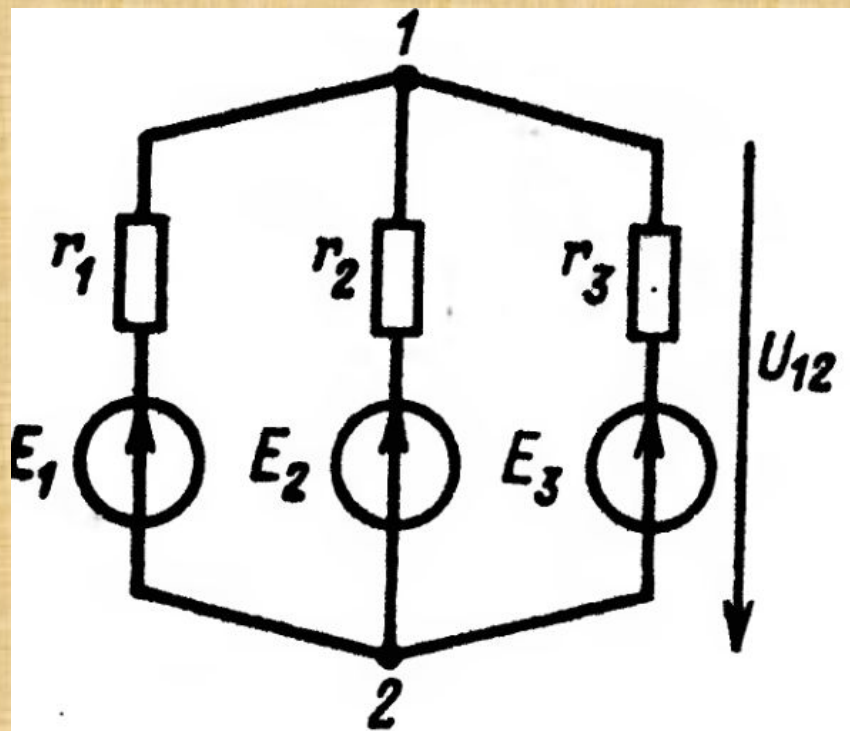
Рис.

17.2

$$\begin{vmatrix} \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} & -\frac{1}{r_3} \\ -\frac{1}{r_3} & \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} -J_1 - \frac{E}{r_3} \\ J_2 + \frac{E}{r_3} \end{vmatrix}$$

Метод узловых потенциалов

(метод двух узлов)



$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\sum E/r}{\sum 1/r} \quad (18.1)$$

$$U_{12} = \frac{E_1/r_1 + E_2/r_2 + E_3/r_3}{1/r_1 + 1/r_2 + 1/r_3}$$

Рис.
18.1.

(18.2)

Метод контурных токов

Метод контурных токов позволяет уменьшить число совместно решаемых уравнений до $K = B - B_j - Y + 1$ и основан на применении второго закона Кирхгофа. (где B - общее число ветвей, B_j - число ветвей с источниками тока, Y - общее число узлов, K число независимых контуров)

Рассмотрим сущность метода сначала для расчета схемы цепи без источников тока, т. е. при $B_j = 0$:

1) выбираем $K = B - Y + 1$ независимых контуров и положительных направлений так называемых контурных токов, каждый из которых протекает по всем элементам соответствующего контура.

Для планарных схем, т. е. допускающих изображение на плоскости без пересечения ветвей, достаточным условием выделения K независимых контуров является наличие в каждом из них хотя бы одной ветви, принадлежащей только этому контуру;

2) для K независимых контуров составляем уравнения по второму закону Кирхгофа, совместное решение которых определяет все контурные токи;

3) ток каждой ветви определяем по первому закону Кирхгофа как алгебраическую сумму контурных токов в соответствующей ветви.

Метод контурных токов (примеры)

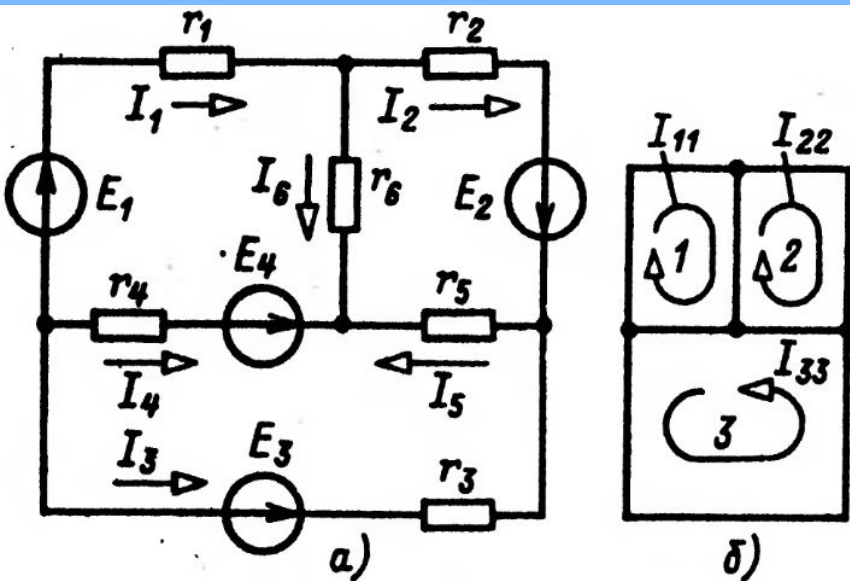


Рис.
20.1

контур 1

$$(r_1 + r_4 + r_6)I_{11} - r_6I_{22} + r_4I_{33} = E_1 - E_4;$$

контур 2

$$-r_6I_{11} + (r_2 + r_5 + r_6)I_{22} + r_5I_{33} = E_2;$$

контур 3

$$r_4I_{11} + r_5I_{22} + (r_3 + r_4 + r_5)I_{33} = E_3 - E_4,$$

(20.1)

$$\begin{vmatrix} r_1 + r_4 + r_6 & -r_6 & r_4 \\ -r_6 & r_2 + r_5 + r_6 & r_5 \\ r_4 & r_5 & r_3 + r_4 + r_5 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} E_1 - E_4 \\ E_2 \\ E_3 - E_4 \end{vmatrix}$$

(20.2)

Метод контурных токов (примеры)

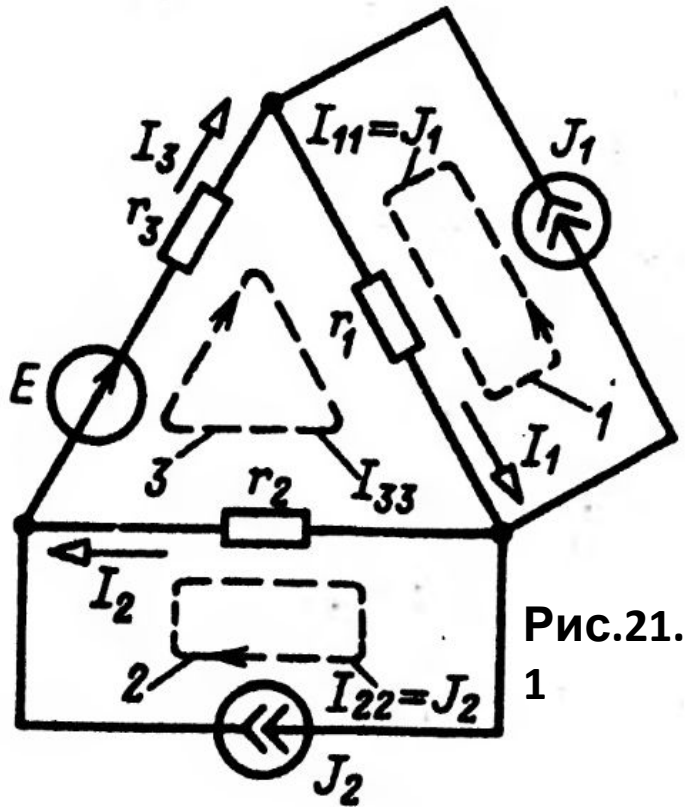


Рис.21.
1

При расчете схемы замещения с источниками тока возможны упрощения. Контурный ток, выбранный так, что других контурных токов в ветви с источником тока нет, известен. Поэтому в схеме с V ветвями, V_j из которых содержат источники тока, число независимых контуров без источников тока и соответствующих им неизвестных контурных токов равно $K = V - V_j - U + 1$. В цепи на схеме число ветвей $V = 5$, ветвей с источниками тока $V_j = 2$, узлов $U = 3$, независимых контуров без источников тока $K = V - V_j - U + 1 = 5 - 2 - 3 + 1 = 1$ (контур 3). Уравнение по второму закону Кирхгофа для контура 3 при выбранных

$$r_1 I_{11} - r_2 I_{22} + (r_1 + r_2 + r_3) I_{33} = E \quad (21.1)$$

$$I_{33} = \frac{E - r_1 I_{11} + r_2 I_{22}}{r_1 + r_2 + r_3} \quad (21.2)$$

где $I_{11} = J_1$, $I_{22} = J_2$ – известные токи контуров 1 и 2. (21.3)

Метод эквивалентного генератора (активного двухполюсника)

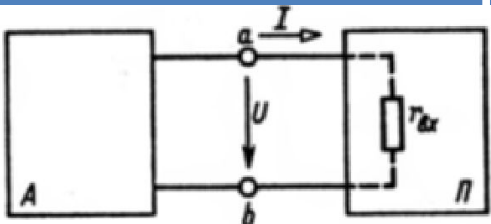
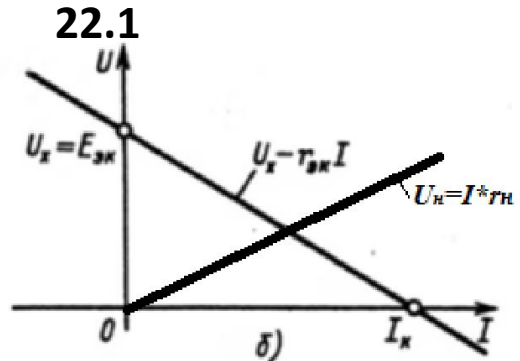
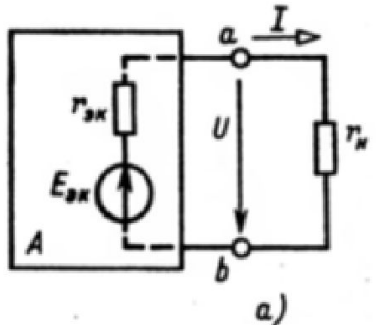


Рис. 22.1

Двухполюсником называется цепь, которая соединяется с внешней относительно нее частью цепи через два вывода - полюса. Различают активные и пассивные двухполюсники.



$$U = U_x - r_{\text{ЭК}} I \quad (22.1)$$

$$r_{\text{ЭК}} = r_{\text{ВЫХ}} = U_x / I_k$$

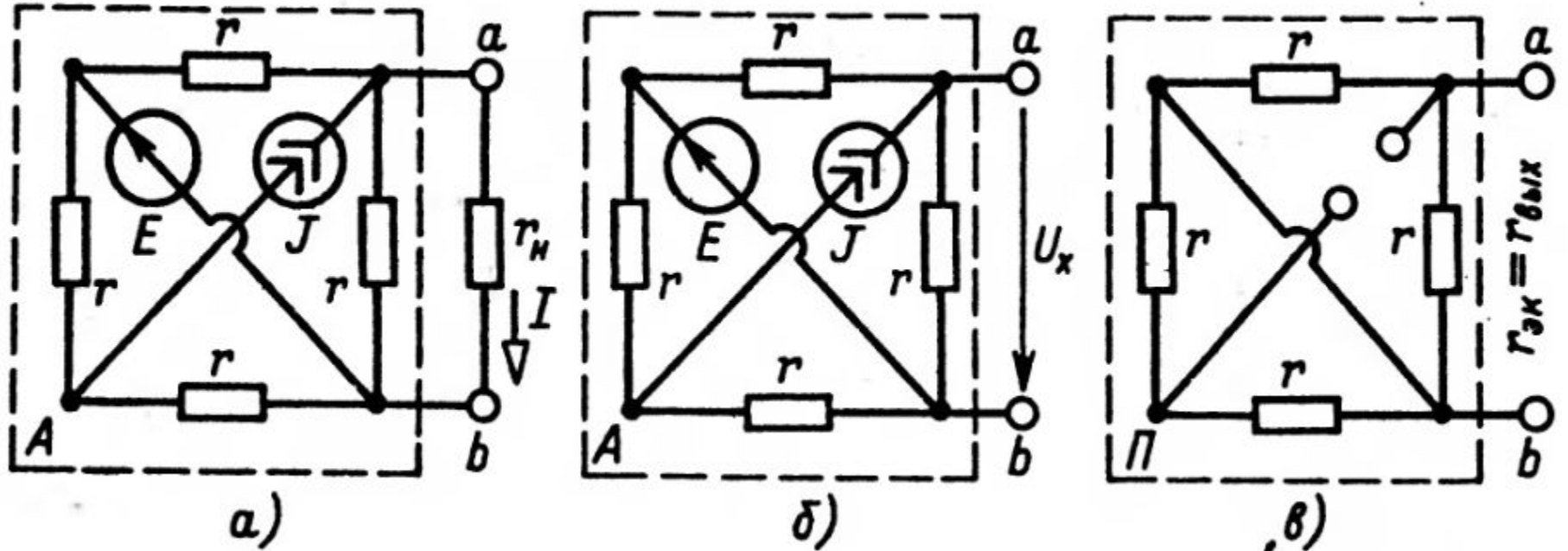
(22.2)

Рис. 22.2

$$I = \frac{E_{\text{ЭК}}}{r_{\text{Н}} + r_{\text{ЭК}}} = \frac{U_x}{r_{\text{Н}} + r_{\text{ВЫХ}}}$$

(22.3)

Метод эквивалентного генератора (активного двухполюсника)



$$U_x = rJ/2 + E/2 \quad (23.1)$$

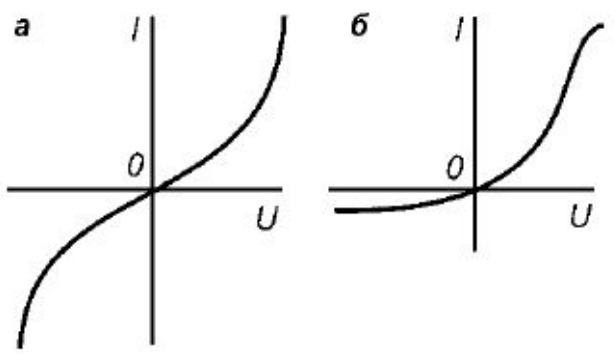
$$r_{\text{ВЫХ}} = r/2 \quad (23.2)$$

$$I = \frac{rJ/2 + E/2}{r_n + r/2} \quad (23.3)$$

Рис. 23.1 Эквивалентные преобразования сложной цепи

Лекция 5

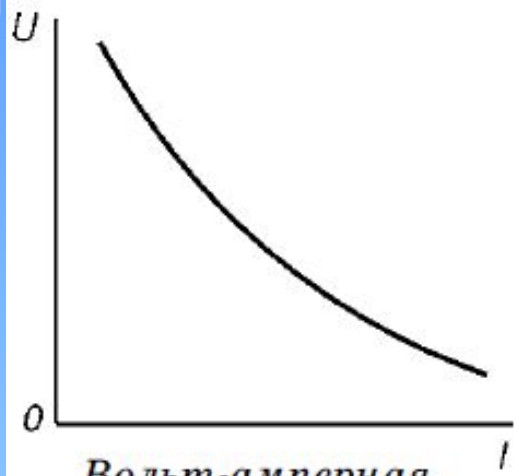
- **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ
ПОСТОЯННОГО ТОКА**
- **МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ЦЕПЕЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ**
- **ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ, ОСНОВНЫЕ
ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ**



Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов

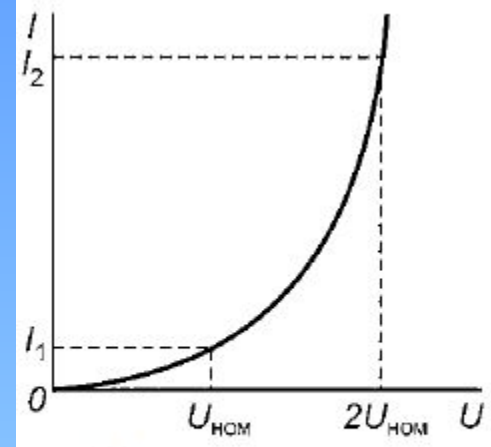
a — симметричная; *b* — несимметричная.

Рис.24.



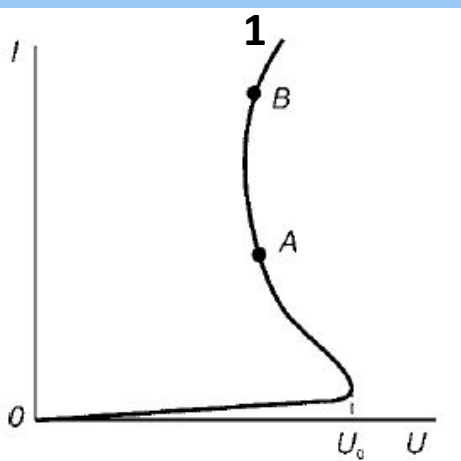
Вольт-амперная характеристика электрической дуги

Рис.24.



Вольт-амперная характеристика тиристового элемента

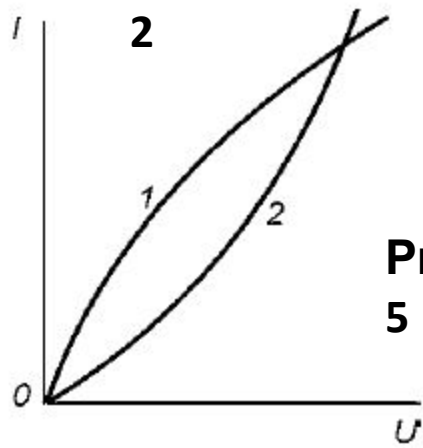
Рис.24.



Вольт-амперная характеристика лампы с тлеющим разрядом

Рис.24.

4

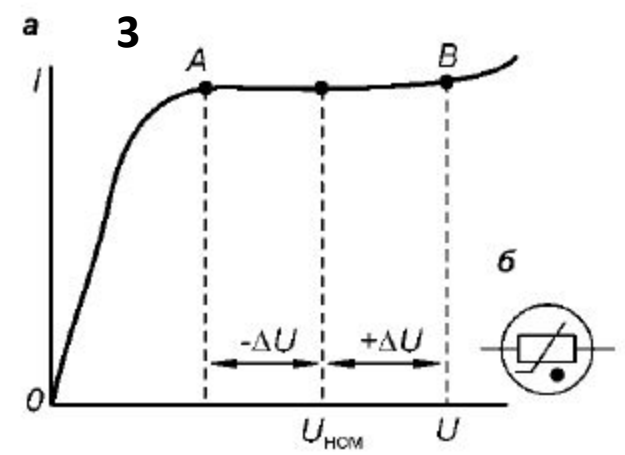


Вольт-амперные характеристики ламп накаливания

1 — с вольфрамовой нитью; *2* — с угольной нитью.

Рис.24.

5



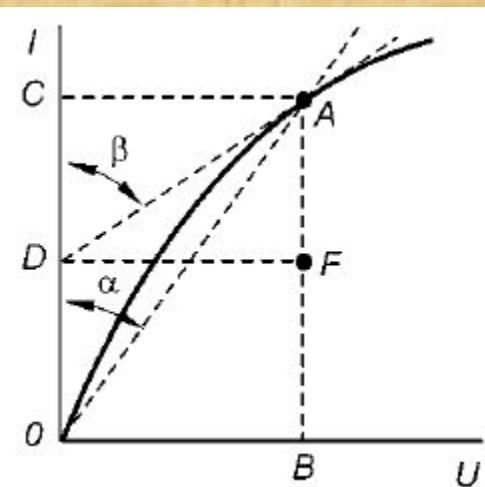
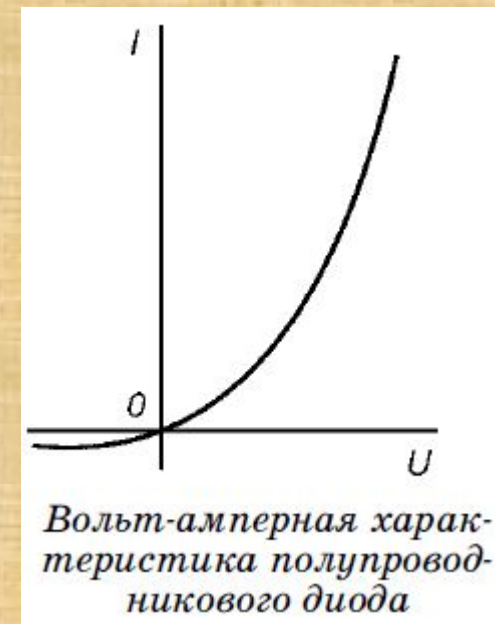
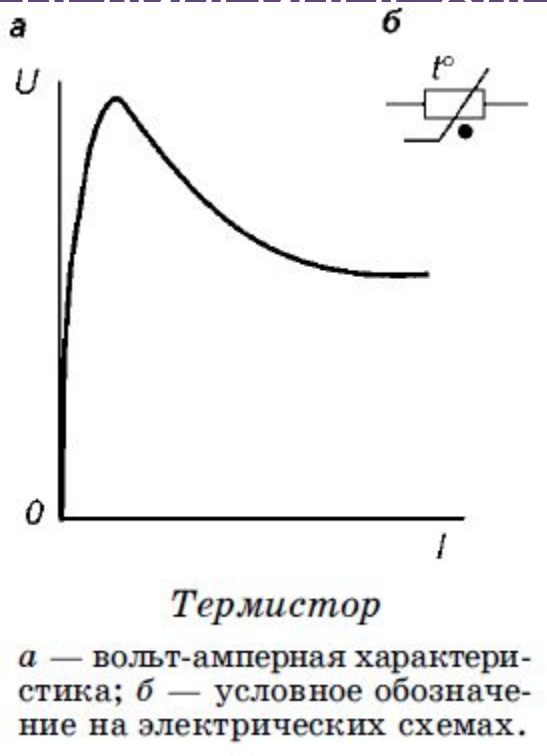
Барреттер

Рис.24.

6

a — вольт-амперная характеристика; *б* — условное обозначение на электрических схемах.

ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ



$$R_{ст} = \frac{U}{I} = \frac{m_U |OB|}{m_I |BA|} = m_R \operatorname{tg} \alpha, \quad (25.1)$$

где m_U , m_I , m_R — масштабные коэффициенты для напряжения, тока и сопротивления соответственно.

$$R_{диф} = \frac{dU}{dI} = \frac{m_u |DF|}{m_i |FA|} = m_R \operatorname{tg} \beta.$$

$$(25.2)$$

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Графический метод расчета (последовательное соединение

элементов)
Все методы основаны на использовании законов Кирхгофа, которые справедливы для расчета электрических цепей и с нелинейными элементами.

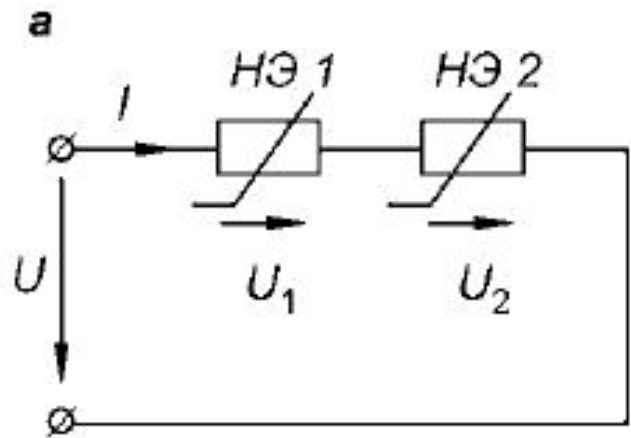


Рис.26.

1
Последовательное соединение
нелинейных элементов

a — схема; b — вольтамперные характеристики элементов и цепи.

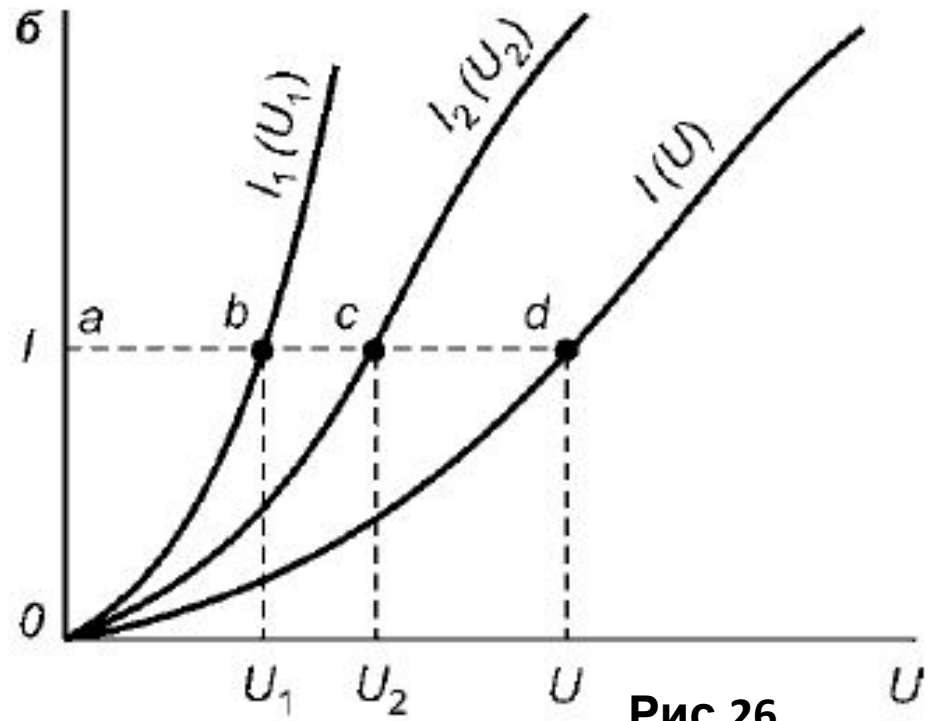


Рис.26.

2

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Графический метод расчета (параллельное соединение элементов)
Все методы основаны на использовании законов Кирхгофа, которые справедливы для расчета электрических цепей и с нелинейными элементами.

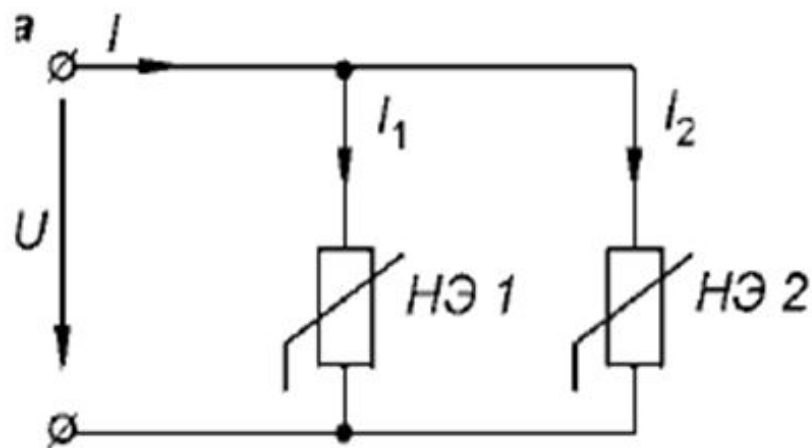


Рис.27.

1
Параллельное соединение
нелинейных элементов

a — схема; b — вольт-амперные характеристики элементов и цепи.

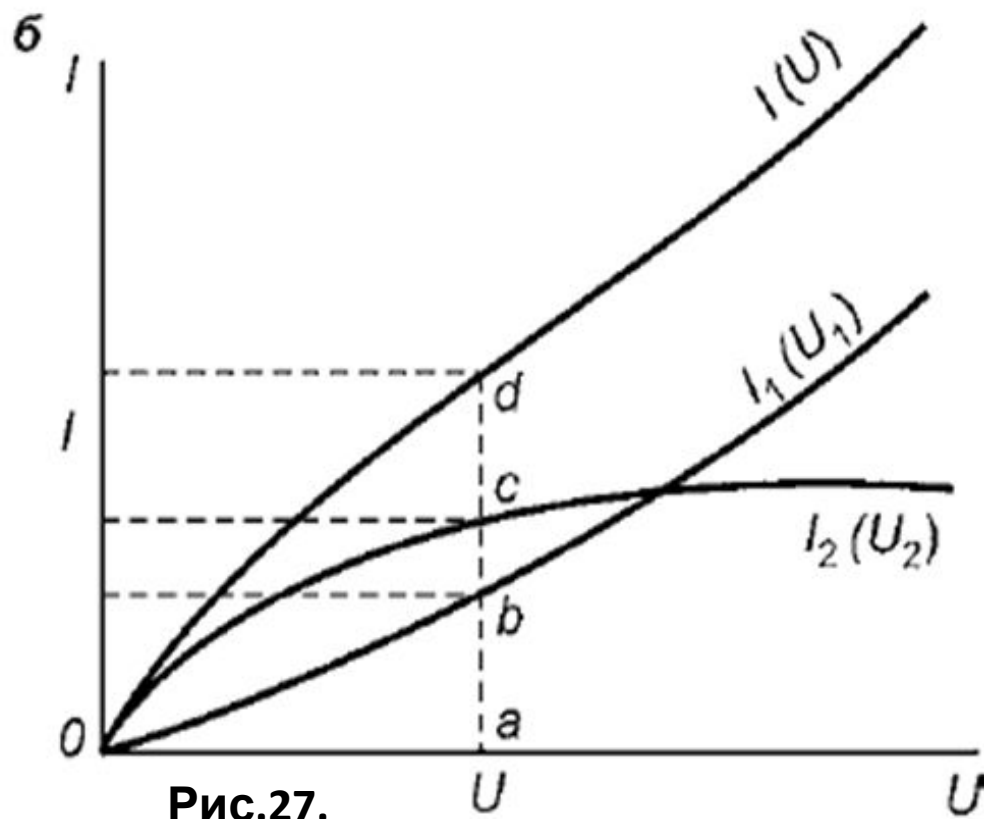
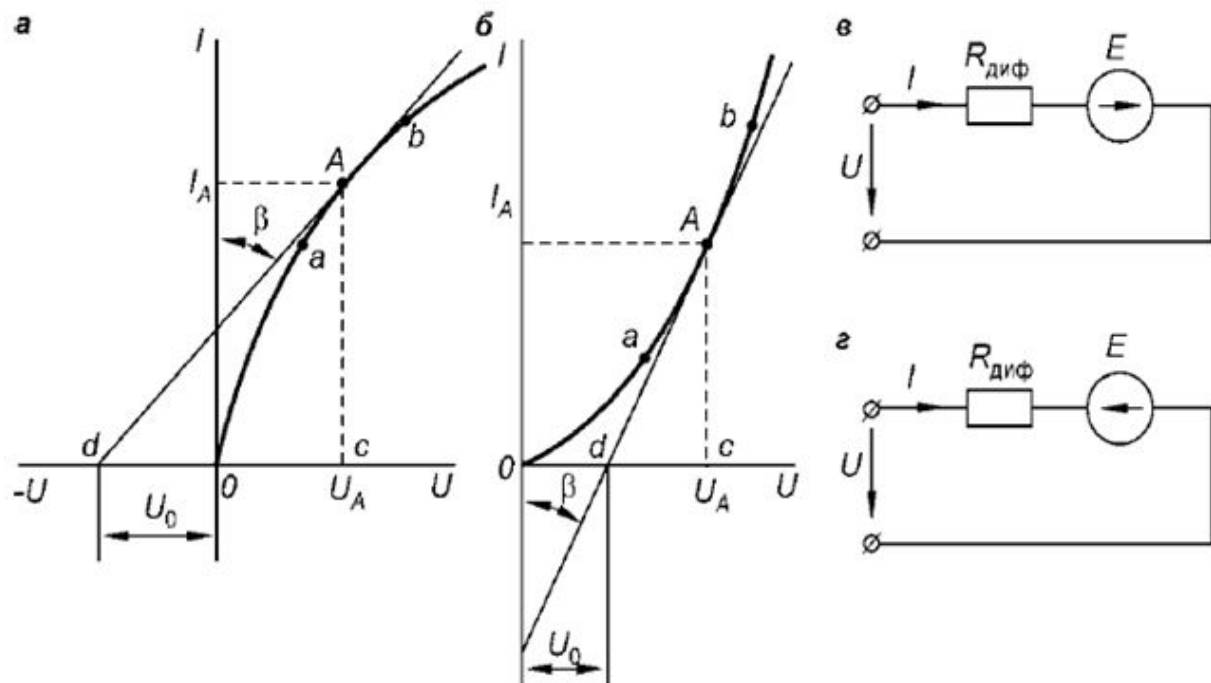


Рис.27.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ



ста

$$U = E + R_{\text{диф}} I \quad (28.3)$$

$$U = -E + R_{\text{диф}} I \quad (28.4)$$

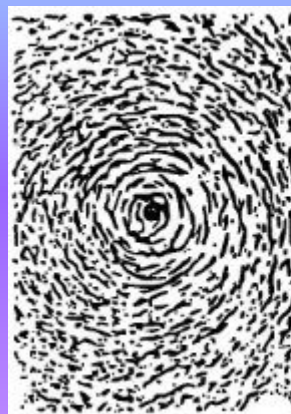
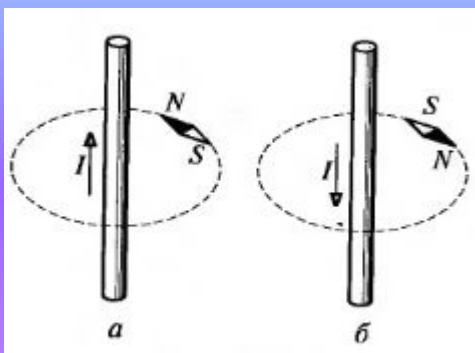
Примеры использования вольт-амперных характеристик для аналитического расчета нелинейной цепи и построения схем замещения нелинейного элемента

a, в — с выпуклой характеристикой; б, г — с вогнутой характеристикой.

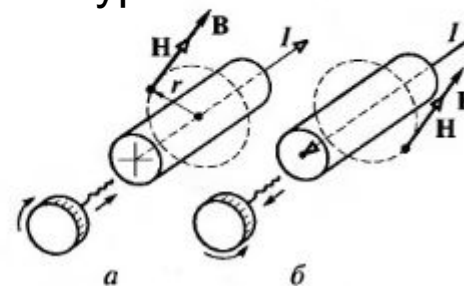
$$U_A = -U_0 + m_u \frac{I_A}{m_i} \operatorname{tg} \beta = -U_0 + m_R I_A \operatorname{tg} \beta \quad (28.1)$$

$$U_A = -U_0 + R_{\text{диф}} I_A \quad (28.2)$$

Электромагнетизм, магнитные цепи постоянного тока



Правило буравчика



$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} = \mu_a \mathbf{H}$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная

$\mu_a = \mu_r \mu_0$ — абсолютная магнитная проницаемость

Совокупность магнитных линий вектора магнитной индукции \mathbf{B} через поверхность, ограниченную замкнутым контуром, называется магнитным потоком Φ .

Основная единица измерения напряженности магнитного поля в СИ — ампер на метр (А/м); индукции — тесла (Тл): $1 \text{ Тл} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}/\text{м}^2$; потока — вебер (Вб): $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}$.

Электромагнетизм, магнитные цепи постоянного тока

Магнитные свойства вещества

ДИАМАГНЕТИКИ — $M < 1$. $M_{\text{ВИСМУТА}} = 0,9998$ (СВИНЕЦ, ЦИНК, АЗОТ И ДР.).

ПАРАМАГНЕТИКИ — $M > 1$. $M_{\text{АЛЮМИНИЯ}} = 1,000023$ (КИСЛОРОД, НИКЕЛЬ И ДР.).

ДЛЯ ПАРА-

И ДИАМАГНЕТИКОВ НАМАГНИЧЕННОСТЬ I ПРЯМО ПРОПОРЦИОНАЛЬНА ИНДУКЦИИ B_0 МАГНИТНОГО ПОЛЯ

ФЕРРОМАГНЕТИКИ — $M \gg 1$. $M_{\text{СТАЛИ}} = 8 \cdot 10^3$ (ЖЕЛЕЗО, НИКЕЛЬ, КОБАЛЬТ И ИХ СПЛАВЫ). СПЛАВ ЖЕЛЕЗА С НИКЕЛЕМ: $M = 2,5 \cdot 10^5$.

Свойства ферромагнетиков

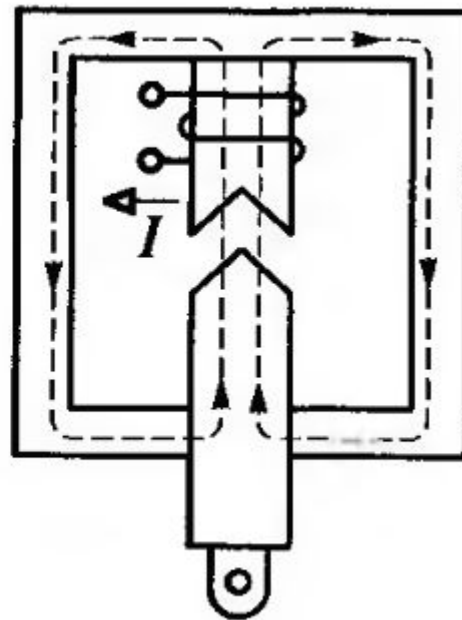
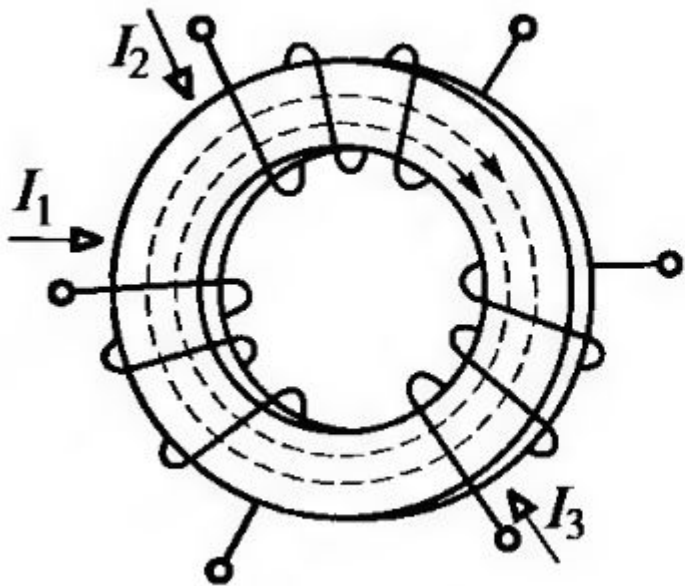
Обладают остаточным магнетизмом.

μ зависит от индукции внешнего магнитного поля.

Температура, при которой исчезают ферромагнитные свойства, называется точкой Кюри (вещество становится парамагнетиком; точка Кюри для железа равна 770°C , для никеля 360°C).

Магнитные цепи

Магнитной цепью (магнитопроводом) называется совокупность различных ферромагнитных и неферромагнитных частей электротехнических устройств для создания магнитных полей нужных конфигурации и интенсивности. В зависимости от принципа действия электротехнического устройства магнитное поле может возбуждаться либо постоянным магнитом, либо катушкой с током, расположенной в той или иной части магнитной цепи.



Закон полного тока

Подобно электрической цепи для магнитной цепи применимы понятия «ветвь», «узел», «контур».

В большинстве случаев магнитную цепь следует считать нелинейной и лишь при определенных допущениях и определенных режимах работы —

ли

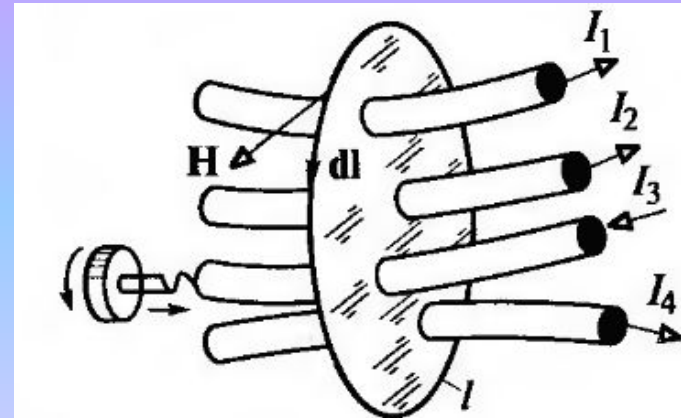
$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum I = F \quad (1.32)$$

Интеграл от напряженности магнитного поля по любому замкнутому контуру (циркуляция вектора) равен алгебраической сумме токов, сцепленных с этим контуром

Величина $\sum I = F$

называется магнитодвижущей силой

(МДС) в замкнутом контуре



Расчет неразветвленной магнитной цепи

$$\sum_{k=1}^2 H_k l_k = H_1 l_1 + H_2 l_2 = U_{M1} + U_{M2} = I w = F \quad (1.33)$$

$$\Phi = B_1 S_1 = B_2 S_2 \quad (2.33)$$

$$R_{M1} = \frac{U_{M1}}{\Phi} = \frac{H_1 l_1}{B_1 S_1} = \frac{l_1}{\mu_a(U_{M1}) S_1}; \quad (3.33)$$

$$R_{M2} = \frac{U_{M2}}{\Phi} = \frac{H_2 l_2}{B_2 S_2} = \frac{l_2}{\mu_0 S_2} = \text{const}$$

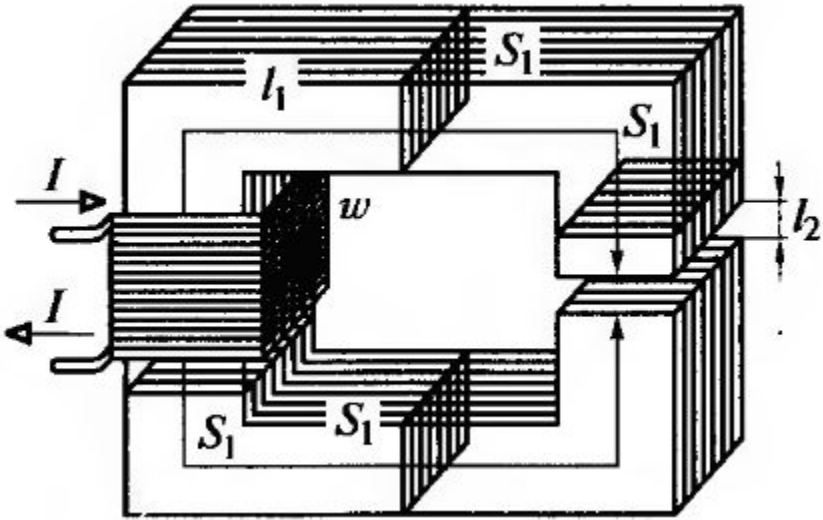


Рис. 4.33

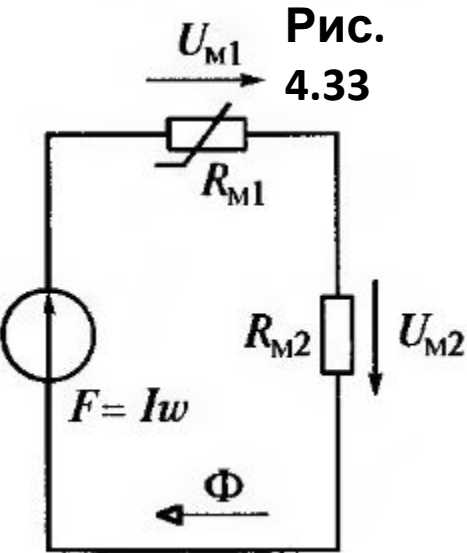


Рис.

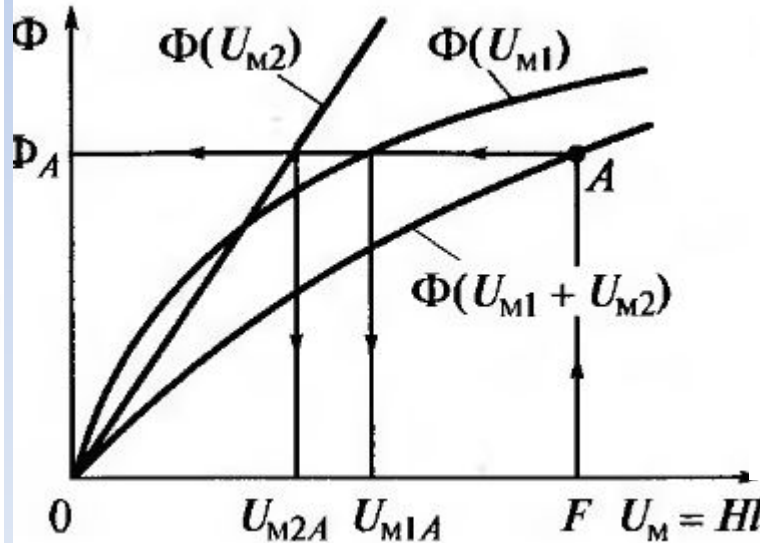


Рис.

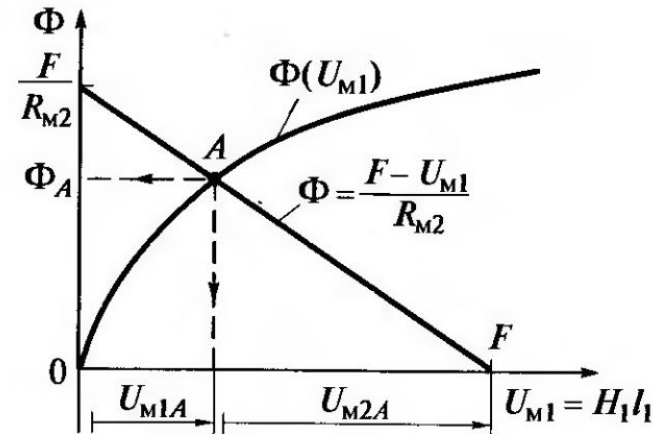


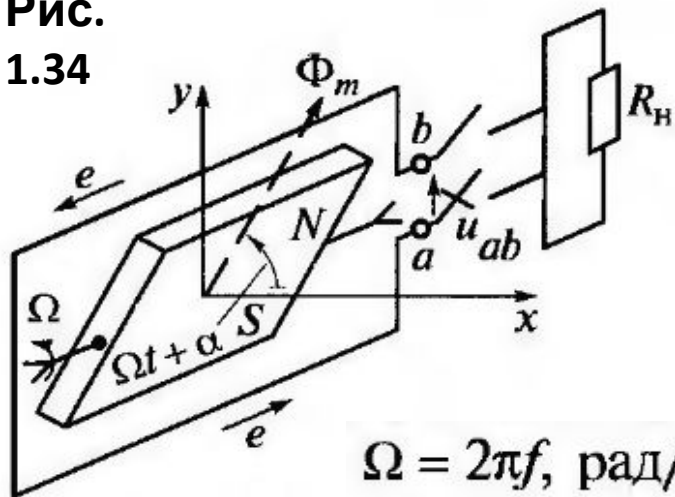
Рис. 3.33

Лекция № 6

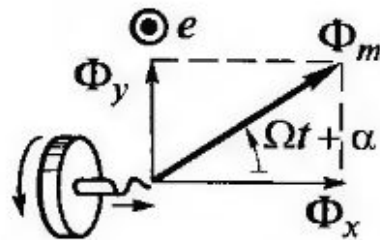
- ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА
- МАКСИМАЛЬНОЕ, СРЕДНЕЕ И ДЕЙСТВУЮЩЕЕ ЗНАЧЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН
- ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН КОМПЛЕКСНЫМИ ЧИСЛАМИ
- ЗАКОН ОМА В КОМПЛЕКСНОЙ ФОРМЕ ДЛЯ РЕЗИСТИВНОГО, ИНДУКТИВНОГО И ЕМКОСТНОГО ЭЛЕМЕНТОВ

Источники электрической энергии синусоидального тока

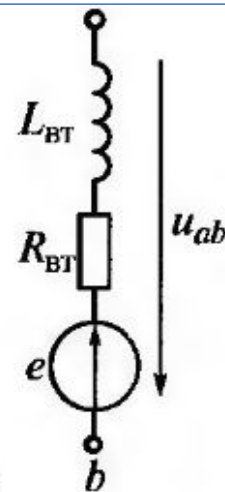
Рис.
1.34



$$\Omega = 2\pi f, \text{ рад/с.}$$



$$T = 1/f, \text{ с}$$



$$(2.34)$$

$$\Phi_x = \Phi_m \cos(\Omega t + \alpha) = \Phi_m \sin(\omega t + \psi_\Phi), \quad e = -d\Phi_x/dt = -\Phi_m \omega \cos(\omega t + \psi_\Phi) = E_m \sin(\omega t + \psi_e)$$

(1.34)

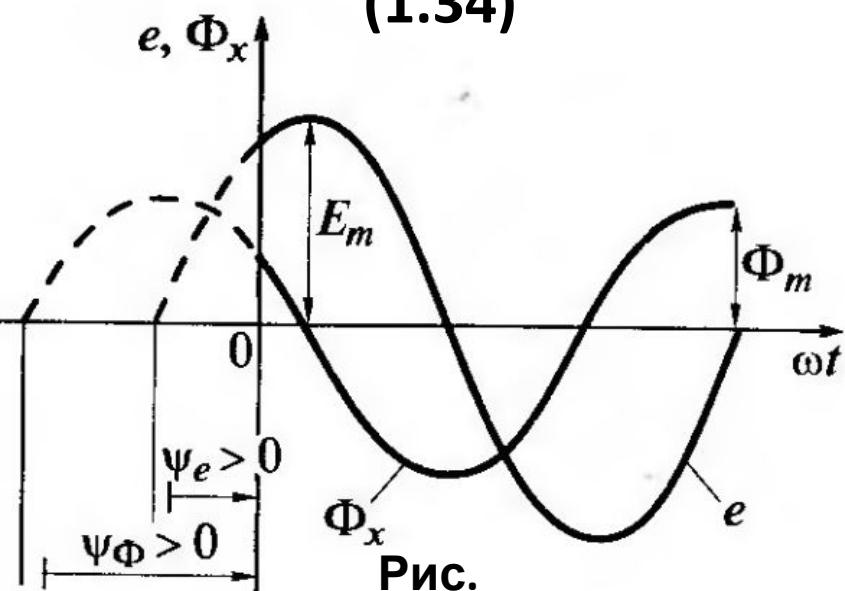
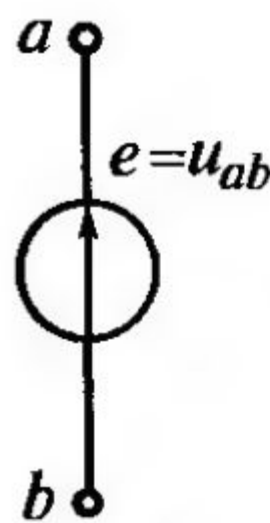
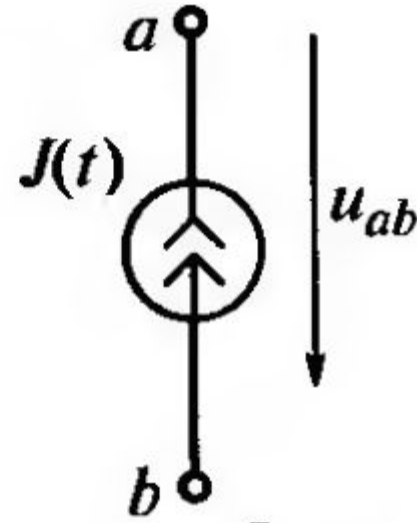


Рис.



а

Рис.



б

Максимальное, среднее и действующее значения синусоидальных величин

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) \quad (1.35) \quad I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{2I_m}{\pi} \quad (2.35)$$

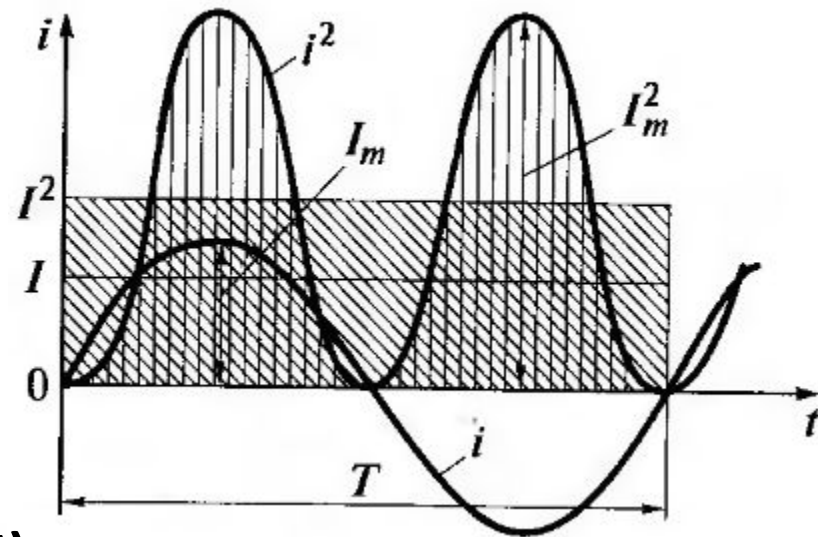
$$W_- = \int_0^T Ri^2 dt, \quad W_+ = RI^2T. \quad (3.35)$$

$$RI^2T = \int_0^T Ri^2 dt \quad (4.35)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (5.35)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = I_m \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt} \quad (6.35)$$

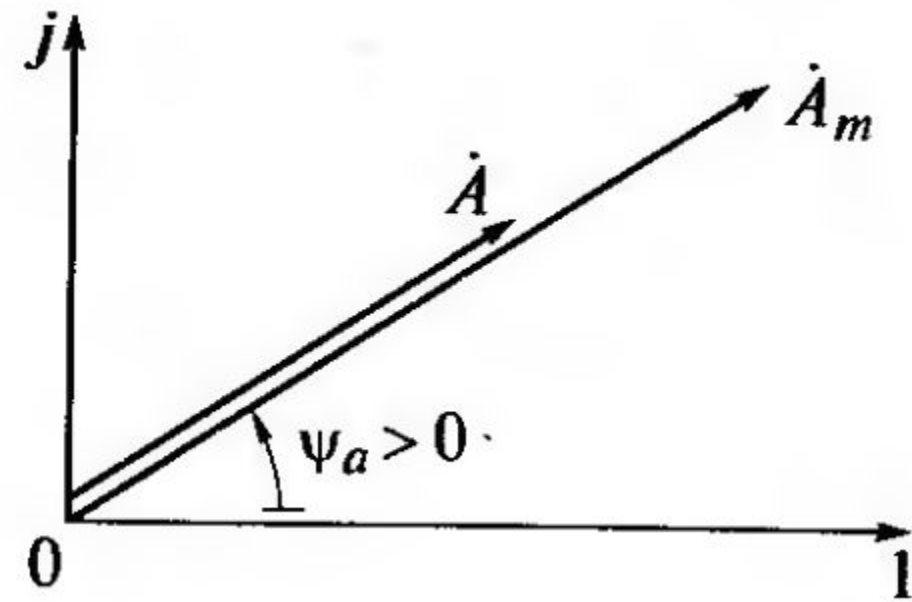
$$\int_0^T dt = T, \quad \text{а} \quad \int_0^T \cos 2\omega t dt = 0, \quad I = I_m / \sqrt{2} \quad (7.35) \quad (8.35)$$



$$A_{cp} = 2A_m / \pi \approx 0,637 A_m$$

$$A = A_m / \sqrt{2} \approx 0,707 A_m. \quad (9.35)$$

Представление синусоидальных величин комплексными числами



- показательная форма

$$\dot{A} = A e^{j\psi_a} = A \angle \psi_a;$$

- тригонометрическая форма **(4.36)**

$$\dot{A} = A \cos \psi_a + jA \sin \psi_a;$$

$$e^{j\pi/2} = j \text{ и } e^{-j\pi/2} = -j = 1/j. \quad \text{(5.36)}$$

$$\dot{A}_m = A_m e^{j\psi_a} \quad \text{(1.36)}$$

$$A_m e^{j(\omega t + \psi_a)} = A_m \cos(\omega t + \psi_a) + jA_m \sin(\omega t + \psi_a) \quad \text{(2.36)}$$

$$\dot{A} = \dot{A}_m / \sqrt{2} = A e^{j\psi_a} \quad \text{(3.36)}$$

Закон Ома в комплексной форме для резистивного, индуктивного и емкостного элементов

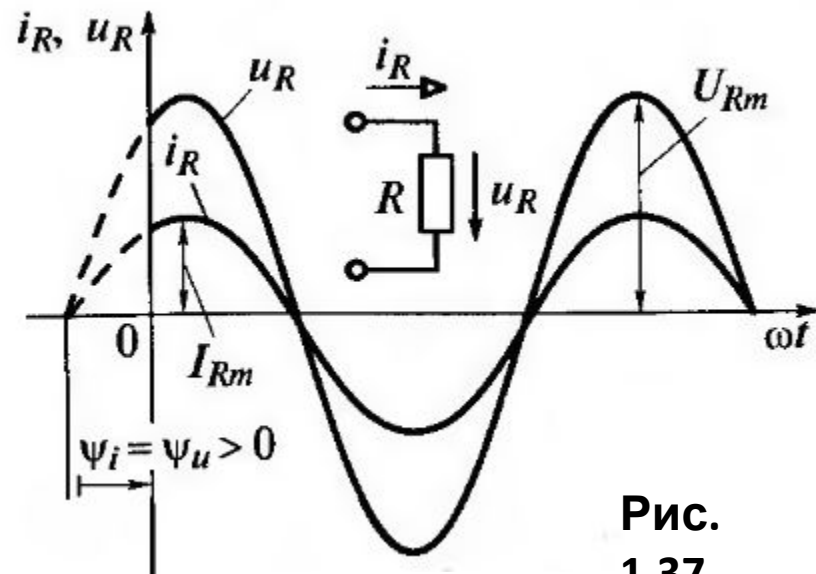


Рис. 1.37

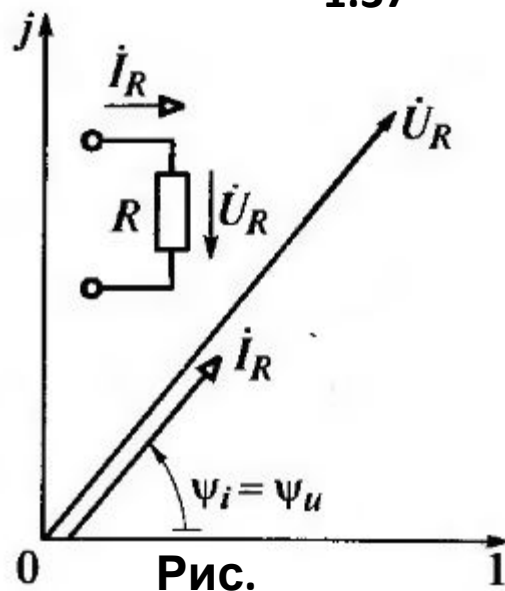


Рис.

$$i_R = I_{Rm} \sin(\omega t + \psi_i) \quad (1.37)$$

$$u_R = Ri_R = RI_{Rm} \sin(\omega t + \psi_i) = U_{Rm} \sin(\omega t + \psi_u)$$

$$U_{Rm} = RI_{Rm} \quad (2.37)$$

$$\psi_u = \psi_i$$

$$U_R = RI_R \quad (4.37)$$

$$\dot{I} = I_R e^{j\psi_i} \quad \text{и} \quad \dot{U}_R = U_R e^{j\psi_u} \quad (5.37)$$

$$\dot{U}_R = RI_R e^{j\psi_u} = RI_R e^{j\psi_i} \quad (6.37)$$

$$\dot{U}_R = R\dot{I}_R \quad (7.37)$$

ИНДУКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

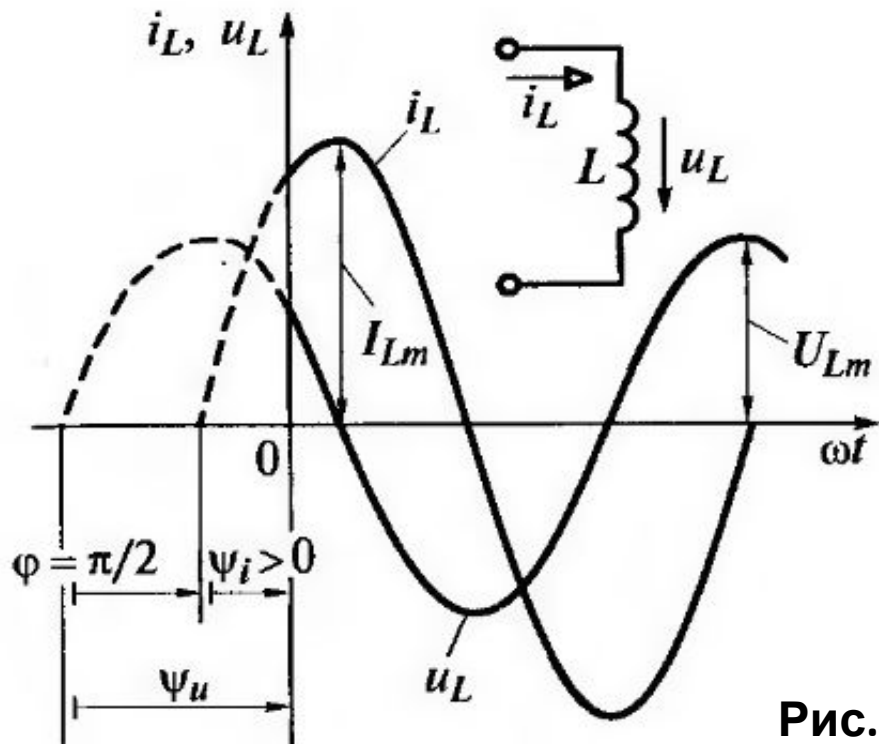


Рис. 1.38

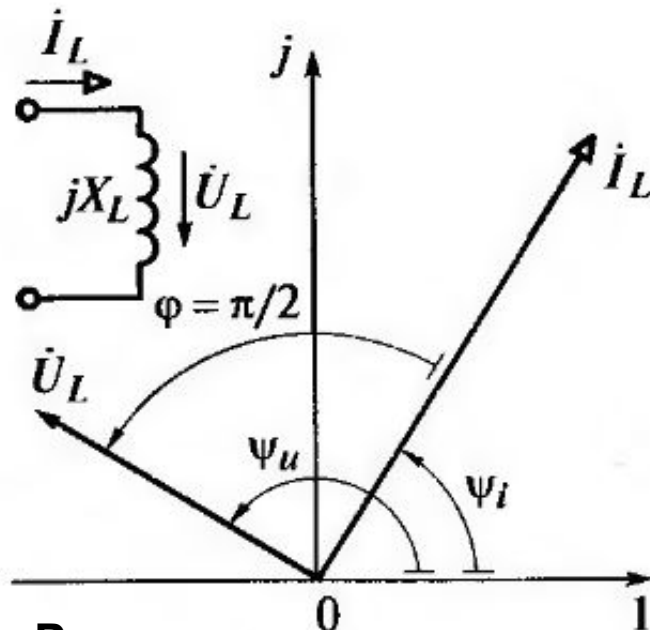


Рис.

$$i_L = I_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i) \quad (1.38)$$

$$u_L = -e_L = L di_L / dt = \omega L I_{Lm} \cos(\omega t + \psi_i) = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i + \pi/2) = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_u) \quad (2.38)$$

$$U_{Lm} = \omega L I_{Lm}; \quad \psi_u = \psi_i + \pi/2. \quad (3.38)$$

$$U_L = \omega L I_L = X_L I_L \quad (4.38)$$

$$X_L = \omega L \quad (5.38)$$

$$B_L = 1/\omega L, \quad (6.38)$$

$$\dot{I}_L = I_L e^{j\psi_i} \text{ и } \dot{U}_L = U_L e^{j\psi_u} \quad (7.38)$$

$$\dot{U}_L = \omega L I_L e^{j\psi_u} = \omega L I_L e^{j(\psi_i + \pi/2)} \quad (8.38)$$

$$\dot{U}_L = j\omega L \dot{I}_L = jX_L \dot{I}_L \quad (9.38)$$

$$j\omega L = jX_L \quad (10.38)$$

$$1/j\omega L = -jB_L \quad (11.38)$$

ЁМКОСТЫЙ ЭЛЕМЕНТ

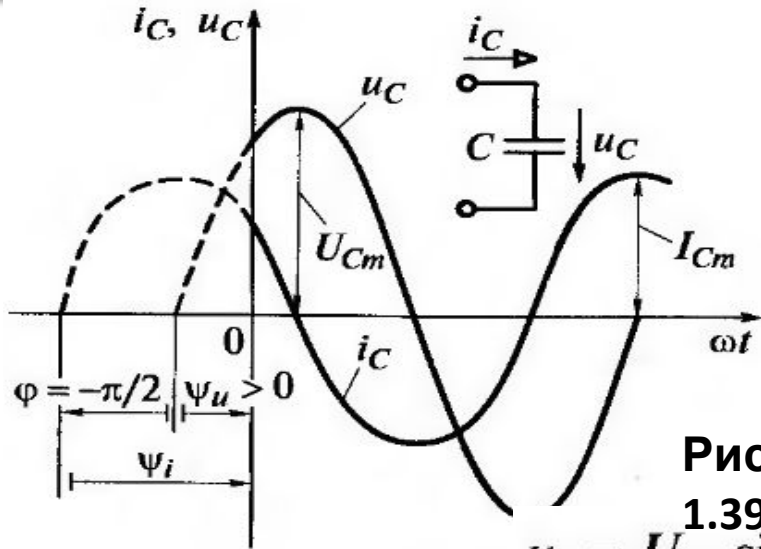


Рис. 1.39

$$u_C = U_{Cm} \sin(\omega t + \psi_u) \quad (1.39)$$

$$i_C = C du_C / dt = \omega C U_{Cm} \cos(\omega t + \psi_u) = I_{Cm} \sin(\omega t + \psi_u + \pi/2) = I_{Cm} \sin(\omega t + \psi_i), \quad (2.39)$$

$$I_{Cm} = \omega C U_{Cm}; \quad (3.39)$$

$$\psi_i = \psi_u + \pi/2.$$

$$U_C = \frac{1}{\omega C} I_C = X_C I_C \quad (6.39)$$

$$\dot{I}_C = I_C e^{j\psi_i} \text{ и } \dot{U}_C = U_C e^{j\psi_u} \quad (8.39)$$

$$X_C = 1/\omega C \quad (4.39)$$

$$\dot{I}_C = I_C e^{j\psi_i} \text{ и } \dot{U}_C = U_C e^{j\psi_u} \quad (6.39)$$

$$\dot{U}_C = \frac{1}{j\omega C} \dot{I}_C = -jX_C \dot{I}_C \quad (9.39)$$

$$B_C = \omega C \quad (5.39)$$

$$\dot{U}_C = \frac{1}{\omega C} I_C e^{j\psi_u} = \frac{1}{\omega C} I_C e^{j(\psi_i - \pi/2)} \quad (7.39)$$

$$1/j\omega C = -jX_C \quad j\omega C = jB_C \quad (10.39)$$

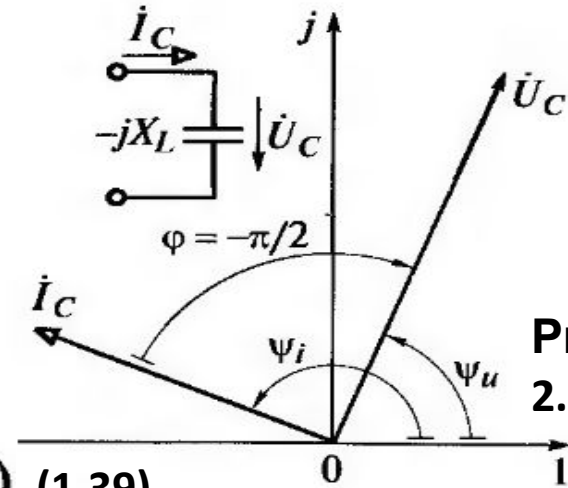
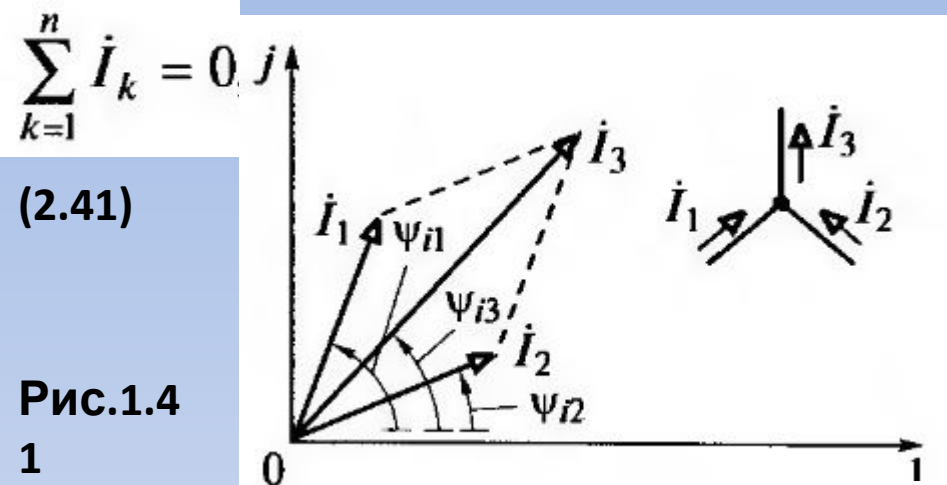


Рис. 2.39

Первый и второй законы Кирхгофа в комплексной форме

$$\sum_{k=1}^n i_k = \sum_{k=1}^n I_{mk} \sin(\omega t + \psi_{ik}) = 0 \quad (1.41)$$

(3.41)



$$\sum_{k=1}^m u_k = \sum_{k=1}^m U_{mk} \sin(\omega t + \psi_{uk}) = 0$$

$$\sum_{k=1}^n U_{mk} \sin(\omega t + \psi_{uk}) = \sum_{k=1}^m E_{mk} \sin(\omega t + \psi_{ek})$$

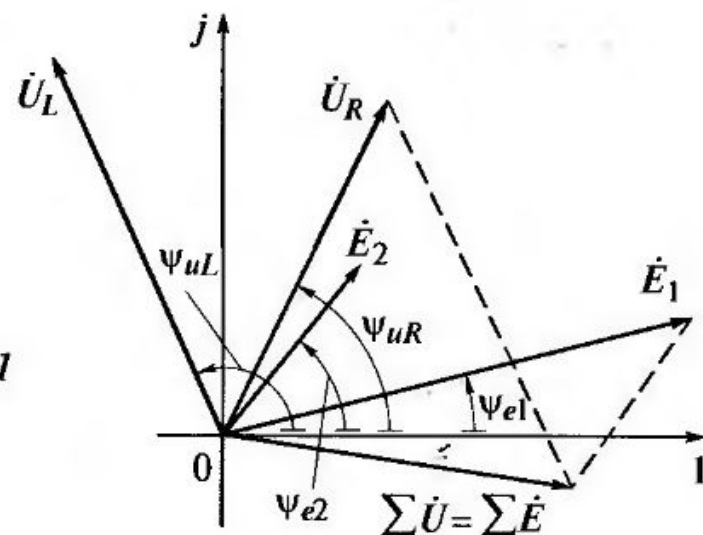
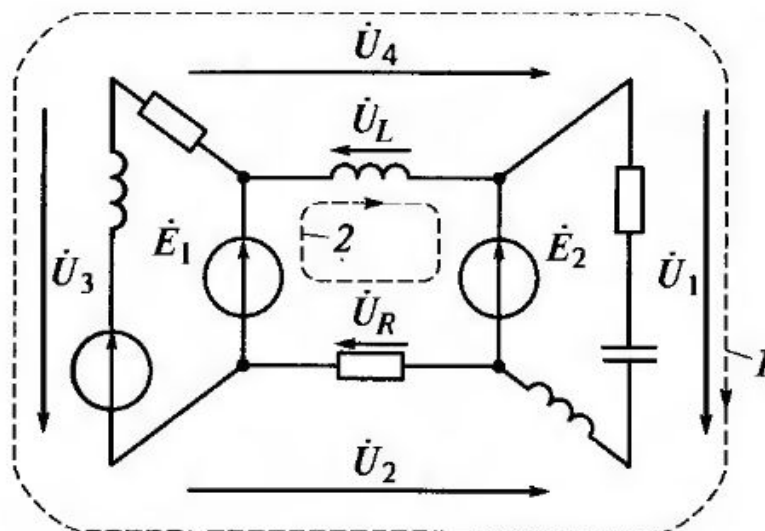
(4.41)

Рис.1.4
1

$$\sum_{k=1}^m \dot{U}_k = 0;$$

$$\sum_{k=1}^n \dot{U}_k = \sum_{k=1}^m \dot{E}_k$$

(5.41)



$$\dot{U}_R - \dot{U}_L = \dot{E}_1 - E_2 \quad (6.41)$$

Рис.2.4

Пример расчета цепи переменного тока

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ А.} \quad (1.42)$$

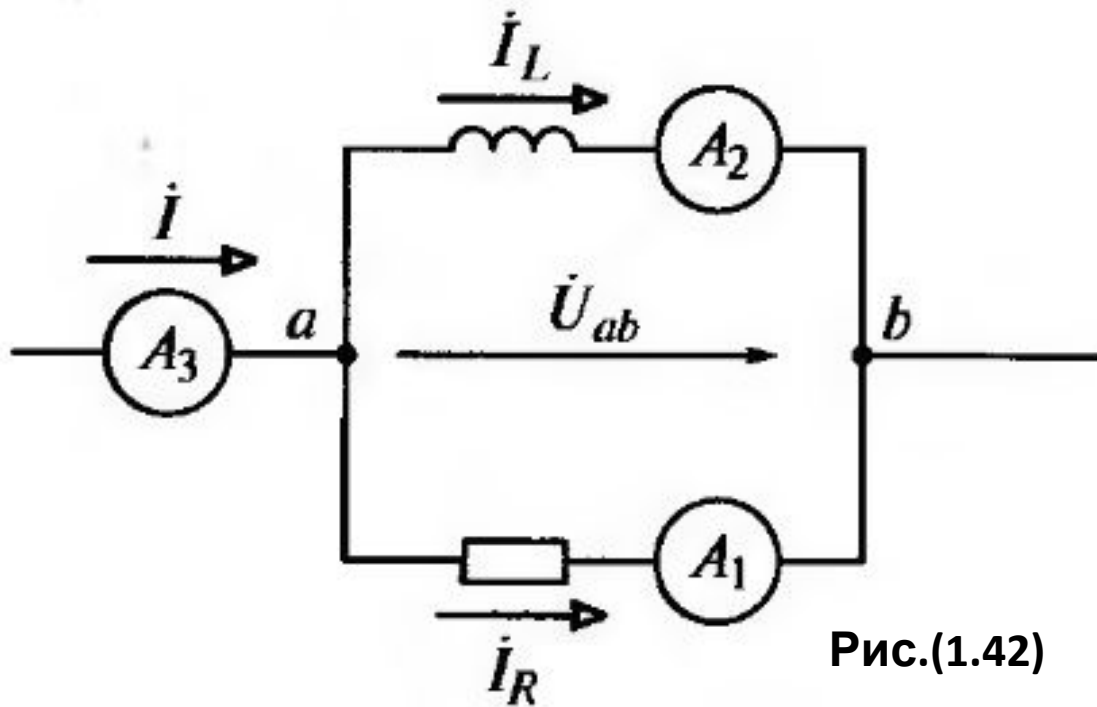
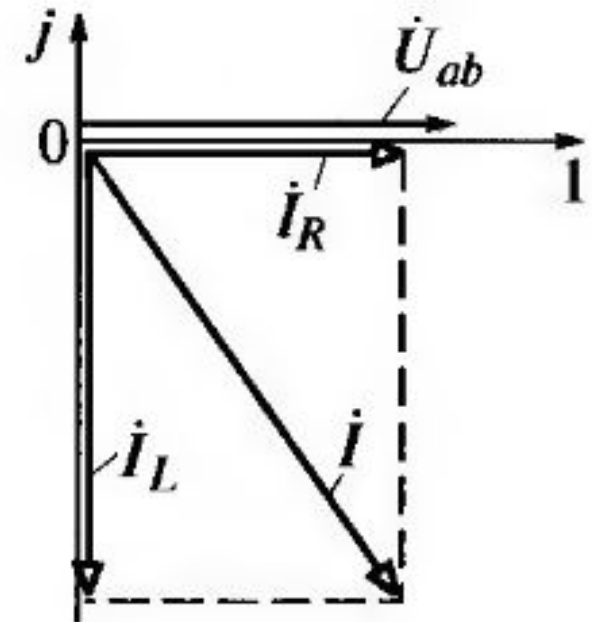






Рис.(1.42)



Комплексный метод расчета цепей синусоидального тока

1. Представляем исходные данные о параметрах всех элементов цепи в комплексной форме, т.е. синусоидальные ЭДС источников напряжения и токи источников тока, заданных мгновенными значениями (в тригонометрической форме), индуктивные и емкостные элементы цепи соответствующими им комплексными значениями и комплексными сопротивлениями или проводимостями

Источник	Мгновенное значение	Комплексное значение	Условное обозначение
ЭДС	$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e)$	$\dot{E} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_e}$	e  \dot{E} 
Тока	$J(t) = J_m \sin(\omega t + \psi_j)$	$\dot{J} = \frac{J_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_j}$	$J(t)$  \dot{J} 

Элемент	Параметр	Комплексное сопротивление	Комплексная проводимость
Резистивный	R	R	$1/R = G$
Индуктивный	L	$j\omega L = jX_L$	$1/j\omega L = -jB_L$
Емкостной	C	$\frac{1}{j\omega C} = -jX_C$	$j\omega C = jB_C$

Комплексный метод расчета цепей синусоидального тока

- 2. Выбираем положительные направления комплексных токов во всех ветвях и указываем их стрелками на схеме цепи.
- 3. По законам Ома и Кирхгофа в комплексной форме составляем систему уравнений, определяющую режим работы цепи.
- 4. Решаем полученную систему уравнений и определяем комплексные значения токов в ветвях цепи и напряжений на ее элементах.
- 5. По найденным комплексным значениям токов и напряжений определяем соответствующие им мгновенные значения синусоидальных токов и напряжений

Лекция № 7

- Электрическая цепь переменного тока с последовательным соединением элементов
- Резонанс напряжений
- Резонанс токов
- Энергетические процессы в резистивном, индуктивном и емкостном элементах
- Энергетический баланс в цепи синусоидального тока

Электрическая цепь переменного тока с последовательным соединением элементов

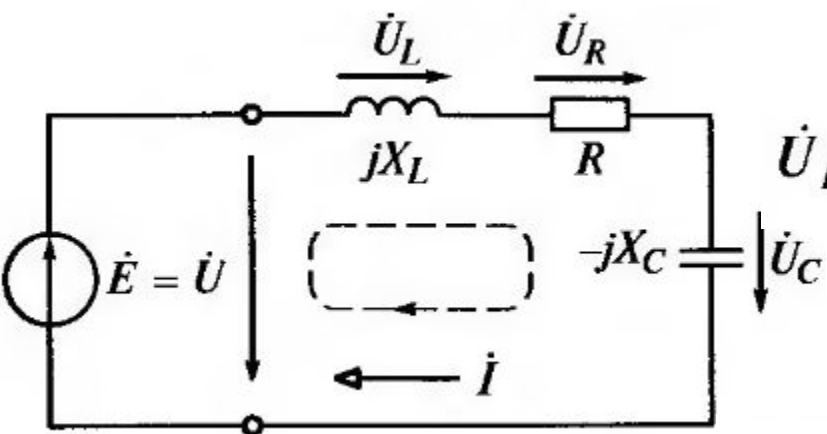
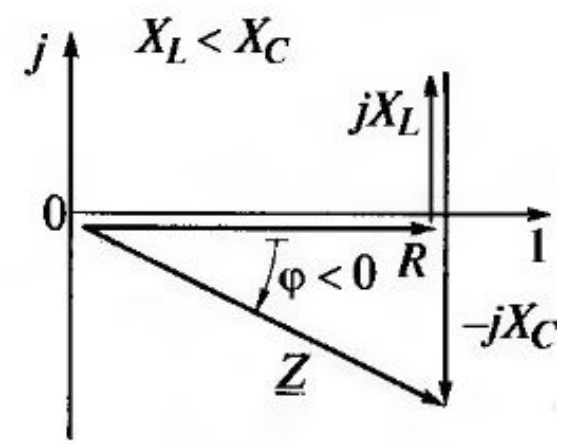
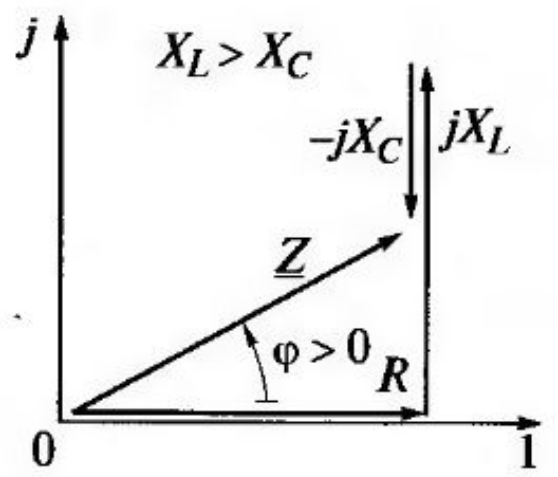


Рис. 1.46

$$\dot{U}_L + \dot{U}_R + \dot{U}_C = j\omega L \dot{I} + R \dot{I} - j \frac{1}{\omega C} \dot{I} = \dot{E} \quad (1.46)$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{R + j(\omega L - 1/\omega C)} \quad (2.46)$$

$$\underline{Z} = R + j(\omega L - 1/\omega C) = R + j(X_L - X_C) \quad \underline{Y} = 1/\underline{Z} \quad (3.46)$$



$$\underline{Z} = Z \cos \varphi + jZ \sin \varphi$$

$$\underline{Z} = Z e^{j\varphi} = Z \angle \varphi, \quad (4.46)$$

$$Z = |\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (5.46)$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$$

Рис. 2.46

Электрическая цепь переменного тока с последовательным соединением элементов

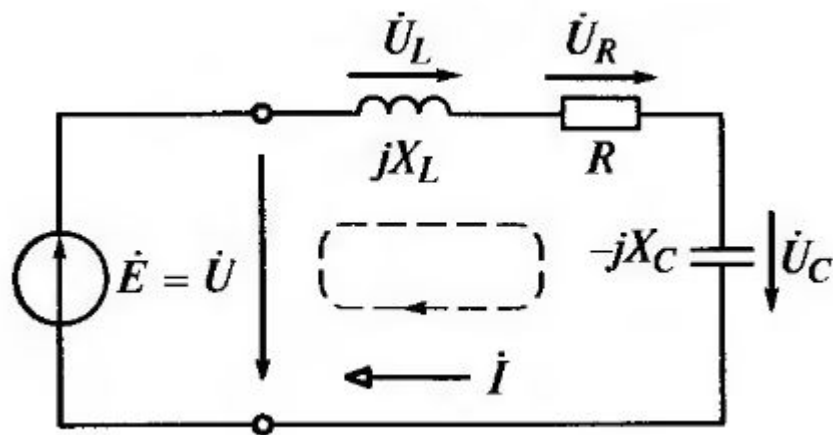


Рис.
1.47

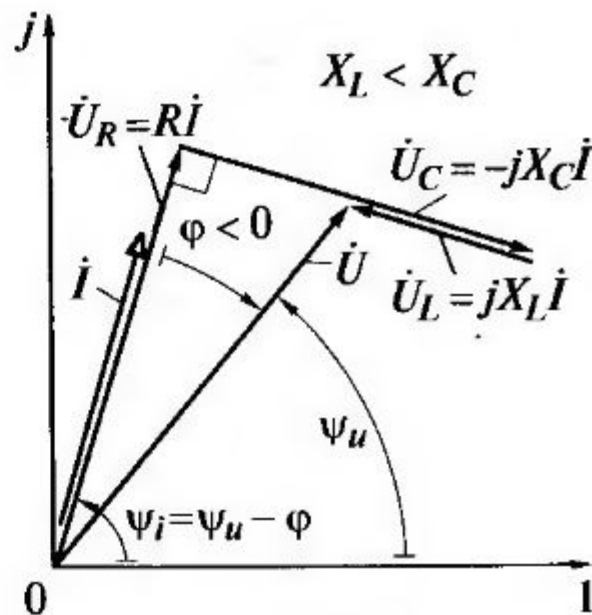
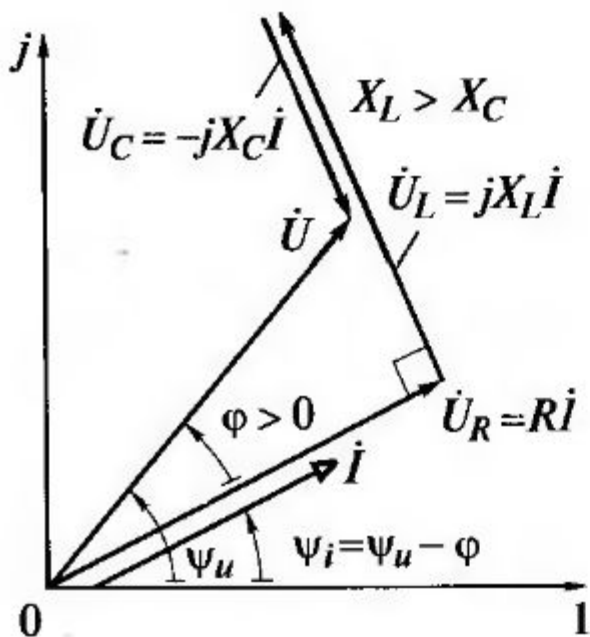


Рис.

Электрическая цепь переменного тока с последовательным соединением элементов

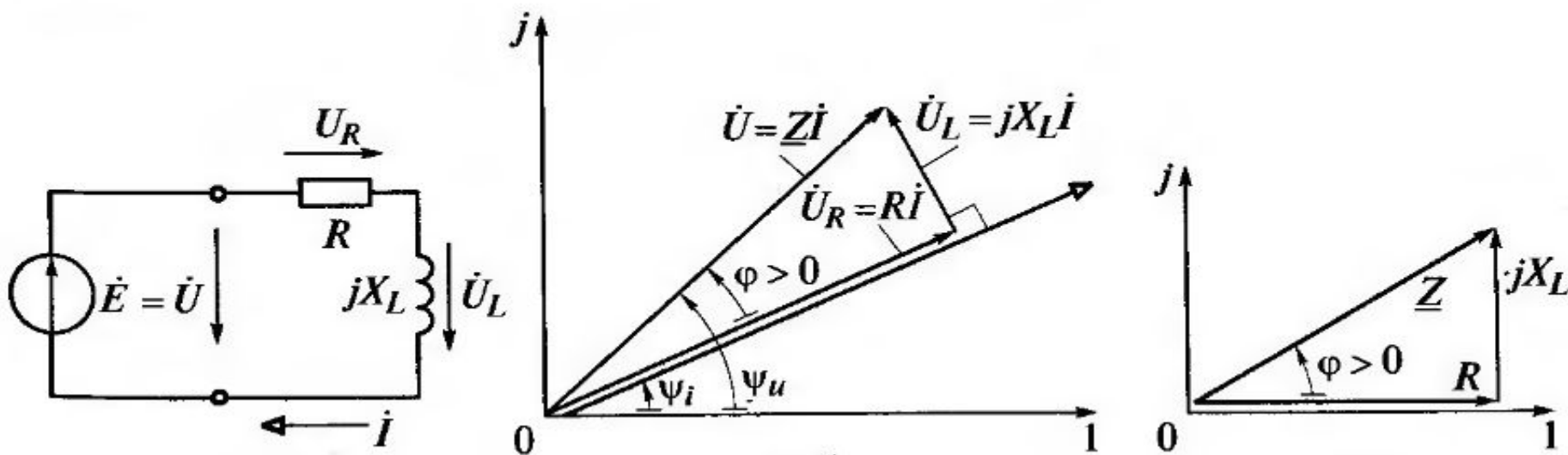


Рис.1.48

$$\begin{aligned} \dot{U}_R + \dot{U}_L &= RI + jX_L I = \dot{U} = \dot{E}; \\ \underline{Z} &= R + jX_L, \end{aligned} \quad (1.48)$$

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = I\sqrt{R^2 + X_L^2} \\ I &= U/Z. \end{aligned} \quad (3.48)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (1.48)$$

Электрическая цепь переменного тока с последовательным соединением элементов

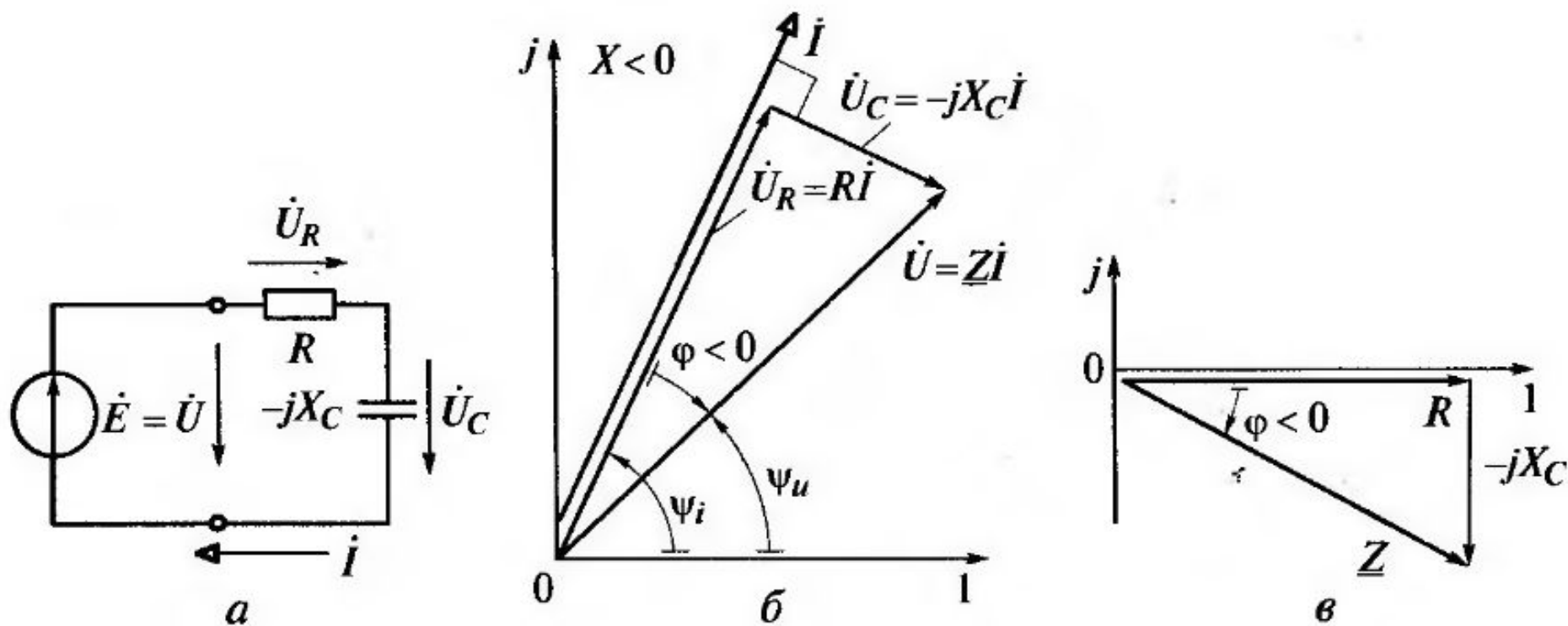


Рис.1.4

9

$$\begin{aligned} \dot{U}_R + \dot{U}_C &= R\dot{I} - jX_C\dot{I} = \dot{U} = \dot{E}; \\ \underline{Z} &= R + jX_C, \end{aligned} \quad (1.49)$$

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} = I\sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$$I = U/Z. \quad (3.49)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \quad (2.49)$$

Резонанс напряжений

- Резонансом напряжений называется режим работы неразветвленного участка цепи, содержащего индуктивный, емкостный и резистивный элементы последовательного контура, при котором его ток и напряжение совп $\psi_i = \psi_u$ по

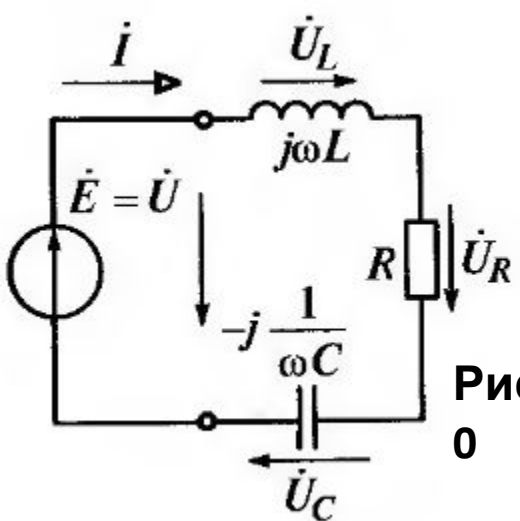


Рис.1.5

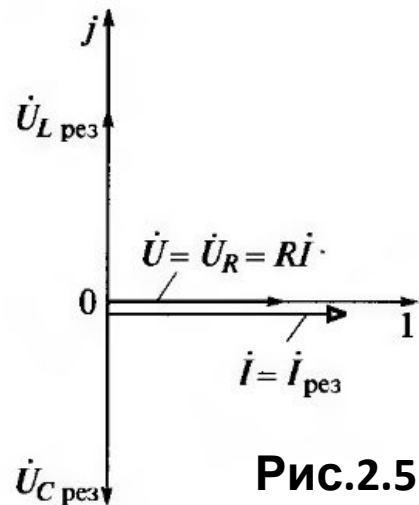


Рис.2.5

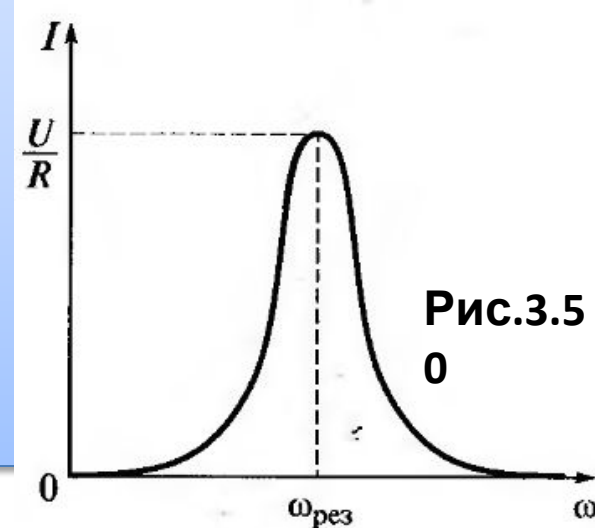


Рис.3.5

$$\omega_{\text{рез}} L = 1/(\omega_{\text{рез}} C) \quad (1.50)$$

$$\omega_{\text{рез}} = 1/\sqrt{LC} \quad (2.50)$$

$$I_{\text{рез}} = U/R, \quad (3.50)$$

$$U_{L\text{рез}} = U_{C\text{рез}} = \omega_{\text{рез}} L I_{\text{рез}} = U \omega_{\text{рез}} L/R \quad (4.50)$$

$$\omega_{\text{рез}} L = 1/(\omega_{\text{рез}} C) = \sqrt{L/C} > R \quad (5.50)$$

$$\rho = \sqrt{L/C} = \omega_{\text{рез}} L = 1/\omega_{\text{рез}} C \quad (6.50)$$

$$Q = \frac{U_{L\text{рез}}}{U} = \frac{U_{C\text{рез}}}{U} = \frac{\rho I_{\text{рез}}}{R I_{\text{рез}}} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} \quad (7.50)$$

Резонанс токов

- Резонансом токов называется режим работы разветвленного участка цепи, содержащего индуктивный, емкостный и резистивный элементы параллельного колебательного контура, при котором фазы токов индуктивности и емкости различаются на π .

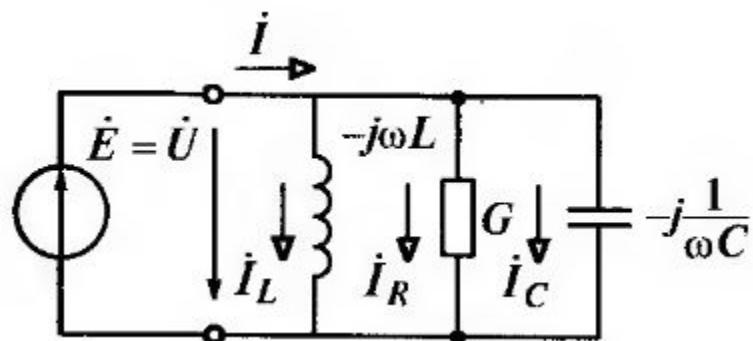


Рис.
1.51

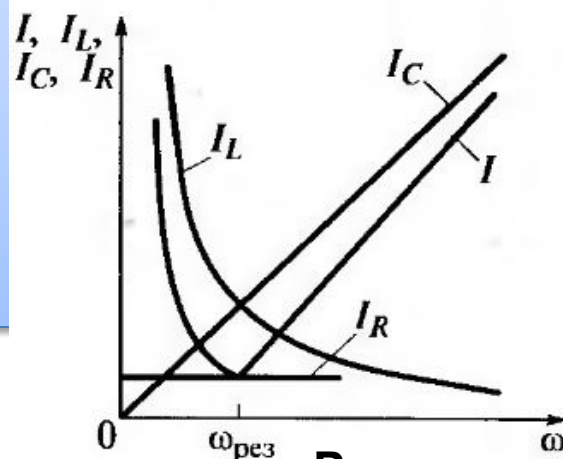


Рис.
2.51

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.51)$$

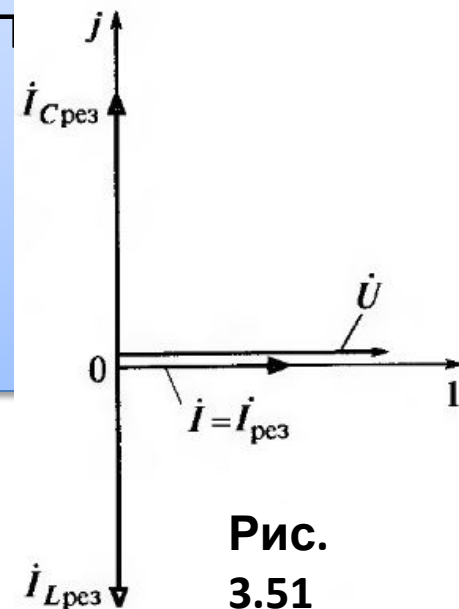


Рис.
3.51

Энергетические процессы в резистивном, индуктивном и емкостном элементах

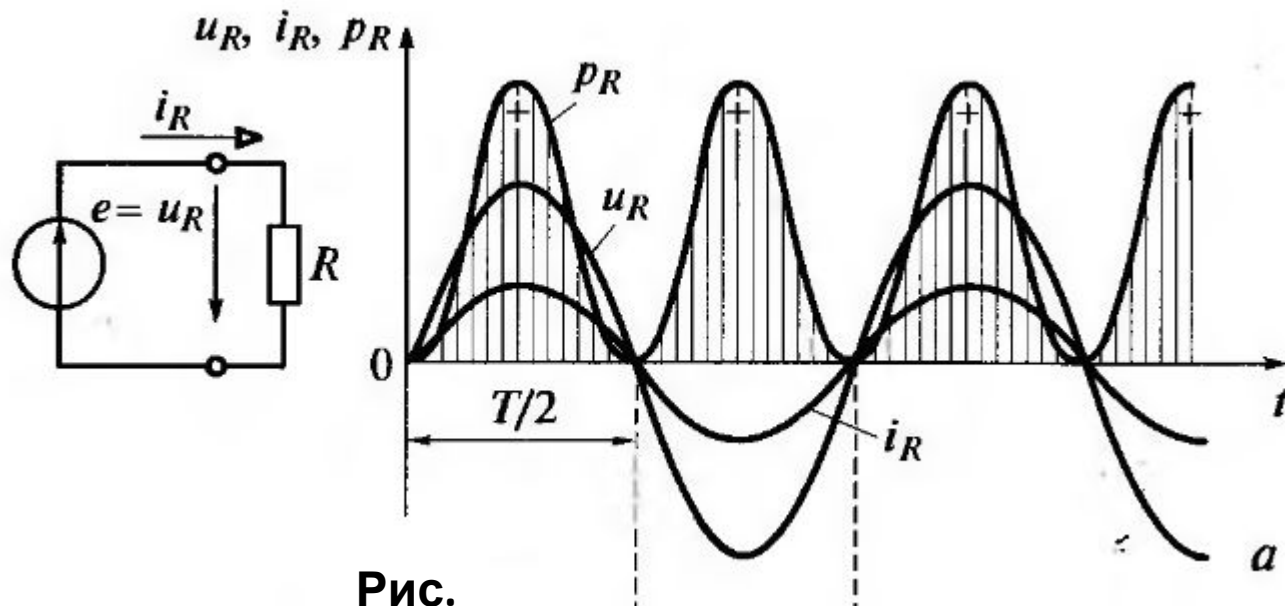


Рис.
1.52

$$p_R = u_R i_R = U_{Rm} I_{Rm} \sin^2 \omega t = \frac{U_{Rm} I_{Rm}}{2} (1 - \cos 2\omega t) \quad (1.52)$$

$$P_R = \frac{1}{T} \int_0^T p_R dt = U_R I_R = R I_R^2 = I_R^2 / G = G U_R^2 = U_R^2 / R \quad (2.52)$$

Энергетические процессы в резистивном, индуктивном и емкостном элементах

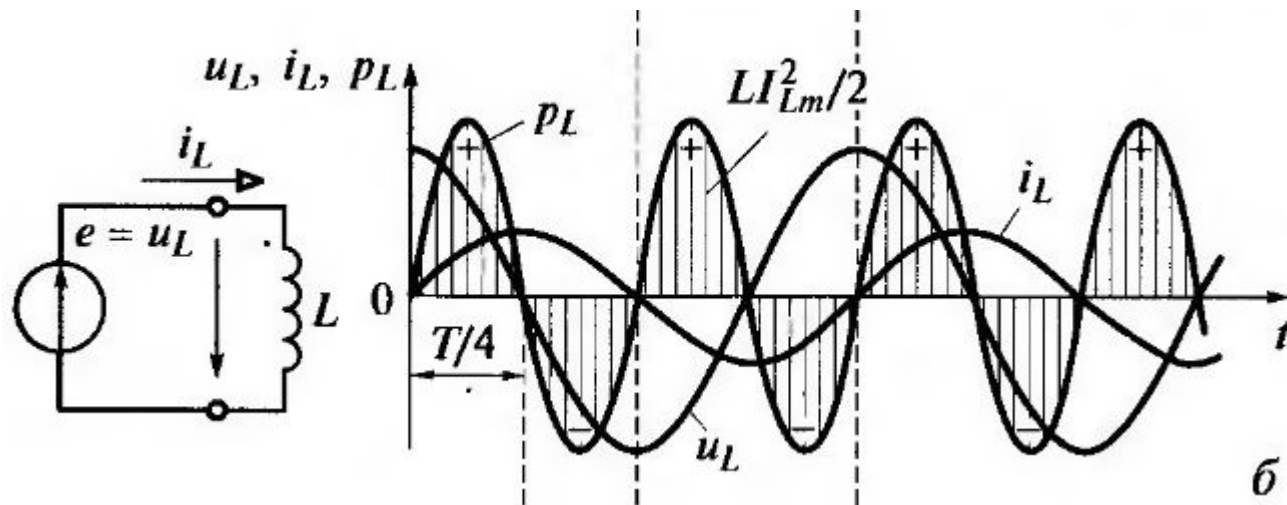


Рис.1.5

3

$$u_L = L di_L / dt = U_{Lm} \sin(\omega t + \pi/2) = U_{Lm} \cos \omega t \quad (1.53)$$

$$p_L = \dot{u}_L i_L = U_{Lm} I_{Lm} \sin \omega t \cos \omega t = \frac{U_{Lm} I_{Lm}}{2} \sin 2\omega t = U_L I_L \sin 2\omega t \quad (2.53)$$

Энергетические процессы в резистивном, индуктивном и емкостном элементах

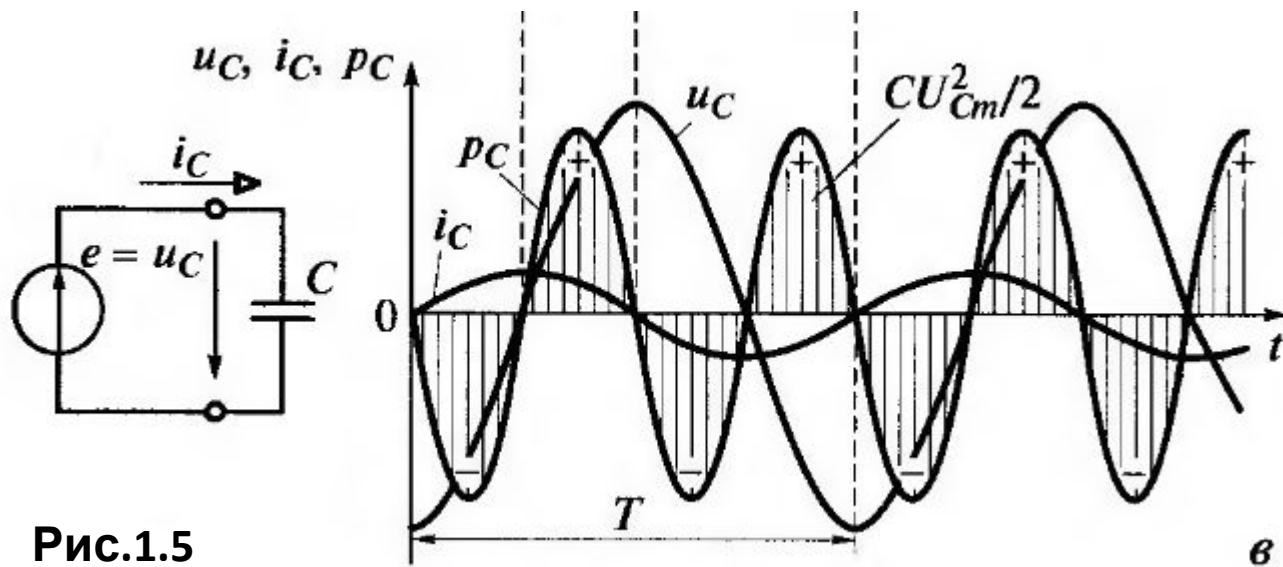


Рис.1.5

4

$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt = U_{Cm} \sin(\omega t - \pi/2) = -U_{Cm} \cos \omega t \quad (1.54)$$

$$p_C = u_C i_C = -U_{Cm} I_{Cm} \sin \omega t \cos \omega t = -\frac{U_{Cm} I_{Cm}}{2} \sin 2\omega t = -U_C I_C \sin 2\omega t. \quad (2.54)$$

Энергетические процессы в резистивном, индуктивном и емкостном элементах

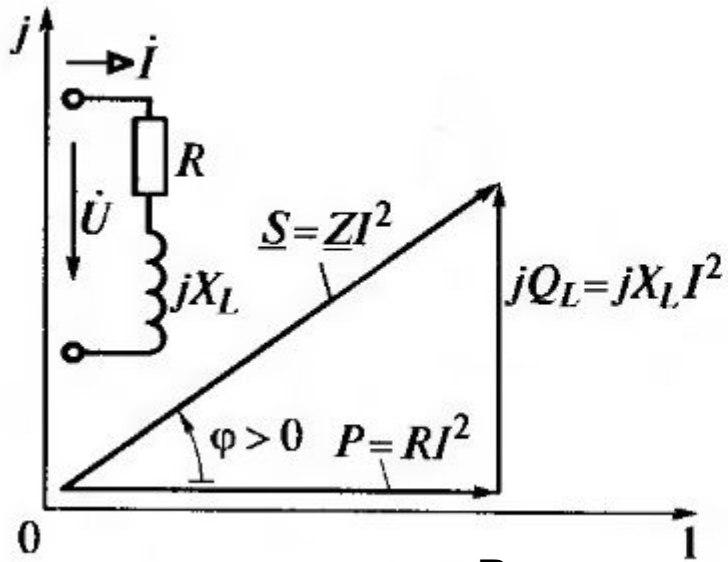


Рис.1.5

$$\sin \varphi = X_L/Z, \quad (1.55)$$

$$Q = Q_L = UI \sin \varphi = X_L I^2; \quad (4.55)$$

$$Q = Q_C = UI \sin \varphi = -X_C I^2$$

$$S = |\underline{S}| = ZI^2 = UI \quad (7.55)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (9.55)$$

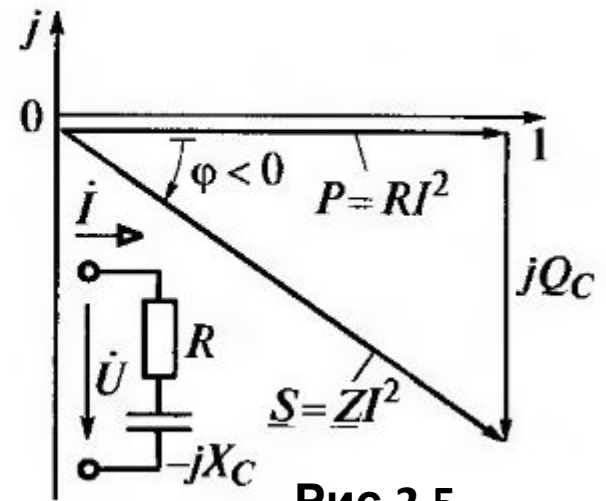


Рис.2.5

$$\cos \varphi = R/Z = U_R/U. \quad (2.55) \quad \sin^5 \varphi = -X_C/Z. \quad (3.55)$$

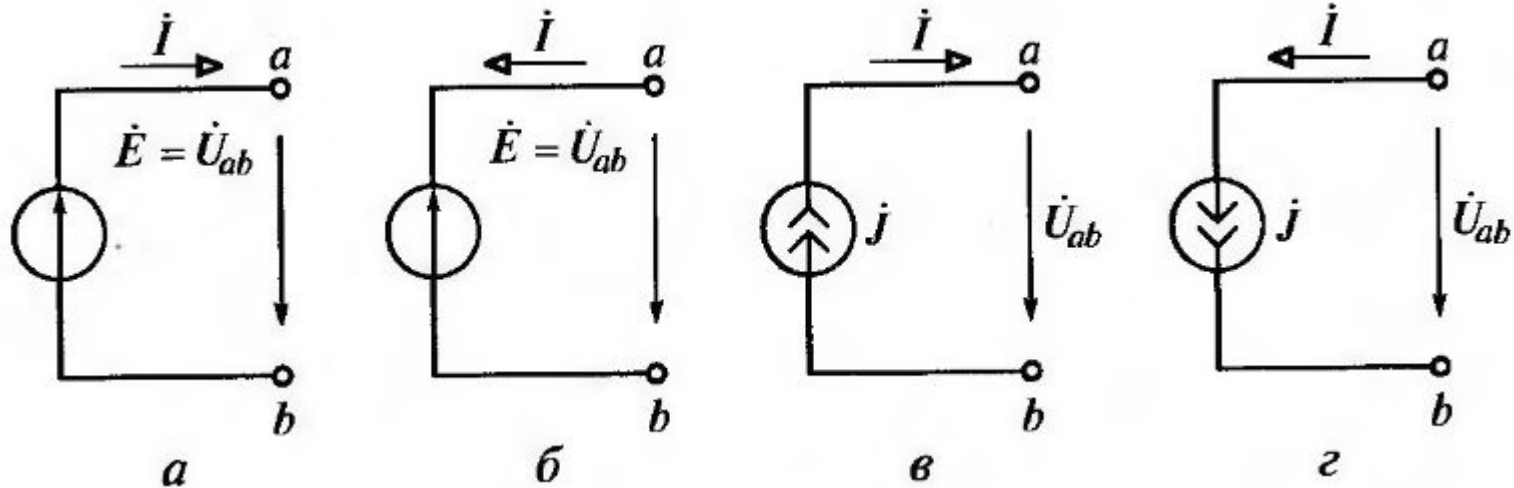
$$P = UI \cos \varphi \quad (5.55)$$

$$Q = UI \sin \varphi \quad (6.55)$$

$$S^2 = U^2 I^2 = (UI \cos \varphi)^2 + (UI \sin \varphi)^2 \quad (8.55)$$

$$\cos \varphi = P/S. \quad (10.55)$$

Энергетический баланс в цепи синусоидального тока



$$\sum U_{\text{ист}} I_{\text{ист}} \cos(\psi_u - \psi_i) = \sum R I_R^2 \quad (1.56)$$

$$\sum P_{\text{ист}} = \sum P_R \quad (2.56)$$

$$\sum U_{\text{ист}} I_{\text{ист}} \sin(\psi_u - \psi_i) = \sum X_L I_L^2 - \sum X_C I_C^2 \quad (2.57)$$

$$\sum Q_{\text{ист}} = \sum Q_L + \sum Q_C \quad (2.58)$$

Лекция № 8

- **Трёхфазные электрические цепи**
- **Соединение фаз источника и приемника электрической энергии звездой**
- **Соединение фаз источника и приемника электрической энергии треугольником**
- **Активная, реактивная и полная мощности трехфазного симметричного приемника**
- **Сравнение условий работы трехфазного симметричного приемника при соединениях его фаз треугольником и звездой**
- **Классификация средств, видов и методов электрических измерений**
- **Погрешности измерения и классы точности**
- **Электромеханические аналоговые показывающие приборы**

$$\left. \begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; \\ e_B &= E_m \sin (\omega t - 2\pi/3); \\ e_C &= E_m \sin (\omega t - 4\pi/3) = E_m \sin (\omega t + 2\pi/3). \end{aligned} \right\} (1.58)$$

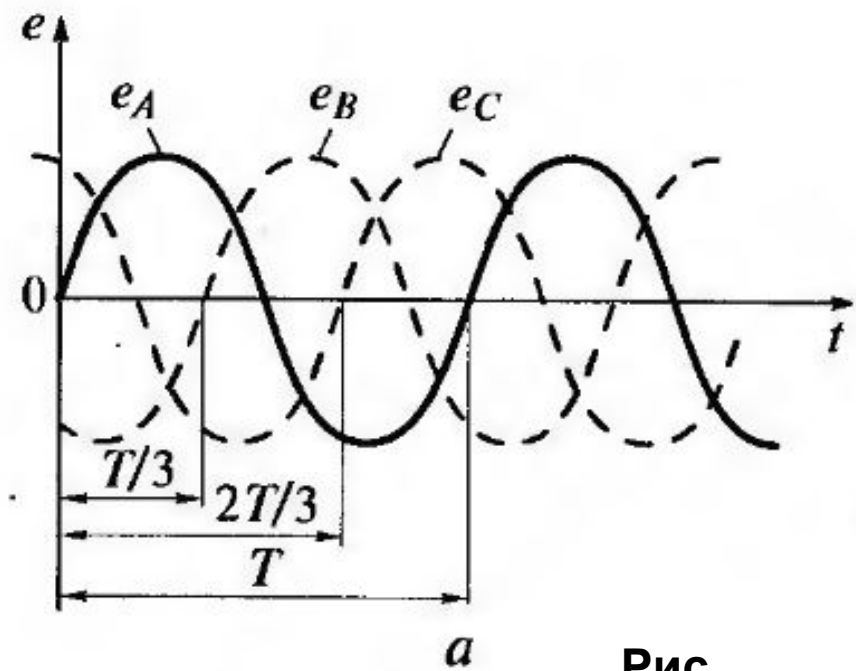
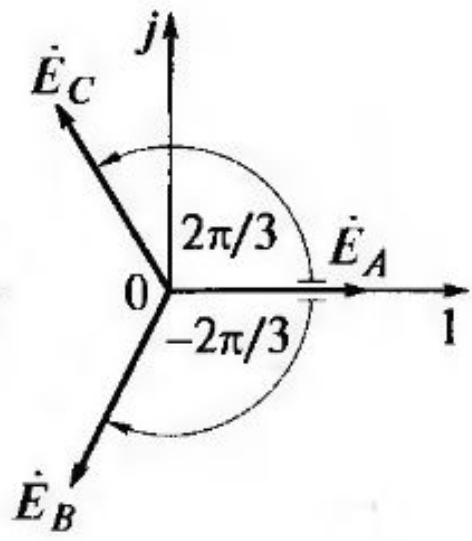


Рис. 1.58



б

$$(2.58) \left. \begin{aligned} e_A + e_B + e_C &= 0; \\ \dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Соединение фаз источника и приемника электрической энергии звездой

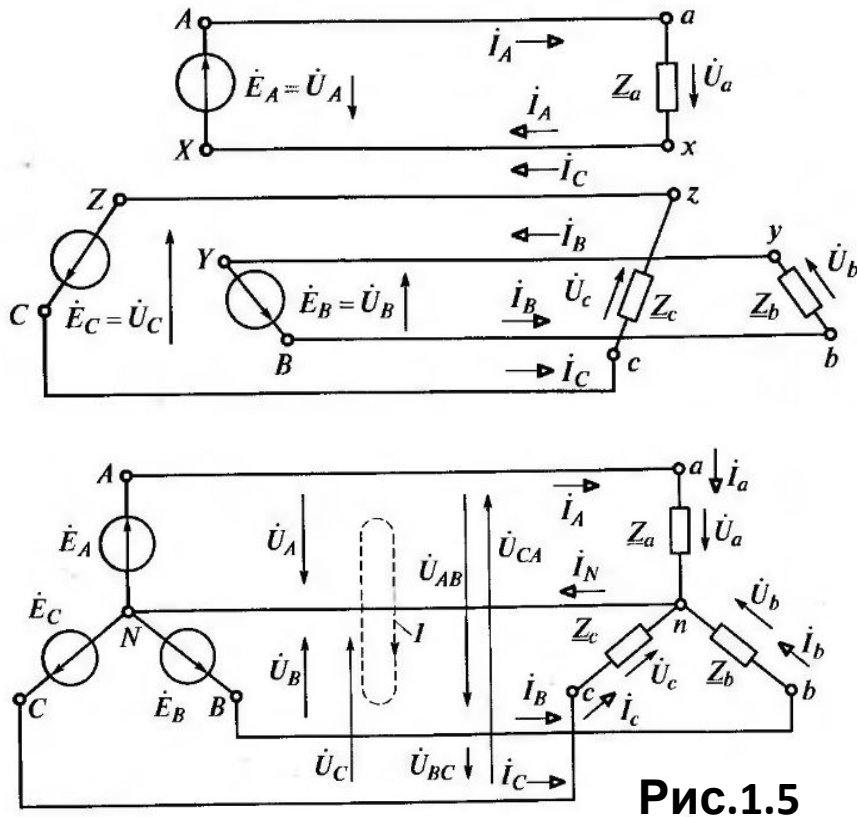


Рис.1.5

Соединение фаз источника и приемника звездой (Y) приведено на рис. , где выводы источника X, Y, Z и выводы приемника x, y, z объединены в узел N и узел n соответственно. Эти узлы называются нейтральными точками источника и приемника, а провод, соединяющий их, — нейтральным проводом. Остальные три провода, соединяющие одноименные выводы источника и приемника, называются линейными.

Фазными токами и напряжениями называются токи в фазах источника и приемника и напряжения между выводами фаз. Линейными токами и напряжениями называются токи в линейных проводах и напряжения между ними. Для обозначения фазных величин источника и линейных величин будем пользоваться прописными буквами латинского алфавита A, B, C, для обозначения фазных величин приемника —78

Соединение фаз источника и приемника электрической энергии звездой

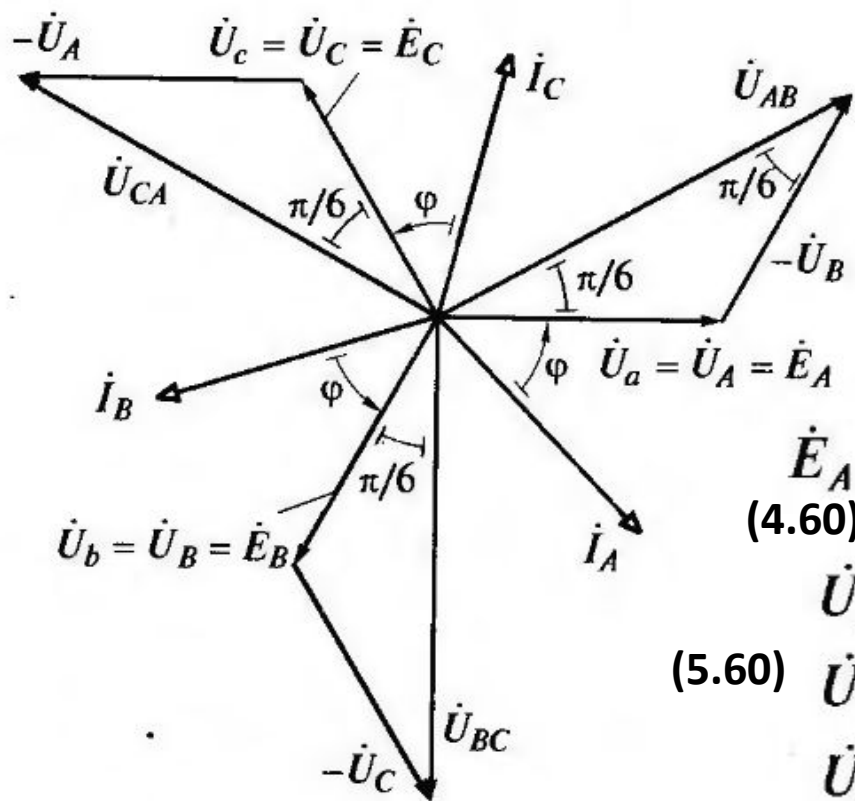


Рис.1.6
0

$$I_A = I_a = \dot{E}_A / \underline{Z}_a; I_B = I_b = \dot{E}_B / \underline{Z}_b; I_C = I_c = \dot{E}_C / \underline{Z}_c \quad (1.60)$$

$$I_N = I_A + I_B + I_C \quad (2.60)$$

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi = Z_\phi e^{j\varphi} \quad (3.60)$$

$$I_L = I_\phi \quad (4.60)$$

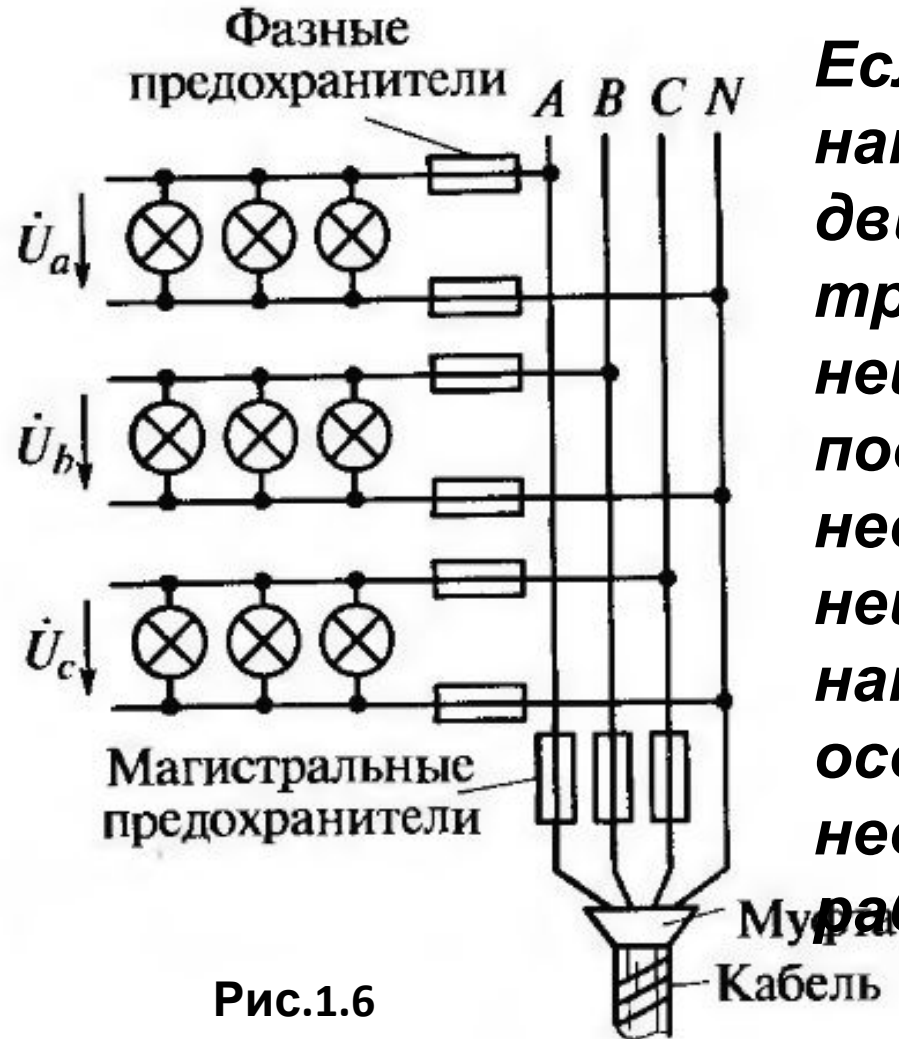
$$\dot{E}_A = \dot{U}_A = \dot{U}_a; \dot{E}_B = \dot{U}_B = \dot{U}_b; \dot{E}_C = \dot{U}_C = \dot{U}_c \quad (4.60)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{E}_A - \dot{E}_B = \dot{U}_A - \dot{U}_B = U_L \angle \pi/6; \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{E}_B - \dot{E}_C = \dot{U}_B - \dot{U}_C = U_L \angle (-\pi/2); \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{E}_C - \dot{E}_A = \dot{U}_C - \dot{U}_A = U_L \angle 5\pi/6, \end{aligned} \right\} \quad (5.60)$$

$$(6.60) \quad U_L = 2U_\phi \cos \pi/6 = \sqrt{3}U_\phi$$

линейное напряжение U_L , В	660	380	220
фазное напряжение U_ϕ , В	380	220	127

Соединение фаз источника и приемника электрической энергии звездой



Если симметричный приемник, например трехфазный двигатель, подключают к трехфазному источнику без нейтрального провода, то при подключении приемника с несимметричной нагрузкой нейтральный провод необходим, например, при подключении осветительных приборов с неопределенным временем работы.

Рис.1.6

1

Соединение фаз источника и приемника электрической энергии треугольником

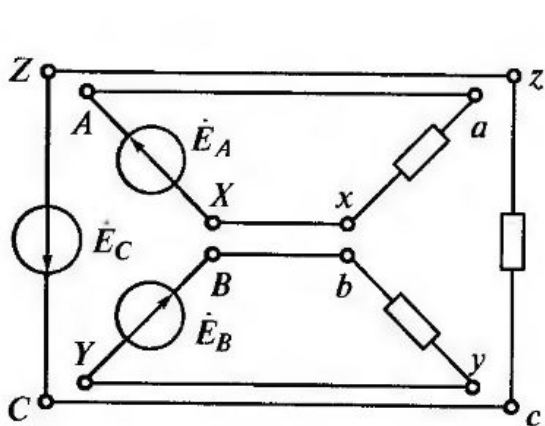


Рис.1.6

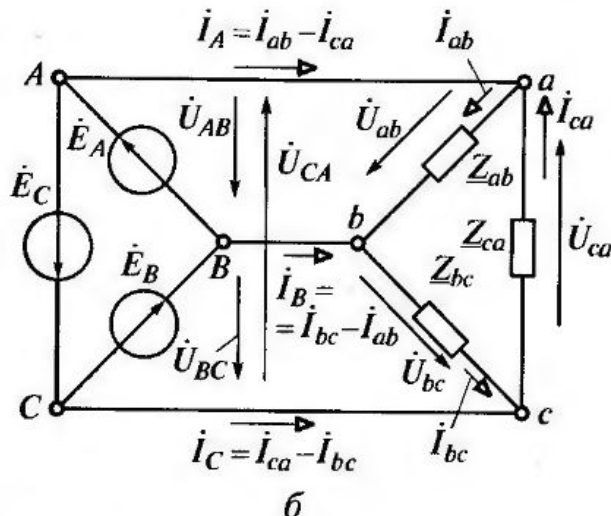
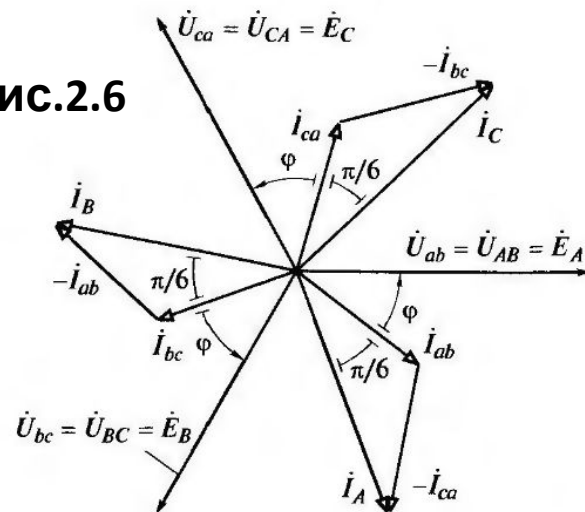


Рис.2.6

2



$$\dot{E}_A = \dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab}; \dot{E}_B = \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc}; \dot{E}_C = \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca} \quad (1.62)$$

$$U_{л} = U_{\phi} \quad (2.62)$$

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} \quad (3.62)$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}; \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} \quad (4.62)$$

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_{\phi} = Z_{\phi} e^{j\varphi} \quad (5.62)$$

$$I_{л} = 2I_{\phi} \cos \pi/6 = \sqrt{3}I_{\phi} \quad (6.62)$$

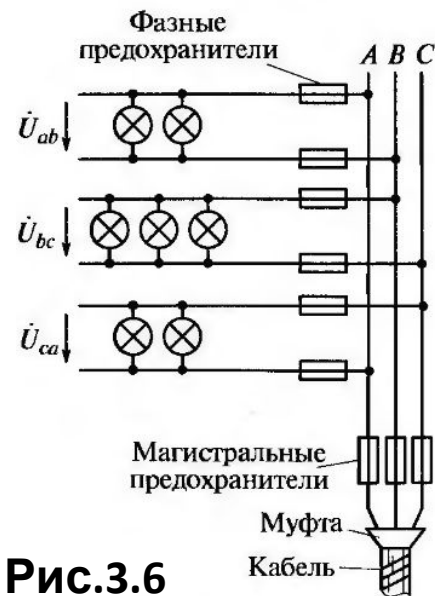


Рис.3.6

2

Активная, реактивная и полная мощности трехфазного симметричного приемника

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = 3 \frac{U_{\phi}^2}{Z_{\phi}} \cos \varphi = \sqrt{3}U_{л}I_{л} \cos \varphi, \quad (1.63)$$

$$Q = 3Q_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \sin \varphi = 3 \frac{U_{\phi}^2}{Z_{\phi}} \sin \varphi = \sqrt{3}U_{л}I_{л} \sin \varphi \quad (2.63)$$

$$S = 3S_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} = 3 \frac{U_{\phi}^2}{Z_{\phi}} = \sqrt{3}U_{л}I_{л}. \quad (3.63)$$

Сравнение условия работы трехфазного симметричного приемника при соединениях его фаз треугольником и звездой

$$P = 3 \frac{U_{\Phi}^2}{Z_{\Phi}} \cos \varphi \quad (1.64)$$

$$U_{\Phi\Delta} = U_{л} \quad (2.64)$$

$$U_{\Phi\lambda} = U_{л} / \sqrt{3} \quad (3.64)$$

$$P_{\Delta} = 3P_{\lambda} \quad (4.64)$$

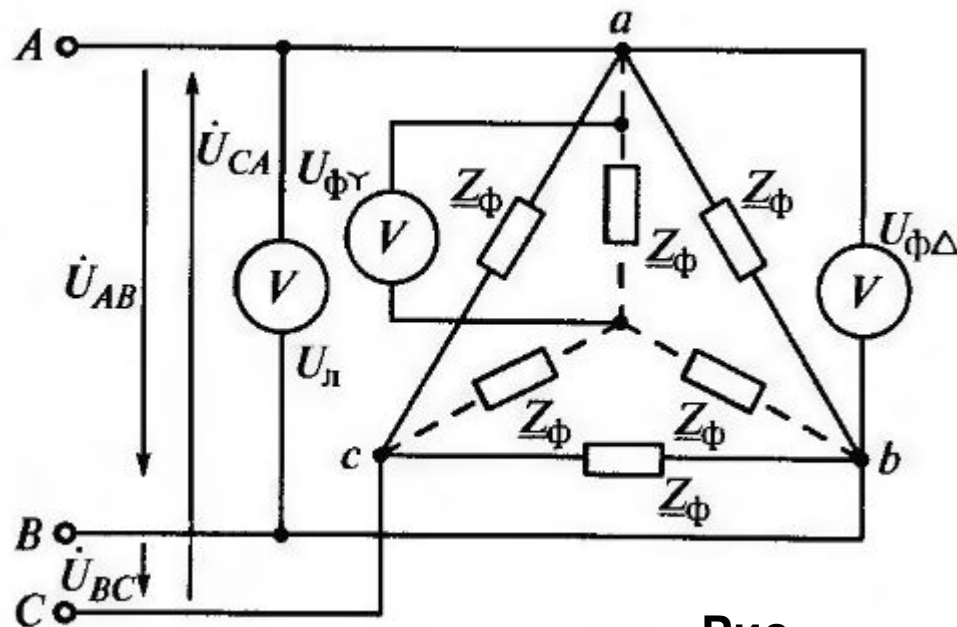


Рис.
1.64

Переключение фаз приемника используется, например, для уменьшения пусковых токов трехфазных асинхронных двигателей, изменения температуры нагрева трехфазных электрических печей

Классификация средств, видов и методов электрических измерений

Электрическим измерением называют нахождение значений параметров электрических величин опытным путем с помощью специальных средств. В средствах измерения различают:

- меры
- измерительные приборы
- измерительные преобразователи
- измерительные системы
- измерительно-вычислительные комплексы

Измерительные приборы предназначены для выработки измерительной информации о значениях измеряемой величины в форме, доступной для

оператора

- показывающие, которые допускают только считывание показаний отчетного устройства; сравнения, в которых измеряемая величина непосредственно сравнивается с мерой;
- регистрирующие. допускающие также регистрацию показаний на различных носителях в реальном масштабе времени;
 - аналоговые, показания которых являются непрерывной функцией значений измеряемой величины, и цифровые, в которых значения измеряемой величины через равные интервалы времени заменяются цифровыми кодами;
 - электромеханические на основе различного рода электромеханических измерительных механизмов и электронные, в которых такие механизмы отсутствуют или используются лишь в качестве отсчетных устройств;
 - стационарные (щитовые) и переносные — в зависимости от характера применения.

Классификация средств, видов и методов электрических измерений

Виды измерений.

По способу получения результата различают **прямые, косвенные и совместные измерения.**

- **При прямом измерении** значение измеряемой величины определяется показанием прибора, шкала которого проградуирована в соответствующих единицах.
- **При косвенном измерении** значение измеряемой величины рассчитывается по результатам прямых измерений других величин, с которыми она связана известными зависимостями.
Например, измерение значения сопротивления резистора в цепи постоянно-го тока по закону Ома $R = U/I$ на основе измерений тока I и напряжения U .
- **При совместном измерении** результат определяется прямыми и косвенными измерениями величин, от которых зависит значение измеряемой величины.
Например, измерение температурного коэффициента

Классификация средств, видов и методов электрических измерений

Методы измерений.

В зависимости от приемов использования средств измерения различают две группы методов измерений: **непосредственной оценки и сравнения с мерой.**

Методом непосредственной оценки значение измеряемой величины определяется непосредственным отсчетом по шкале предварительно проградуированного с помощью меры показывающего прибора.

Методом сравнения значение измеряемой величины сравнивается со значением одноименной величины, воспроизводимой мерой.

Различают нулевой и дифференциальный методы сравнения.

Первым методом значение меры регулируется до значения измеряемой величины, а равновесие фиксируется измерительным прибором высокой чувствительности.

Вторым методом значение измеряемой величины неполностью уравнивается значением меры, а разность их значений измеряется непосредственным отсчетом.

Методы сравнения и измерительные приборы на их основе обладают высокой точностью.

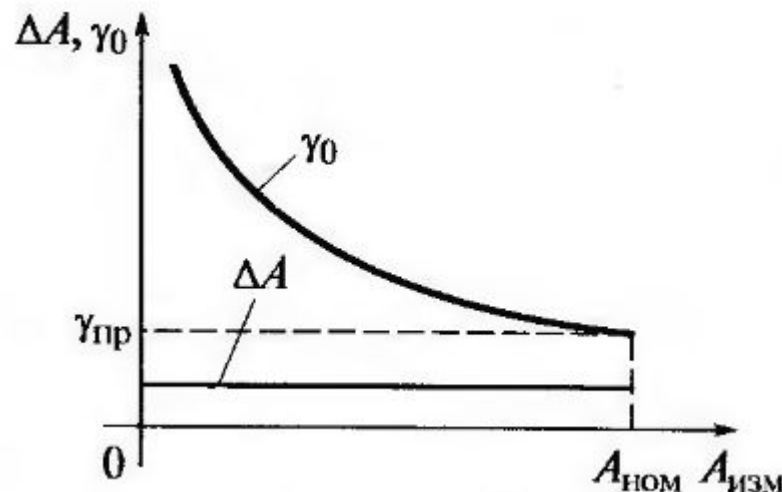
Погрешности измерения и классы точности

Измерение значения любой физической величины сопровождается погрешностью, т.е. расхождением ее измеренного и действительного значений. Различают погрешности **абсолютные, относительные и приведенные**.

$$\left. \begin{aligned} \Delta A &= A_{\text{изм}} - A; \\ \gamma_0 &= (\Delta A / A) 100 \%, \end{aligned} \right\} \quad (1.68)$$

$$\gamma_0 = (\Delta A / A_{\text{изм}}) 100 \% \quad (2.68)$$

$$\gamma_{\text{пр}} = (\Delta A / A_{\text{ном}}) 100 \% \quad (3.68)$$



Приведенная относительная погрешность, определенная в нормальных рабочих условиях и зависящая только от свойств самого прибора, называется **основной погрешностью**.

Измерительные приборы подразделяют на классы точности, обозначением которых служит допустимая основная погрешность: **0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4**. Класс точности указывают на лицевой панели прибора; он означает, что абсолютная погрешность прибора на всех делениях шкалы не превышает значения, определяемого классом точности.





Например, если амперметр класса точности 1 имеет шкалу с номинальным значением $A_{\text{ном}} =$

Погрешности измерения и классы точности

Отклонение внешних условий от нормальных вызывает дополнительные погрешности.

Величина $d\alpha/d A$, где α — деление на шкале показывающего прибора, называется его чувствительностью.

В табл. приведены некоторые условные обозначения на панели приборов, обозначающие их функциональные особенности и условия нормальной эксплуатации.

Наименование прибора	Условное обозначение
Прибор для измерения в трехфазной цепи с неравномерной нагрузкой фаз	
То же, с двухэлементным измерительным механизмом	
Защита от внешних магнитных полей, например 2 мТл	
Защита от внешних электрических полей, например 10 кВ/м	
Класс точности при нормировании погрешности в процентах диапазона измерения, например 1,5	1,5

Наименование прибора	Условное обозначение
То же, в процентах длины шкалы, например 1,5	
Горизонтальное положение шкалы	
Вертикальное положение шкалы	
Наклонное положение шкалы под определенным углом к горизонту, например $\pi/3$	
Направление ориентировки прибора в магнитном поле Земли	
Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например 2 кВ	
Прибор испытанию прочности изоляции не подлежит	
Осторожно! Прочность изоляции измерительной цепи по отношению к корпусу не соответствует нормам (знак выполняется красным цветом)	

Электромеханические аналоговые показывающие приборы

Магнитоэлектрическая система.




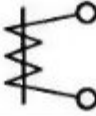
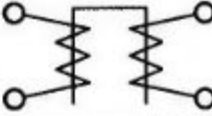






В измерительных механизмах магнитоэлектрической системы вращающий момент создается взаимодействием измеряемого постоянного тока в катушке механизма с магнитным полем постоянного магнита.

Электромагнитная система.

В измерительных механизмах электромагнитной системы вращающий момент обусловлен электромагнитным действием магнитного поля измеряемого тока в неподвижной катушке прибора на подвижный ферромагнитный якорь.

Электродинамическая система.

В измерительном механизме электродинамической системы для создания вращающегося момента используется взаимодействие двух катушек с измеряемым током.

Наименование системы прибора	Условное обозначение	
	Обычный измерительный механизм	Логометрический измерительный механизм
Магнитоэлектрический прибор с подвижной катушкой		
Магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом		
Электромагнитный прибор		
Электромагнитный поляризованный прибор		
Электродинамический прибор		
Индукционный прибор		
Электростатический прибор		

Лекция № 9

- **Трансформаторы. Основные определения**
- **Принцип действия однофазного трансформатора**
- **Режим холостого хода трансформатора**

Трансформаторы. Основные определения

Трансформатором называется статическое, т.е. без движущихся частей, электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования одних значений параметров переменных напряжений и тока в другие значения той же частоты.

Трансформатор имеет не менее двух электрически изолированных (за исключением автотрансформатора) обмоток с общим магнитным потоком.

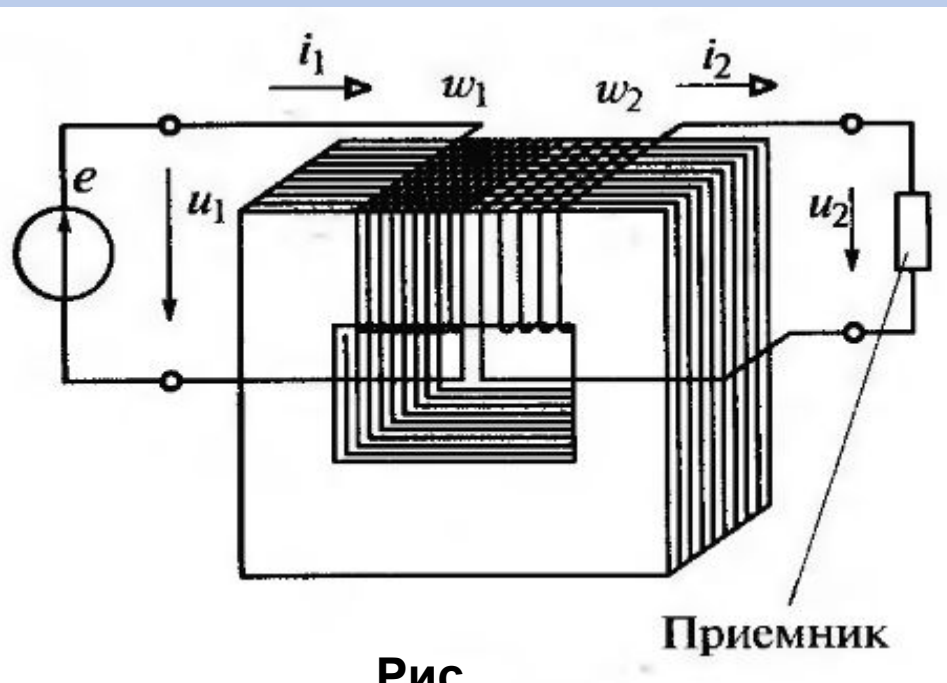


Рис.
1.72

Обмотка трансформатора, подключенная к источнику (приемнику) энергии, называется первичной (вторичной). Соответственно все величины, относящиеся к первичной (вторичной) обмотке, называются первичными (вторичными) и их буквенные обозначения имеют индекс 1 (2).

Трансформаторы

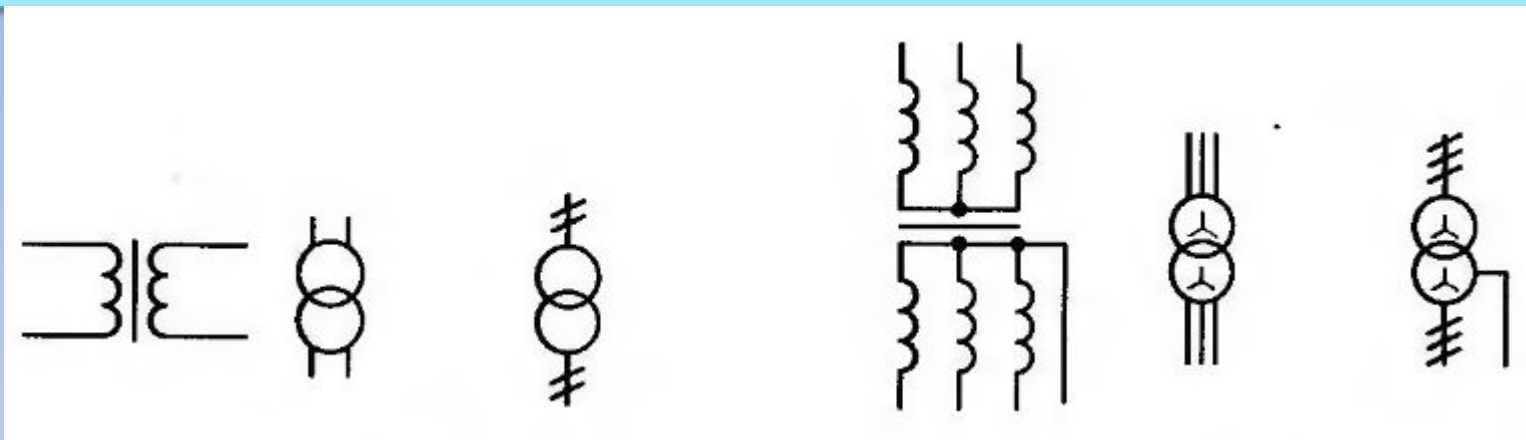


Рис.
1.73

Рис.
2.73

Различают однофазные (для цепей однофазного тока) и трехфазные (для трехфазных цепей) трансформаторы. У трехфазного трансформатора первичной или вторичной обмоткой называют соответственно совокупности трех фазных обмоток одного напряжения. На рис.1.73 показаны

Принцип действия однофазного трансформатора

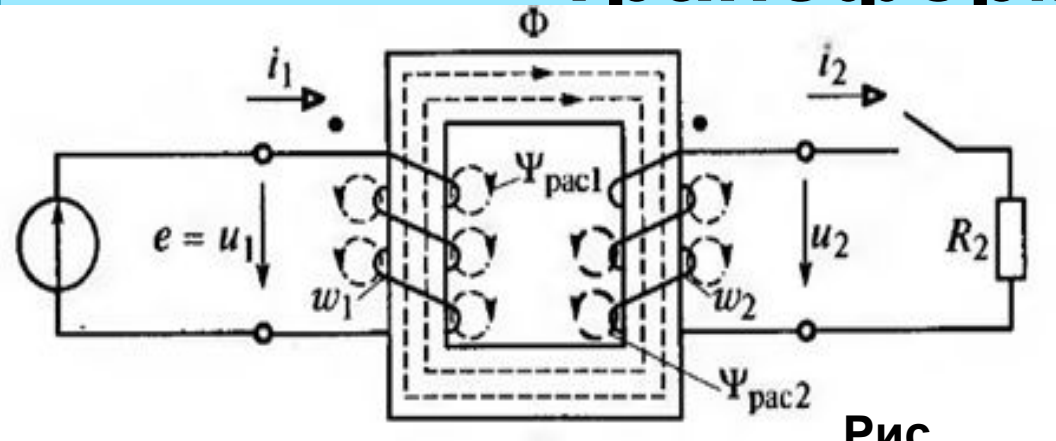


Рис.
1.74

Для указанных на рис. направлений намотки первичной и вторичной обмоток и выбранных положительных направлений токов i_1 и i_2 МДС, равная $i_2 w_2$, возбуждает в магнитопроводе поток, направленный навстречу магнитному потоку от действия МДС, равной $i_1 w_1$.

Предположим, что цепь вторичной обмотки трансформатора разомкнута и при действии источника напряжения $u_1 = e$ ток в первичной обмотке равен i_1 . Магнитодвижущая сила $i_1 w_1$ возбуждает в магнитопроводе магнитный поток, положительное направление которого определяется правилом буравчика. Этот магнитный поток индуцирует в первичной обмотке ЭДС самоиндукции и во вторичной обмотке — ЭДС взаимной индукции. После замыкания цепи вторичной обмотки под действием ЭДС взаимной индукции e_2 в приемнике с сопротивлением нагрузки

Принцип действия однофазного трансформатора

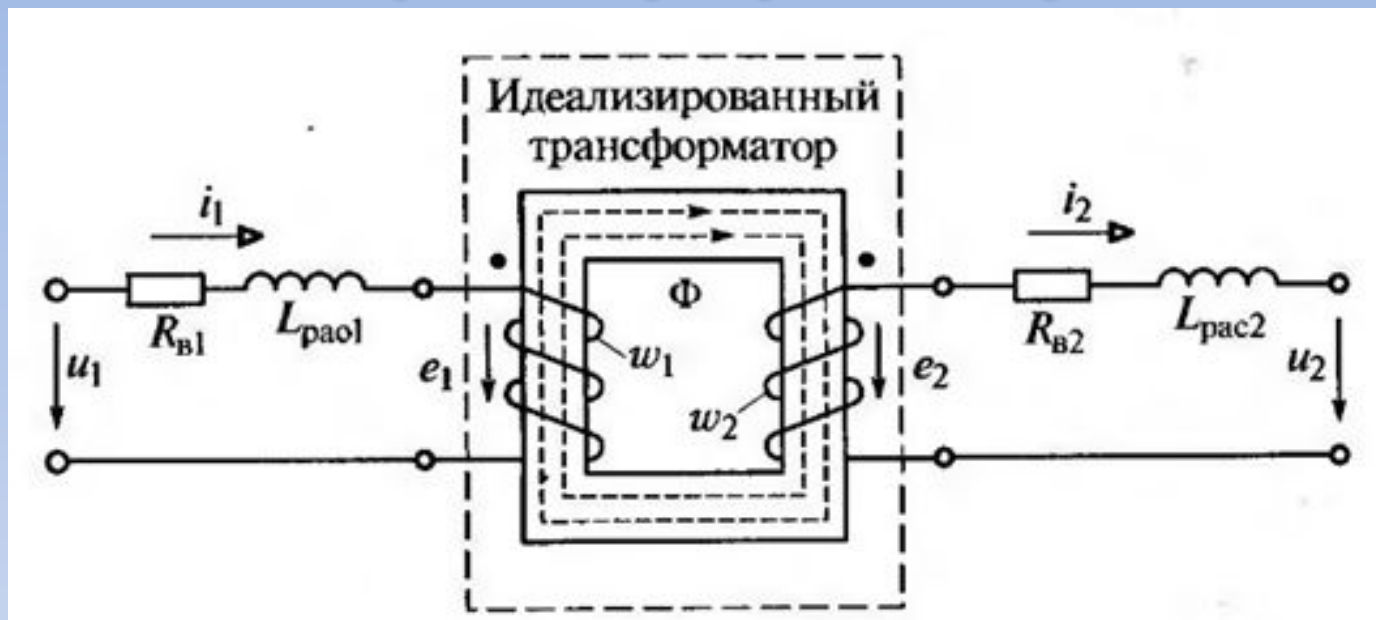


Рис.1.7
5

Трансформатор, первичная и вторичная обмотки которого не имеют активных сопротивлений и потокосцеплений рассеяния, называется идеализированным трансформатором. На рис. идеализированный трансформатор выделен штриховой линией. Положительные направления ЭДС e_1 и тока i_1 , в его первичной обмотке совпадают, как и у катушки, в которую превращается трансформатор при разомкнутой цепи вторичной обмотки. Так как ЭДС в первичной $e_1 = -w_1 d\Phi/dt$ и вторичной $e_2 = -w_2 d\Phi/dt$ обмотках трансформатора индуцируются одним и тем же магнитным потоком Φ в магнитопроводе, то положительные направления этих ЭДС относительно одноименных выводов обеих обмоток одинаковые.

Принцип действия однофазного трансформатора

Различают несколько режимов работы трансформатора, имеющего номинальную полную мощность $S_{ном} = S_{I_{ном}} = U_{I_{ном}} I_{I_{ном}}$

- номинальный режим, т.е. режим при номинальных значениях напряжения $U_1 = U_{I_{ном}}$ и тока $I_1 = I_{I_{ном}}$ первичной обмотки трансформатора;
- рабочий режим, при котором напряжение первичной обмотки близко к номинальному значению или равно ему: $U_1 = U_{ном}$, а ток I_1 меньше своего номинального значения $I_{ном}$ или равен ему и определяется нагрузкой трансформатора, т.е. током I_2 ;
- режим холостого хода, т.е. режим ненагруженного трансформатора, при котором цепь вторичной обмотки разомкнута ($I_2 = 0$) или подключена к приемнику с очень большим сопротивлением нагрузки (например, к вольтметру);
- режим короткого замыкания трансформатора, при котором его вторичная обмотка коротко замкнута ($U_2 = 0$) или подключена к приемнику с очень малым сопротивлением нагрузки (например, к амперметру).

Режимы холостого хода и короткого замыкания специально создаются при испытании трансформатора.

Режим холостого хода трансформатора

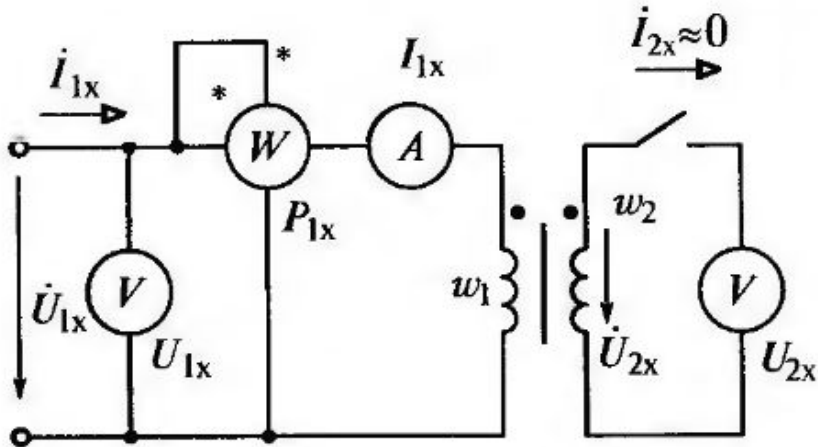


Рис.1.7

Опыт холостого хода называется испытание трансформатора при разомкнутой цепи вторичной обмотки и номинальном первичном напряжении $U_{1x} = U_{1 \text{ ном}}$. На основании этого опыта по показаниям измерительных приборов определяют коэффициент трансформации и мощность потерь в магнитопроводе трансформатора. Опыт холостого хода является

обязательным при заводском испытании трансформатора.

При номинальном первичном напряжении $U_{1x} = U_{\text{ном}}$ ток холостого хода I_{1x} составляет 2—8 % номинального первичного тока $I_{\text{ном}}$ (тем меньше, чем больше номинальная полная мощность трансформатора), т.е. $U_{1x} = E_{1x}$. Кроме того, при разомкнутой цепи вторичной обмотки $U_{2x} = E_{2x}$. Поэтому, измерив вольтметром первичное (U_{1x} и вторичное U_{2x} напряжения в режиме холостого хода, определяют коэффициент трансформации повышающего или понижающего трансформатора (соотношение (1.77))

$$\left. \begin{aligned} n_{21} &= \frac{w_2}{w_1} = \frac{E_{2x}}{E_{1x}} = \frac{U_{2x}}{U_{1x}} > 1; \\ n_{12} &= \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_{1x}}{E_{2x}} = \frac{U_{1x}}{U_{2x}} > 1. \end{aligned} \right\} (1.77)$$

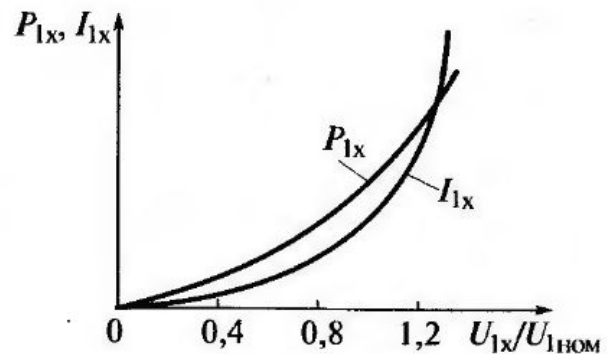


Рис.2.7

трансформатора

диаграмма)

Опыт холостого хода служит для определения мощности потерь в магнитопроводе трансформатора. Мощность потерь в трансформаторе при холостом ходе мала и составляет 0,3—1,4 % его номинальной полной мощности (тем меньше, чем больше номинальная полная мощность трансформатора). Тем не менее мощность потерь в магнитопроводе имеет важное практическое значение, так как силовые трансформаторы редко отключаются от первичной сети.

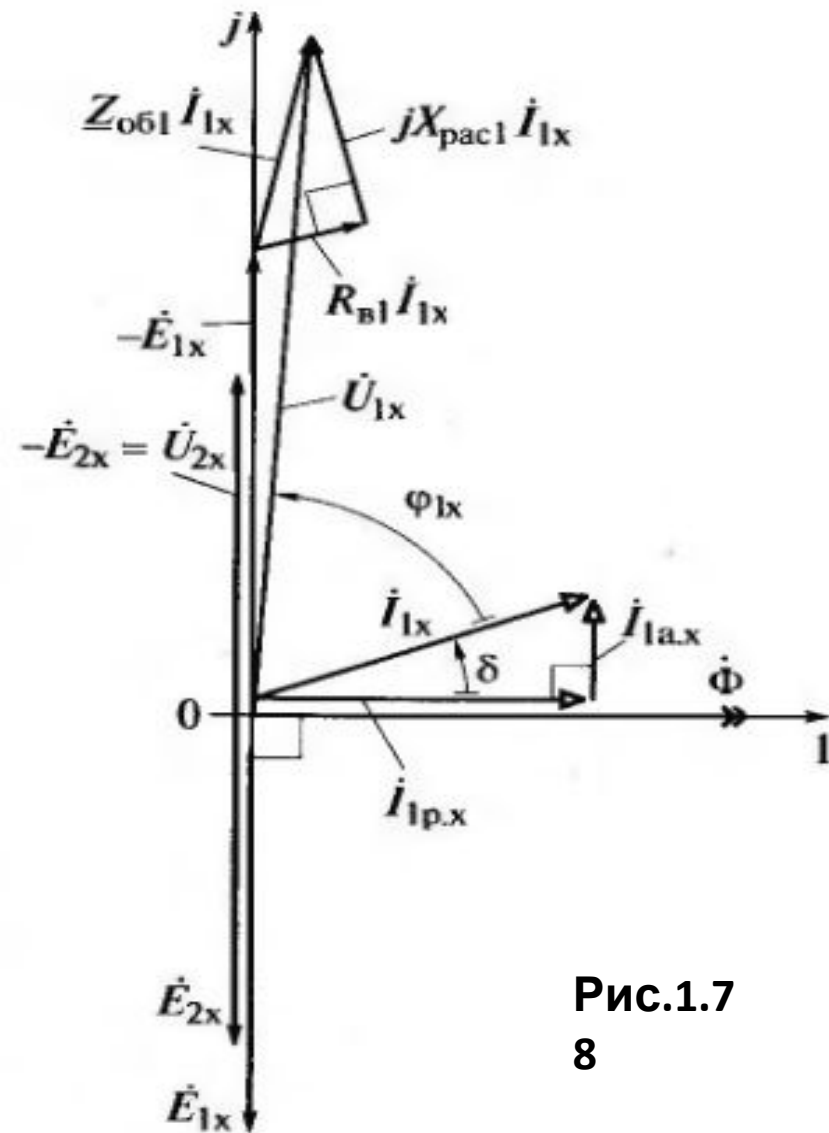


Рис.1.7

8

Лекция № 10

- **Режим короткого замыкания трансформатора**
- **Рабочий режим трансформатора**
- **Внешняя характеристика и КПД трансформатора**

Режим короткого замыкания трансформатора

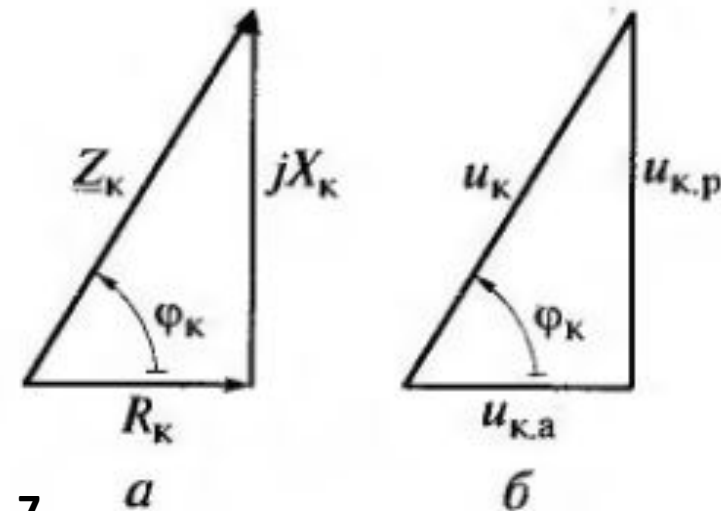
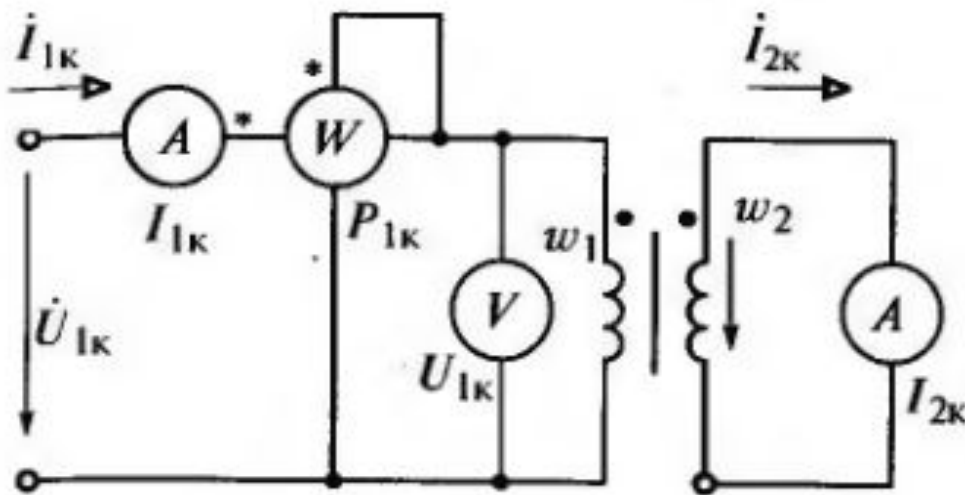


Рис.1.7

Опыт короткого замыкания называется испытание трансформатора при короткозамкнутой цепи вторичной обмотки и номинальном первичном токе $I_{1к} = I_{1ном}$. На основании этого опыта определяют мощность потерь в проводах обмоток и треугольник внутреннего падения напряжений. Опыт короткого замыкания, как и опыт холостого хода, обязателен при заводских испытаниях.

Режим короткого замыкания

трансформатора

Напряжение первичной обмотки в опыте короткого замыкания $U_{1к}$ при *токе* $I_{1к} = I_{1ном}$ составляет 5—10% его номинального значения $U_{1ном}$, а действующее значение ЭДС $E_{2к}$ 2—5 % его значения в рабочем режиме. Пропорционально значению ЭДС уменьшается магнитный поток в магнитопроводе, а вместе с ним намагничивающий ток и мощность потерь в магнитопроводе. Поэтому опыт короткого замыкания служит для определения мощности потерь в проводах первичной и вторичной обмоток.

$$P_{1к} = R_{в1} I_{1к}^2 + R_{в2} I_{2к}^2 \quad (1.80)$$

$$Z_{к} = U_{1к} / I_{1к} \quad (2.80)$$

$$R_{к} = P_{1к} / I_{1к}^2$$

$$X_{к} = \sqrt{Z_{к}^2 - R_{к}^2}$$

(3.80)

$$\left. \begin{aligned} n_{21} &= \frac{w_2}{w_1} \approx \frac{I_{1к}}{I_{2к}} > 1; \\ n_{12} &= \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{I_{2к}}{I_{1к}} > 1. \end{aligned} \right\}$$

(5.80)

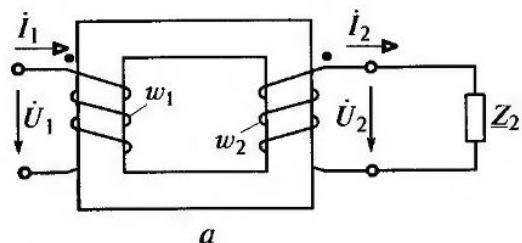
$$u_{к.а} = \frac{R_{к} I_{1ном}}{U_{1ном}} 100\%;$$

$$u_{к.р} = \frac{X_{к} I_{1ном}}{U_{1ном}} 100\%;$$

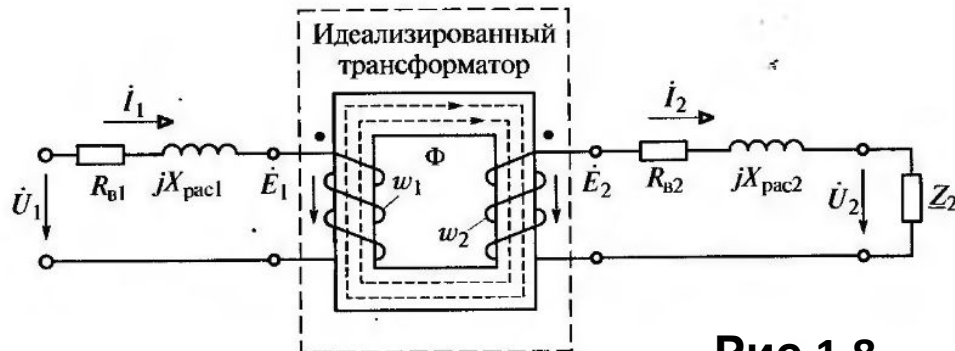
$$u_{к} = \frac{Z_{к} I_{1ном}}{U_{1ном}} 100\%.$$

(4.80)

Рабочий режим трансформатора



a



б

Рис.1.8
1

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \frac{\omega}{\sqrt{2}} w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m; \\ E_2 &= \frac{\omega}{\sqrt{2}} w_2 \Phi_m = 4,44 f w_2 \Phi_m. \end{aligned} \right\}$$

(6.81)

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_2 w_2 + \dot{I}_{1x} w_1 \quad (2.81)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}'_2 + \dot{I}_{1x} \quad (3.81)$$

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 w_2 / w_1 \quad (4.81)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + R_{b1} \dot{I}_1 + jX_{pac1} \dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + \underline{Z}_{o61} \dot{I}_1; \\ \dot{U}_2 &= -\dot{E}_2 - R_{b2} \dot{I}_2 - jX_{pac2} \dot{I}_2 = -\dot{E}_2 - \underline{Z}_{o62} \dot{I}_2, \end{aligned} \right\} \quad (5.81)$$

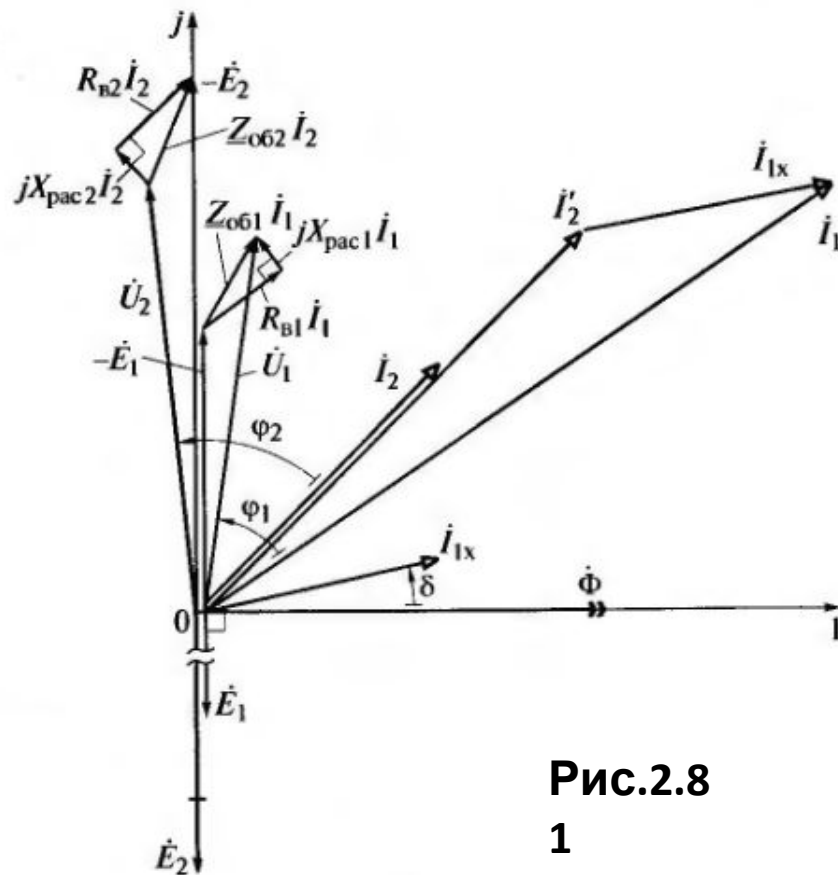


Рис.2.8
1

ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И КПД трансформатора

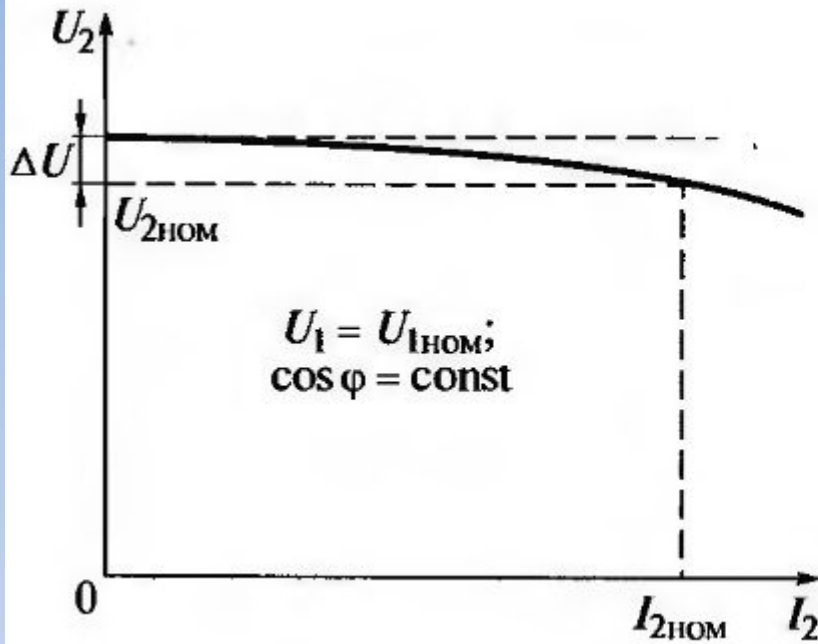


Рис.1.8
2

$$\eta = (P_2/P_1)100 \% \quad (1.82)$$

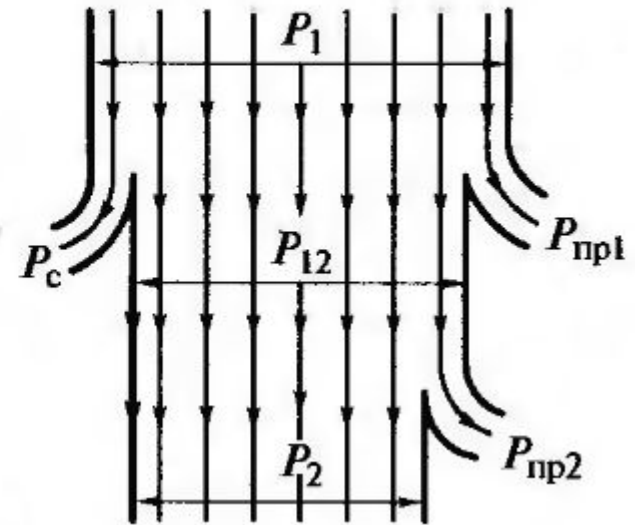


Рис.2.8
2

$$\eta = \left(\frac{P_1 - \Delta P}{P_1} \right) 100 \% = \left(1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P} \right) 100 \% \quad (2.82)$$

Лекция 11

- **Трехфазные трансформаторы**
- **Группы соединений обмоток**
- **Автотрансформаторы и многообмоточные трансформатор**

Трехфазные трансформаторы

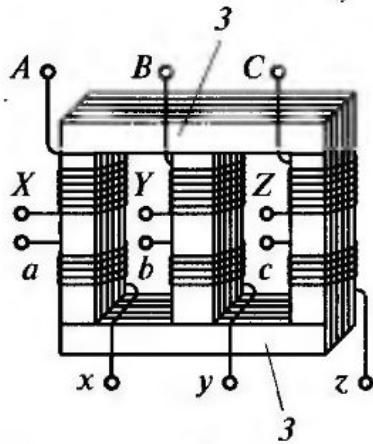
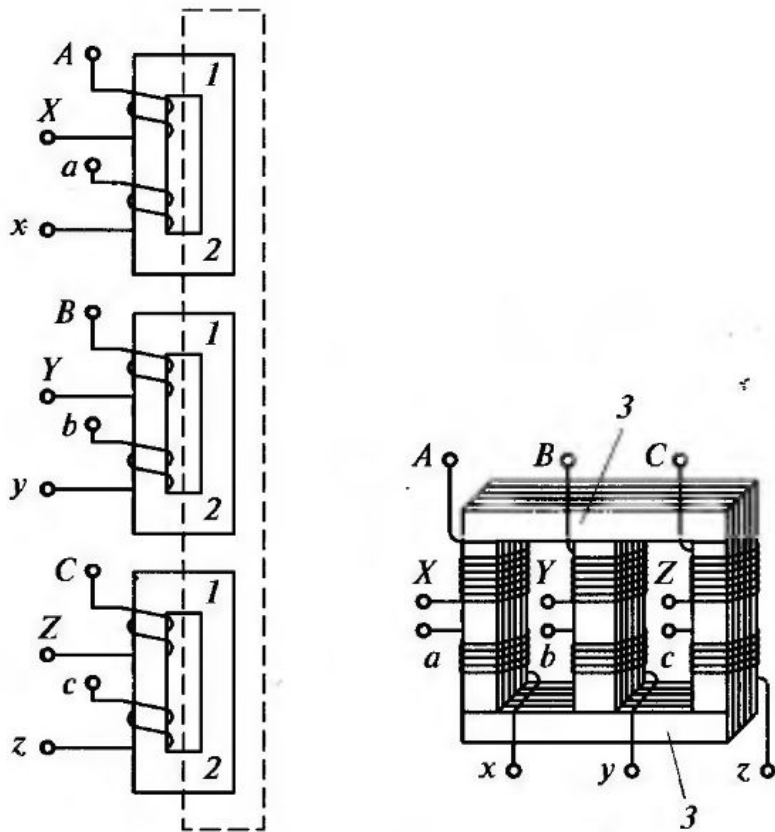


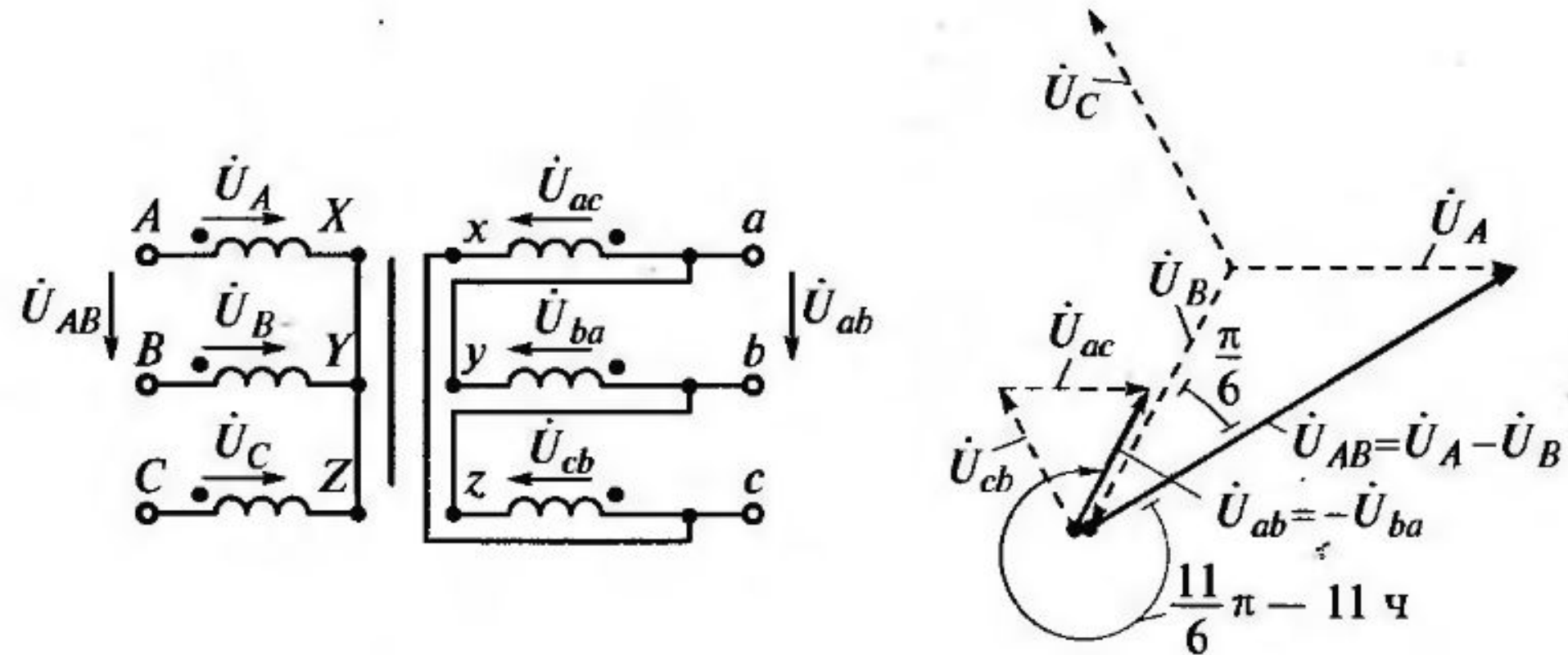
Рис.
1.84

Преобразование значений напряжения и тока в трехфазных возможно с помощью трех одинаковых однофазных трансформаторов на рис., где прописными буквами А, В, С (Х, У, Z) обозначены начала (концы) обмоток высшего напряжения, а одноименными строчными буквами — начала (концы) обмоток низшего напряжения. При симметричном режиме работы трехфазной цепи в любой момент времени суммы токов трех первичных и трех вторичных обмоток равны нулю. Поэтому возбуждаемая их совместным действием сумма магнитных потоков в трех магнитопроводах в любой момент времени также равна нулю.

Группы соединений обмоток трехфазного трансформатора

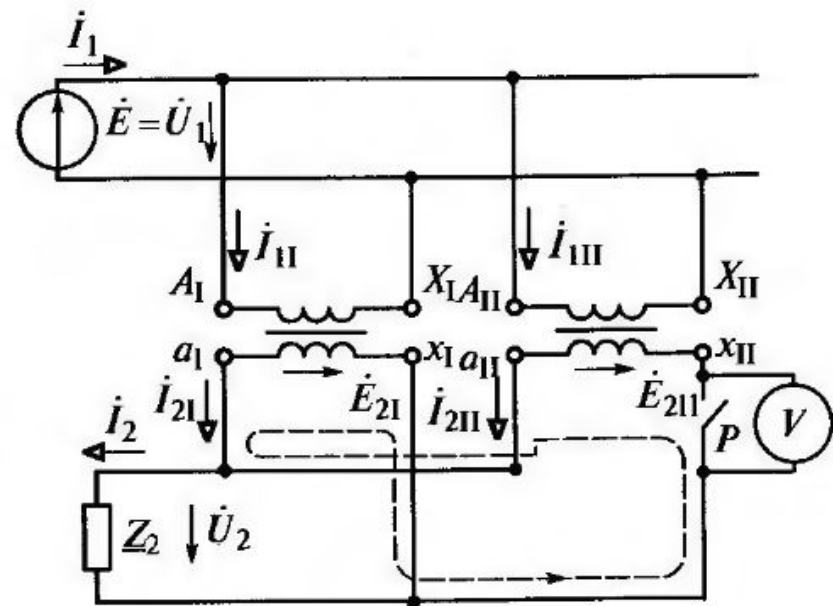
- От способа соединения обмоток высшего и низшего напряжений в трехфазном трансформаторе зависит угол сдвига фаз между его одноименными линейными высшим и низшим напряжениями, например, между линейными напряжениями U_{AB} и U_{ab} . По этому признаку трехфазные трансформаторы разделяют на группы. Обозначение группы соединения обмоток основано на сравнении векторной диаграммы линейных напряжений с положением минутной и часовой стрелок часов. Минутная стрелка (установлена на цифре 12) совмещается с вектором линейного высшего напряжения, например U_{AB} , а часовая стрелка — с вектором одноименного линейного низшего напряжения, например U_{ab} .

Группы соединений обмоток трехфазного трансформатора



На рис. представлены схема соединения обмоток трехфазного трансформатора Y/Δ-11 и соответствующая ей векторная диаграмма.

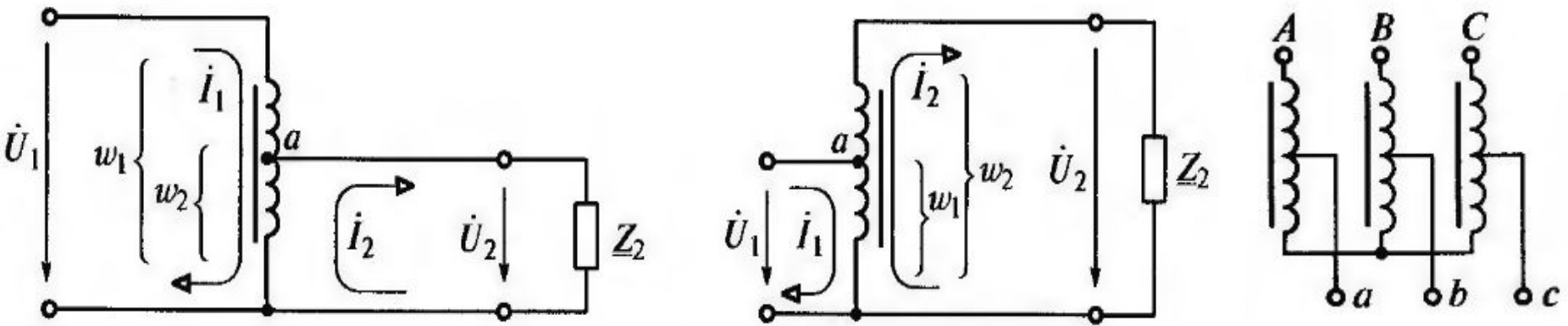
Параллельная работа трансформаторов



Параметры трансформаторов, включаемых на параллельную работу, должны удовлетворять трем условиям:

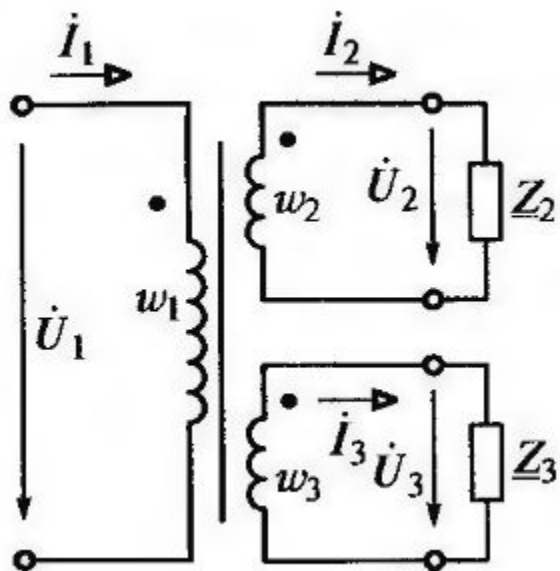
- 1) одинаковая группа соединений обмоток 0 для однофазных и 0 или 11 для трехфазных трансформаторов;
- 2) одинаковые номинальные значения первичных и вторичных напряжений при допустимой разнице значений коэффициентов трансформации не более $\pm 0,5 \%$;
- 3) одинаковые действующие значения напряжений короткого замыкания U_k при допустимой разнице не более $\pm 10 \%$

Автотрансформаторы



Автотрансформатор отличается от обычного трансформатора наличием одной обмотки высшего напряжения, часть которой является обмоткой низшего напряжения. Обмотка высшего напряжения автотрансформатора может быть первичной или вторичной.

Многообмоточные трансформаторы



$$I_1 w_1 = I_2 w_2 + I_3 w_3 + I_{1x} w_1 \quad (1.89)$$

$$U_2 = U_1 w_2 / w_1; \quad U_3 = U_1 w_3 / w_1 \quad (2.89)$$

Рис.

1.89

Многообмоточный трансформатор имеет одну первичную и несколько вторичных обмоток, расположенных на общем магнитопроводе. Такие трансформаторы имеют полную мощность до 1000 ВА и применяются в устройствах промышленной электроники для питания от одного источника нескольких изолированных друг от друга цепей.

Лекция 12

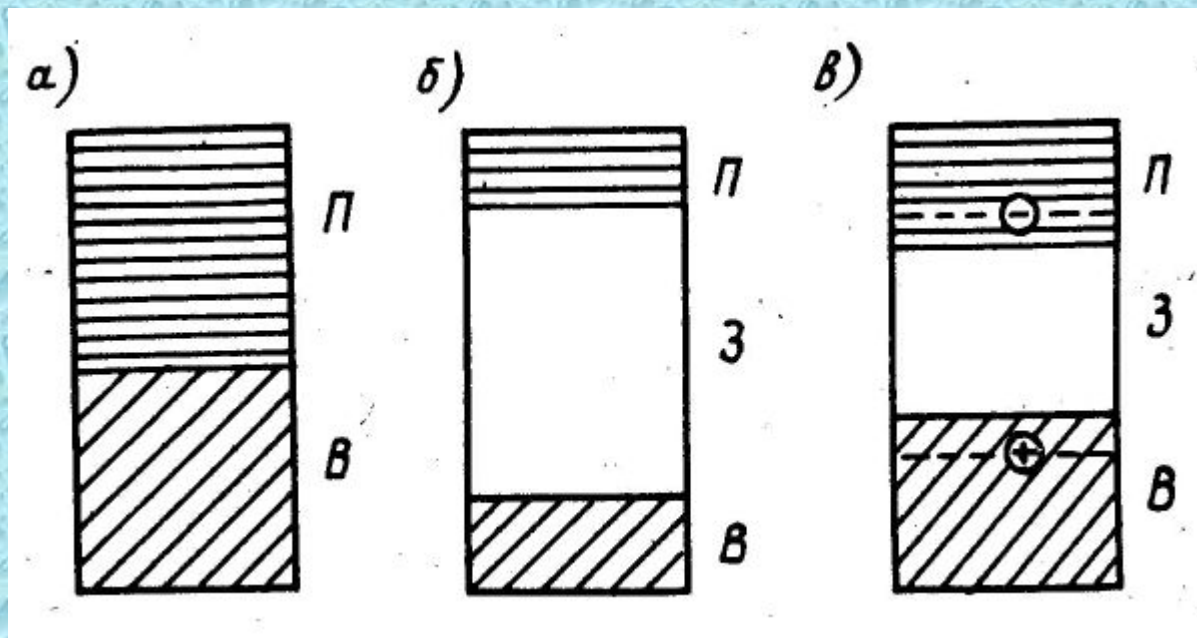
- **Электроника. Основные положения.**
- **Свойства полупроводников**
- **Электронно-дырочный переход**
- **Полупроводниковые диоды**
- **Вентильные(выпрямительные) диоды**

Основы электроники

Электроника — наука о взаимодействии заряженных частиц с электромагнитными полями и методах создания электронных приборов и устройств, работа которых основана на прохождении электрического тока в твердом теле, вакууме и газах.

Соответственно, электронные приборы называются полупроводниковыми, электронно-вакуумными и газоразрядными. В настоящее время электронно-вакуумные и газоразрядные приборы применяются только в специальных условиях.

Полупроводники и их свойства

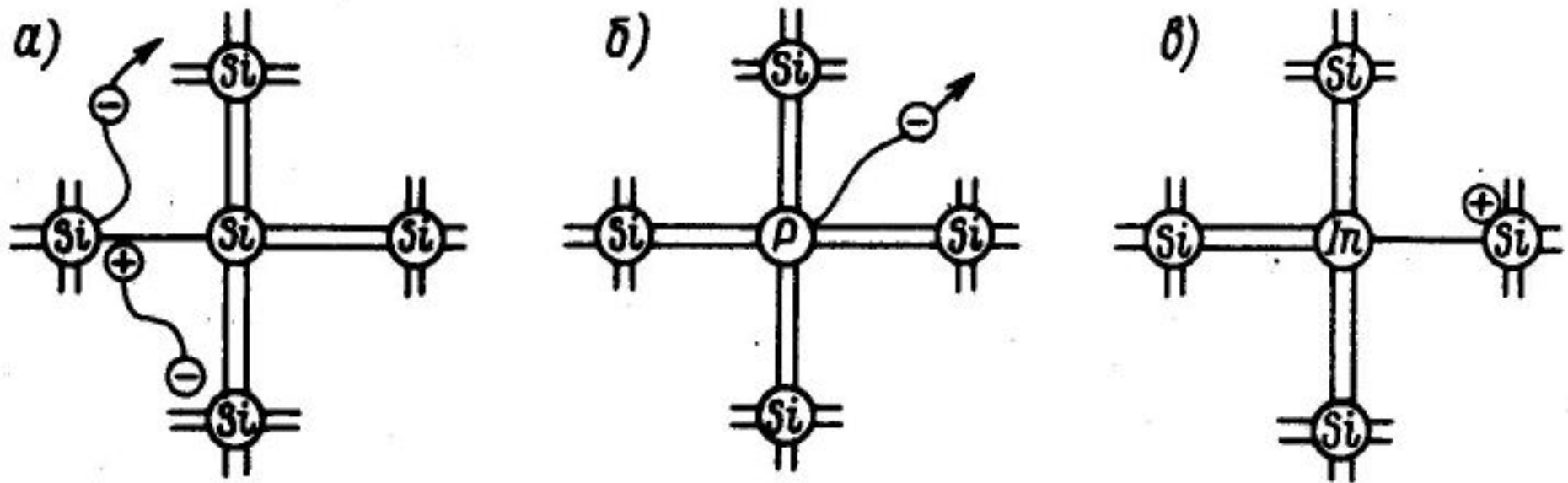


Полупроводниками (ПП) называются вещества, имеющие удельное электрическое сопротивление в пределах $10^{-10} - 10^4$ Ом * см и занимающие по этому показателю промежуточное положение между металлами и

Полупроводники и их свойства

- В настоящее время наиболее широкое распространение в полупроводниковой технике получили кремний, германий и некоторые другие кристаллические вещества, относящиеся к группе IV элементов таблицы Менделеева и имеющие по четыре валентных электрона. Кроме них некоторое распространение получили композиты, такие как арсенид и фосфид галлия (GaAs, GaP), антимонид индия (InSb), т. е. системы

Полупроводники и их свойства



$$p_i = n_i$$

$$n_n = P_n + N_d$$

$$P_p = n_p + N_a \approx N_a$$

Электронно-дырочный переход

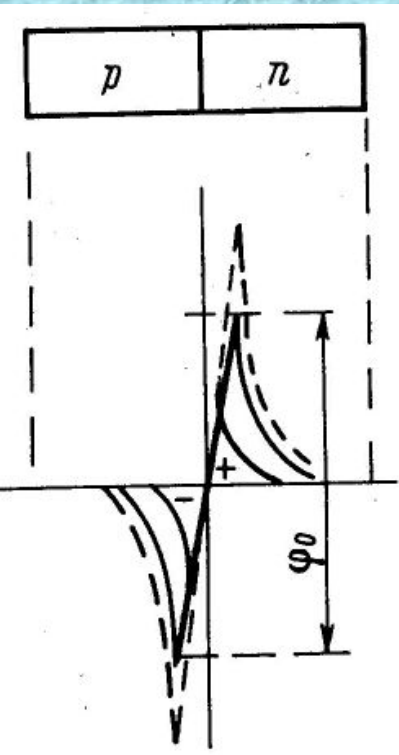


Рис.1.9

4

$$I_{\Sigma} = I_{\text{диф}} - I_{\text{др}} = I_{\text{диф}p} + I_{\text{диф}n} - I_{\text{др}p} - I_{\text{др}n} = 0 \quad (1.94)$$

(2.94)

$$I_a = I_s [\exp(U/\varphi_T) - 1]$$

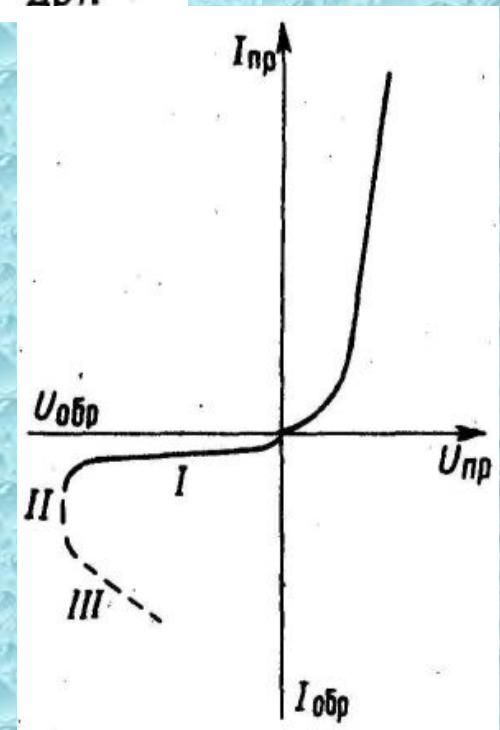


Рис.2.9

где I_s – ток насыщения (тепловой ток), создаваемый неосновными носителями заряда; U – напряжение; $\varphi_T = q/kT$ – температурный потенциал, равный при $T = 300 \text{ К}$ $0,026 \text{ В}$; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; q – заряд электрона.

Полупроводниковые диоды

Различают следующие разновидности полупроводниковых диодов:

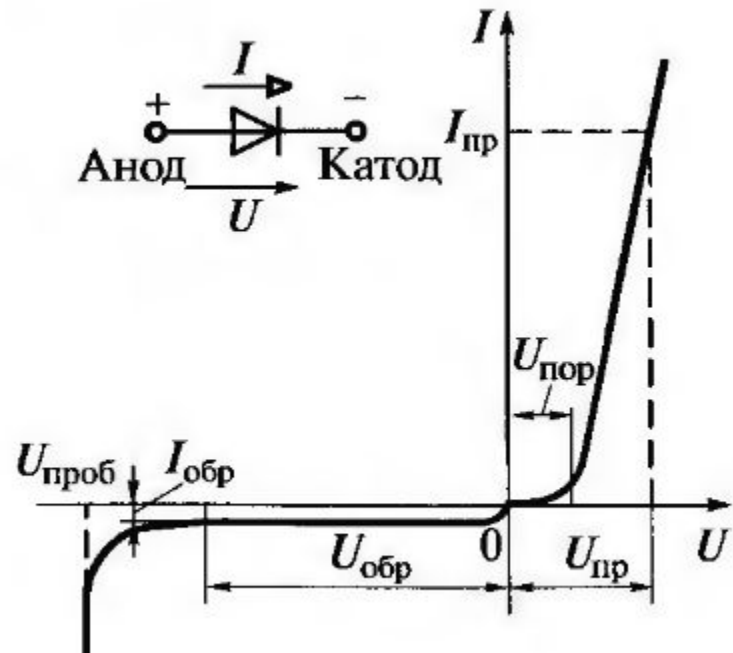
- вентиляльные;
- туннельные и обращенные;
- варикапы;
- кремниевые стабилитроны (диоды Зенера), стабисторы;
- фото-, магнито- и светоизлучающие диоды.

Вентильные диоды (ВД) предназначены для выпрямления переменного тока, т. е. являются основным элементом выпрямительных устройств.

Основными параметрами выпрямительных диодов, указываемых в справочниках, являются:

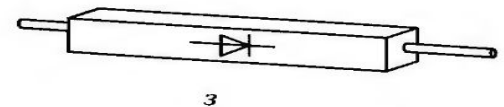
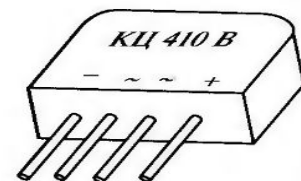
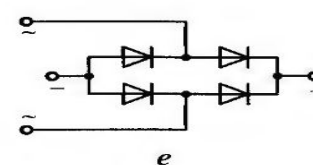
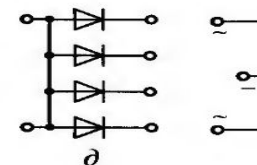
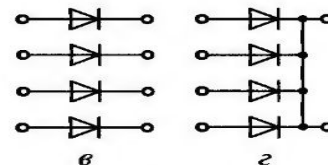
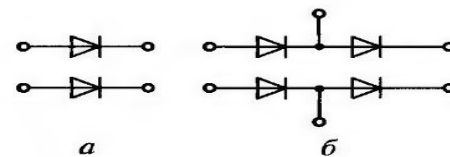
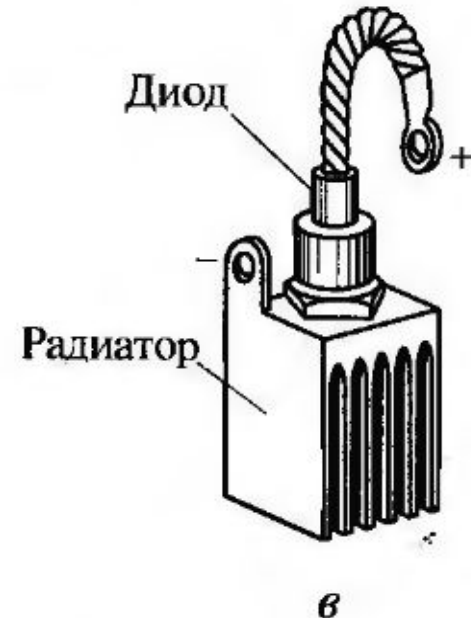
- $U_{пр}(\Delta U_{пр})$ – постоянное прямое напряжение диода;
- $U_{обр\ max}$ – максимально допустимое постоянное обратное напряжение;
- $I_{пр}$ – постоянный прямой ток диода;
- $I_{пр\ max}$ – максимально допустимый прямой ток диода;
- P_{max} – максимально допустимая рассеиваемая мощность диода;
- C_d – общая емкость диода.

Вентильные(выпрямительные) диоды



Электрические параметры некоторых типов выпрямительных диодов при 25 °С

Тип диода	$U_{обр\max}$, В	$I_{пр.ср\max}$, А	$I_{пр}$, А	$I_{обр}$, мА	Примечание
КД103А	75	9,1	0,05(1 В)	0,05(75 В)	Диод малой мощности $I_{пр} < 0,3$ А, рис. 13.6, а
КД210Б	800	10	10(1 В)	1,5(800 В)	Диод средней мощности $0,3 А < I_{пр} < 10$ А, рис. 13.6, б
5SDA 9P23	2 000	850	1 800(1,3 В)	—	Диод большой мощности $I_{пр} > 10$ А, рис. 13.6, в



Лекция 13

- Стабилитроны и стабисторы
- Биполярный транзистор
- Принцип работы биполярного транзистора
- Характеристики биполярного транзистора
- Униполярный транзистор
- Принцип работы полевых транзисторов
- Характеристики полевого транзистора
- JBT транзисторы
- Принцип работы и характеристики JBT транзистора

Стабилитроны и стабисторы

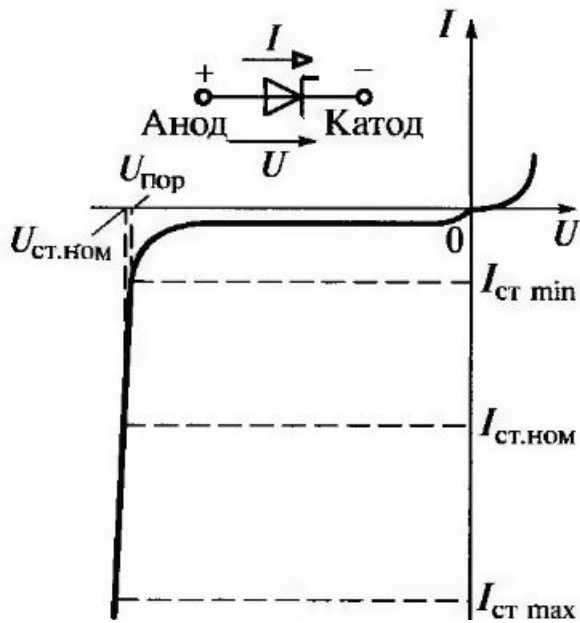
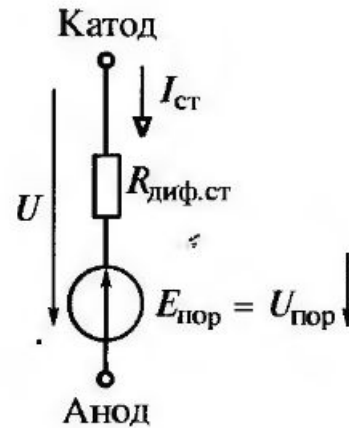


Рис.1.9
8



$$U = U_{\text{пор}} + R_{\text{диф.ст}} I_{\text{ст}} \quad (1.98)$$

$$\alpha_U = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{U_{\text{ст.ном}} \Delta \theta} 100 \text{ \%}/^\circ\text{C}, \quad (2.98)$$

Электрические параметры некоторых типов стабилитронов и стабисторов

Тип	$U_{\text{ст.ном}}, \text{ В}$	$I_{\text{ст}}, \text{ мА}$		$R_{\text{диф.ст}}$		$\alpha_U, \text{ \%}/^\circ\text{C}$	$P_{\text{пот.мах}}, \text{ Вт}$
		min	max	Ом	при $I_{\text{ст}}, \text{ мА}$		
2С107А	$0,7 \pm 0,07$	1	100	7	10	-0,3	0,300
2С119А	$1,9 \pm 0,1$	1	100	15	10	-0,4—0,5	0,300
2С133А	$3,3 \pm 0,3$	3	81	65	10	-0,11	0,300
2С175Ж	$7,5 \pm 0,4$	3	17	40	4	0,065	0,125
2С213Б	$13 \pm 0,65$	3	10	25	5	0,075	0,125
Д217Г	100 ± 10	5	50	82	50	0,18	5
Д815Ж	$18 \pm 1,8$	25	460	3	500	0,14	8

Биполярный транзистор

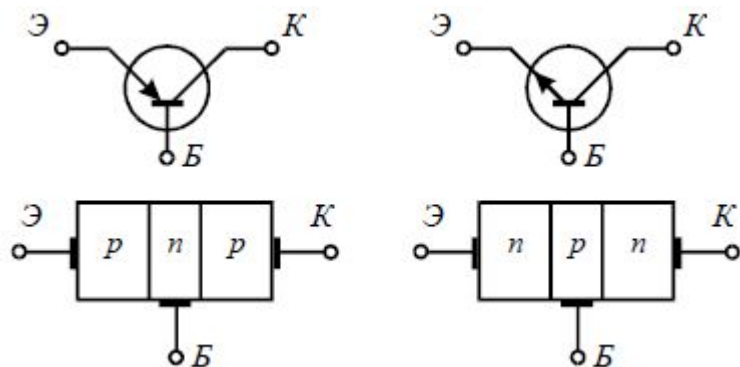


Рис.
1.99

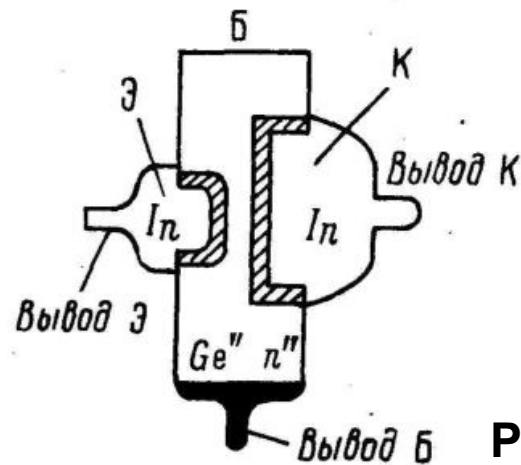


Рис.
2.99

$I_{к0}$ – обратный ток коллекторного перехода $I_{к} = I_{к0} + \alpha I_{э}$ (1.99)

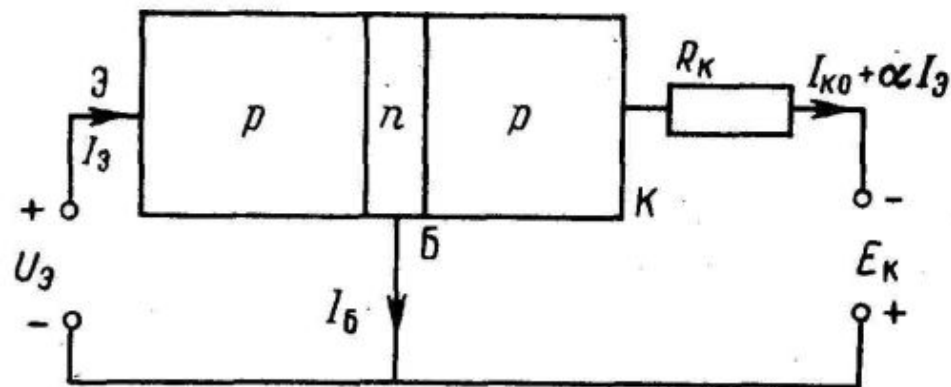


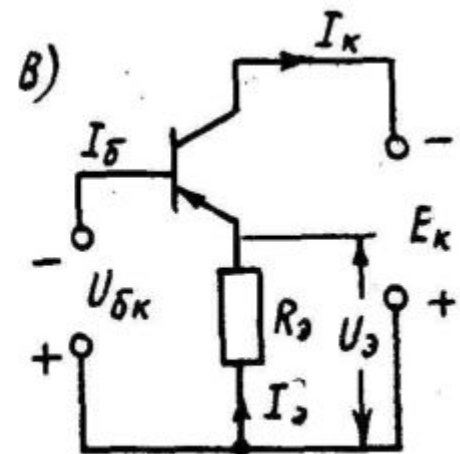
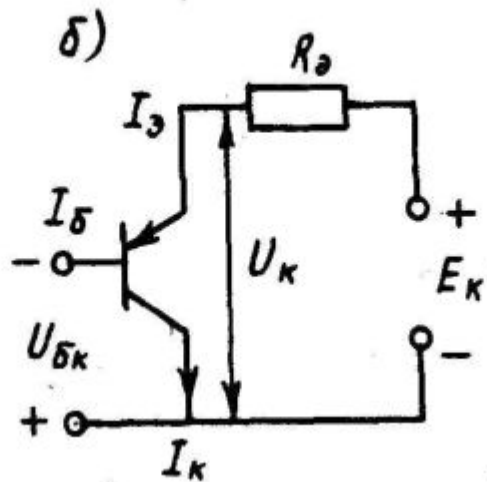
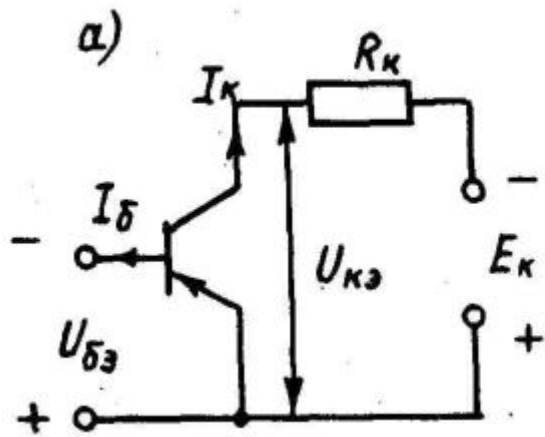
Рис.
3.99

$$I_{э} = I_{б} + I_{к} \quad (2.99)$$

Коэффициент передачи эмиттерного тока α – один из важнейших параметров транзистора. Поскольку не все дырки, а только большая их часть доходит до коллектора, то $\alpha < 1$. Для современных транзисторов коэффициент $\alpha = 0,9 - 0,999$ и зависит от температуры. Часть дырок рекомбинирует с электронами в области базы и создает ток базы

Биполярный транзистор

- ПТТ является прибором, управляемым током, т. е. для изменения тока в нагрузке необходимо изменить ток во входной цепи;
- ПТТ в схеме с ОБ не дает усиления по току, так как $\alpha < 1$. Однако поскольку $U_{бэ} \ll E_k$, то существует возможность усиления по напряжению;
- на параметры ПТТ могут существенно влиять изменения окружающей температуры, особенно на величину теплового тока.



Биполярный транзистор

$$k_i^{\beta} = \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta I_{\beta}} = \alpha \quad (1.101) \quad k_i^{\beta} = \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta I_{\beta}} = \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta I_{\beta} - \Delta I_{\kappa}} = \frac{\Delta I_{\kappa}/\Delta I_{\beta}}{1 - \Delta I_{\kappa}/\Delta I_{\beta}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = B \quad (2.101)$$

$$k_i^{\kappa} = \frac{\Delta I_{\beta}}{\Delta I_{\kappa}} = \frac{\Delta I_{\beta}}{\Delta I_{\beta} - \Delta I_{\kappa}} = \frac{1}{1 - \alpha} = B + 1 \quad (3.101) \quad R_{\text{вх}}^{\beta} = \Delta U_{\beta\beta} / \Delta I_{\beta} \quad (4.101)$$

$$R_{\text{вх}}^{\beta} = \frac{\Delta U_{\beta\beta}}{\Delta I_{\beta}} = \frac{\Delta U_{\beta\beta}}{\Delta I_{\beta} - \Delta I_{\kappa}} = \frac{\Delta U_{\beta\beta} / \Delta I_{\beta}}{1 - \Delta I_{\kappa} / \Delta I_{\beta}} = \frac{R_{\text{вх}}^{\beta}}{1 - \alpha} = R_{\text{вх}}^{\beta} (B + 1) \quad (5.101)$$

$$R_{\text{вх}}^{\kappa} = \frac{\Delta U_{\beta\kappa}}{\Delta I_{\kappa}} = \frac{\Delta U_{\beta\beta} + \Delta I_{\beta} \cdot R_{\text{н}}}{\Delta I_{\beta} (1 - \alpha)} = \frac{R_{\text{вх}}^{\beta} + R_{\text{н}}}{1 - \alpha} = (R_{\text{вх}}^{\beta} + R_{\text{н}}) (B + 1) \approx B \cdot R_{\text{н}} \quad (6.101)$$

$$R_{\text{вх}}^{\beta} < R_{\text{н}}, B \gg 1 \quad (7.101) \quad R_{\text{вх}}^{\beta} < R_{\text{вх}}^{\beta} < R_{\text{вх}}^{\kappa} \quad (8.101) \quad k_u = \frac{\Delta U_{\text{н}}}{\Delta U_{\text{вх}}} = \frac{\Delta I_{\text{н}} \cdot R_{\text{н}}}{\Delta I_{\text{вх}} \cdot R_{\text{вх}}} = k_i \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{вх}}} \quad (9.101)$$

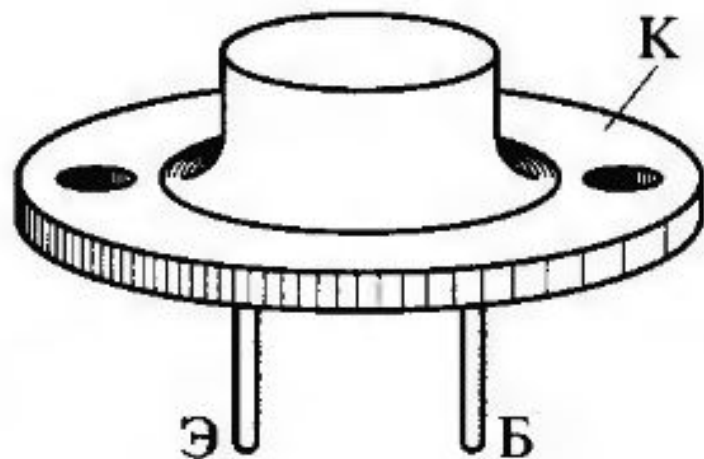
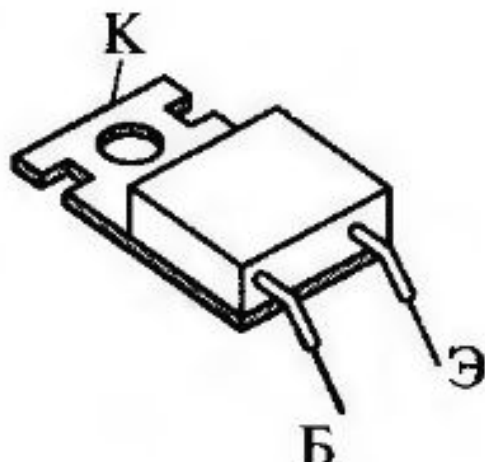
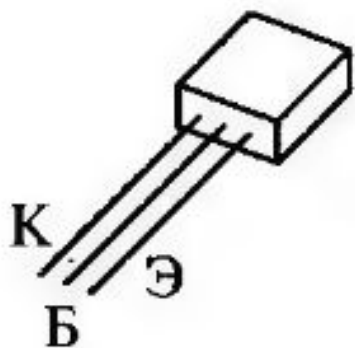
$$k_u^{\beta} = \alpha \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{вх}}^{\beta}} \quad k_u^{\beta} = B \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{вх}}^{\beta} (B + 1)} = \alpha \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{вх}}^{\beta}} \quad (11.101)$$

(10.101)

(12.101)

$$k_u^{\kappa} = \frac{1}{1 - \alpha} \cdot \frac{R_{\text{н}} (1 - \alpha)}{R_{\text{вх}}^{\beta} + R_{\text{н}}} = \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{н}} + R_{\text{вх}}^{\beta}} < 1$$

Биполярный транзистор



Электрические параметры некоторых типов биполярных транзисторов при 25 °С (по данным компании Моторола)

Тип транзистора	$U_{КЭ\max}$, В	$I_{К\max}$, А	$I_{Б\max}$, А	$P_{К\max}$, Вт	$U_{ЭБ\max}$, В	H_{21}^*	$I_{Котс}^*$, А	$U_{КЭнас}^*$, В
2N5877	60	10	4	150	5	20... 100	0,5	1
2N5884	80	25	7,5	200	5	200... 100	1	4
2N5655	250	0,5	0,25	20	6	30... 250	0,1	1
2N5686	80	50	15	300	5	15... 60	2	1

Характеристики биполярного транзистора

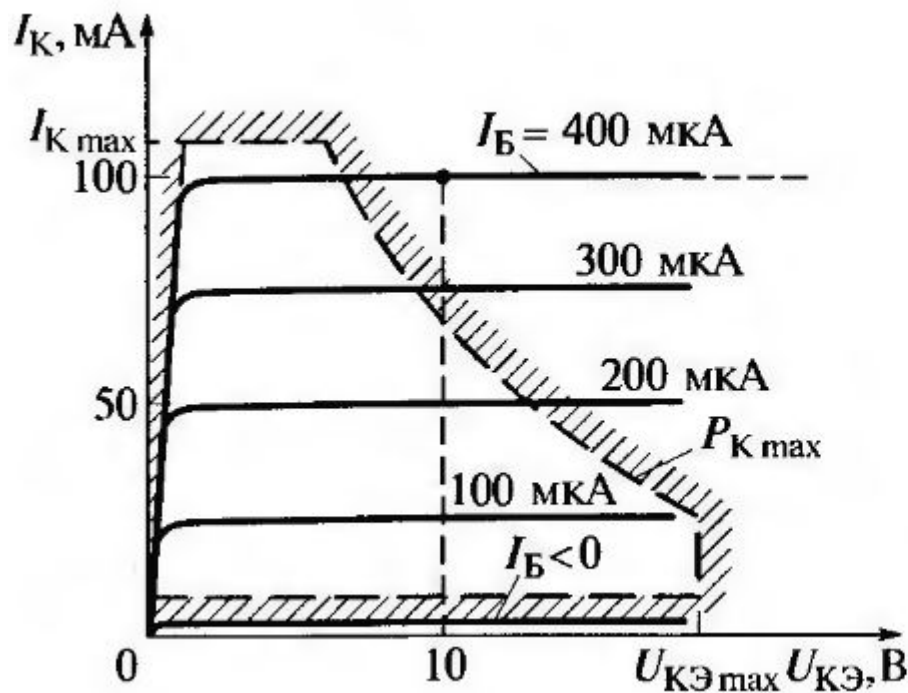


Рис.1.103 Выходная характеристика биполярного транзистора схема ОЭ

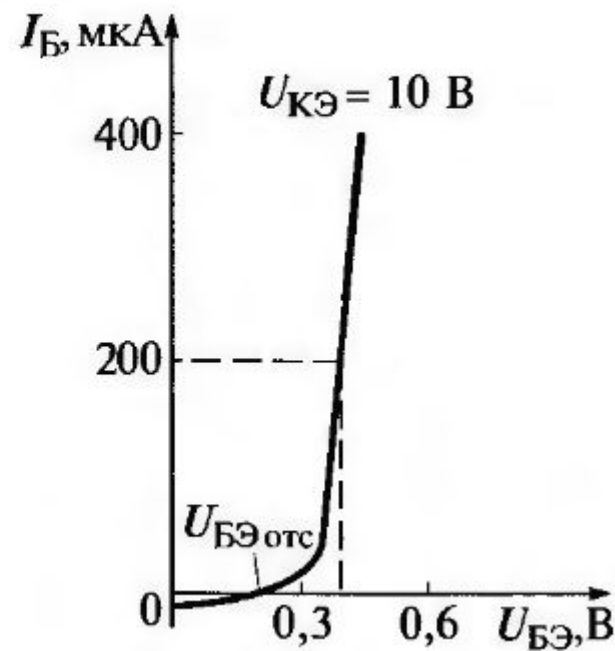


Рис.2.103 Входная характеристика биполярного транзистора схема ОЭ

Униполярный транзистор(принцип действия)

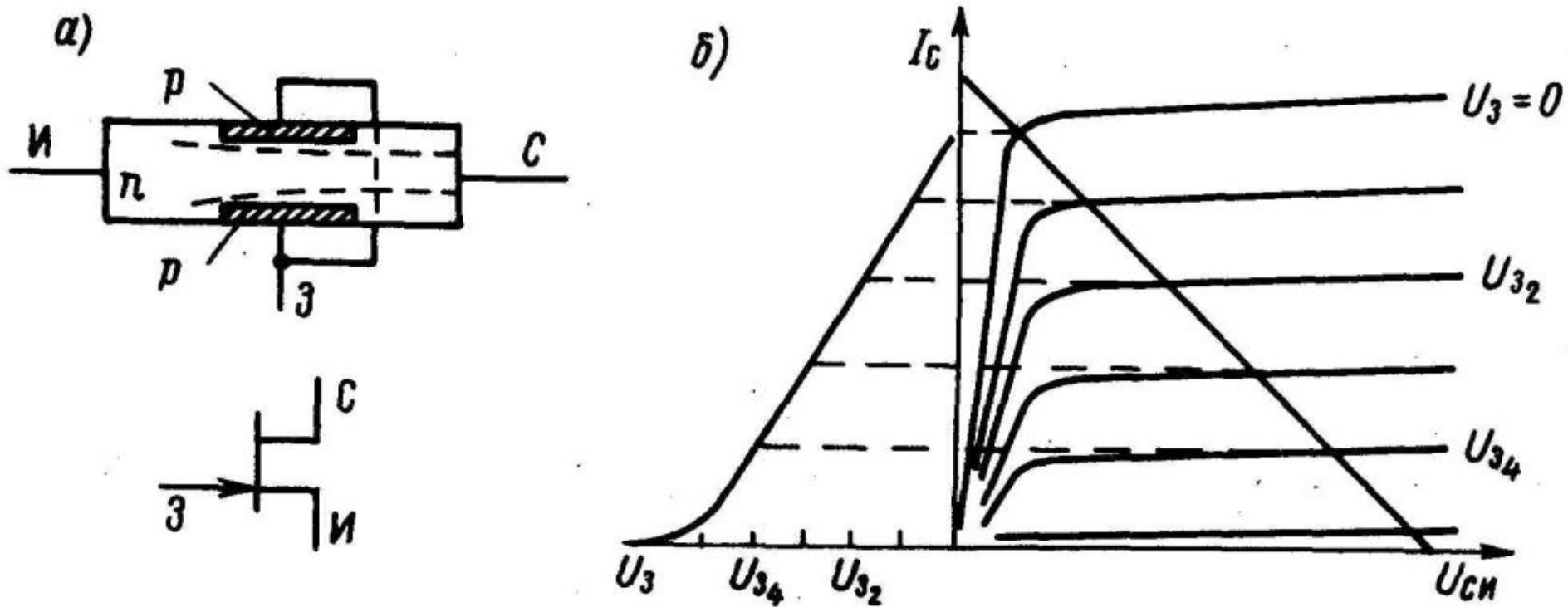


Рис. 1.104 Полевой транзистор с р-п -переходом: конструкция (а) и характеристики (б)

Униполярный транзистор

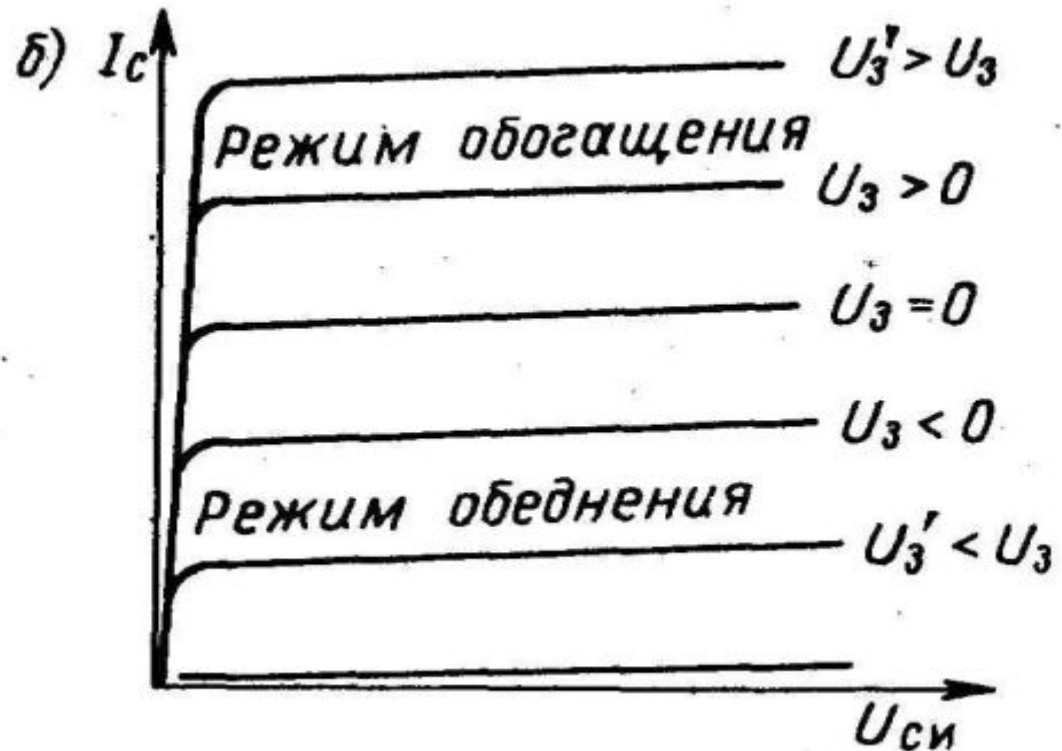
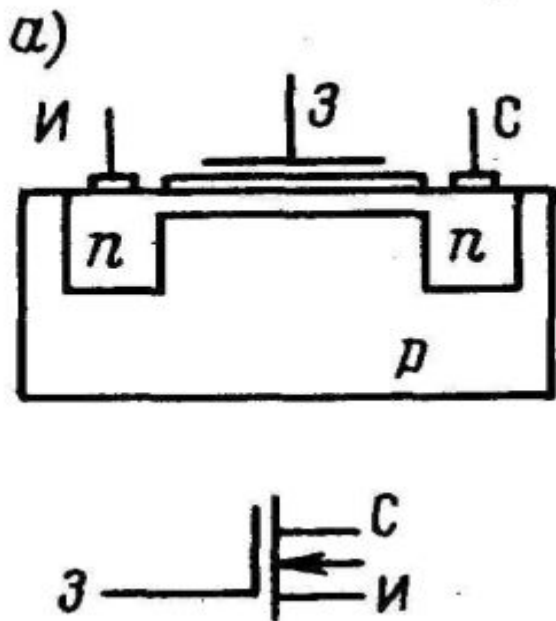


Рис. 1.105 Полевой транзистор с изолированным затвором и встроенным каналом п-типа; структура (а) и характеристики (б)

Униполярный транзистор

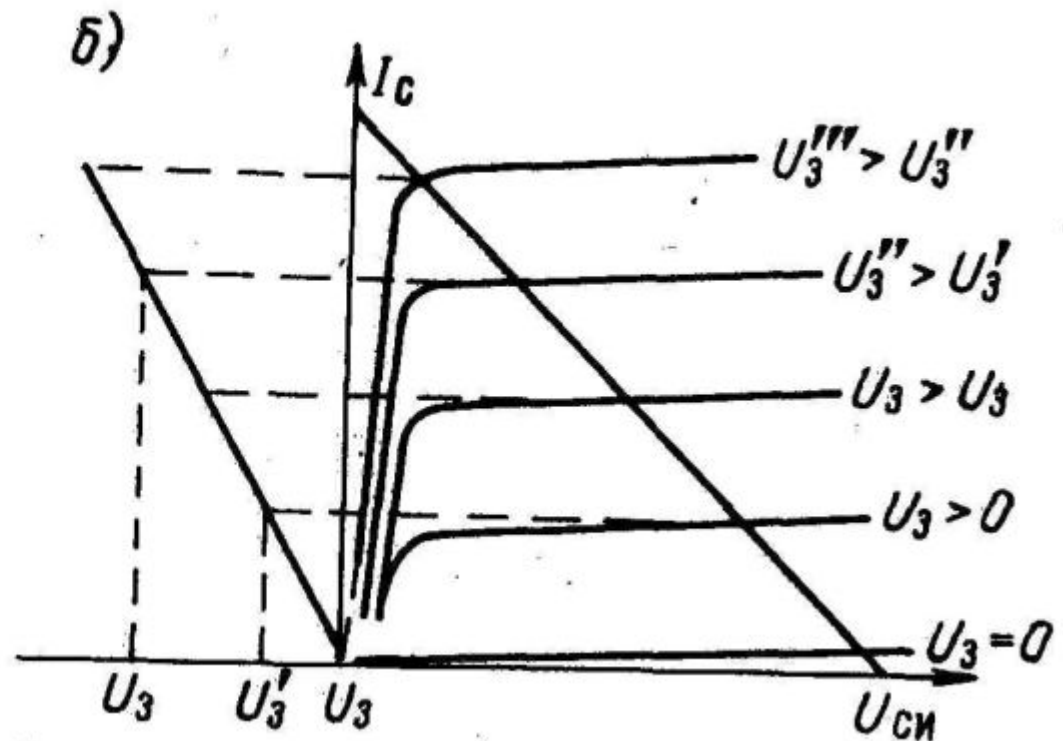
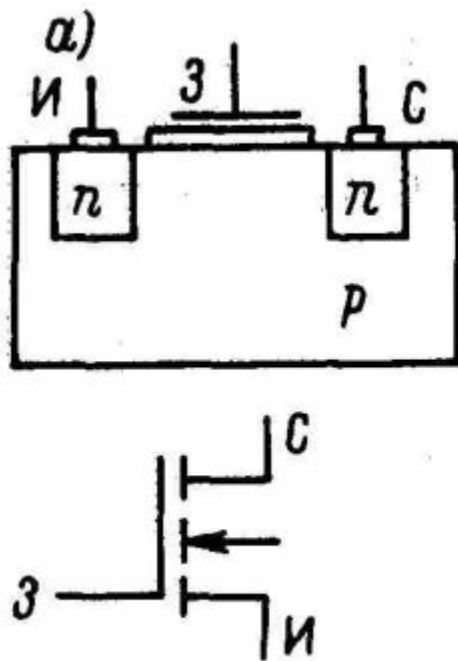
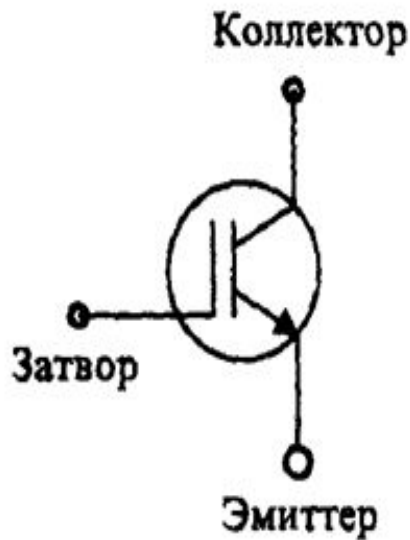


Рис. 1.106 Полевой транзистор с изолированным затвором и индуцированным каналом п-типа; структура (а) и характеристики (б)

Биполярный транзистор с изолированным затвором

а)



б)

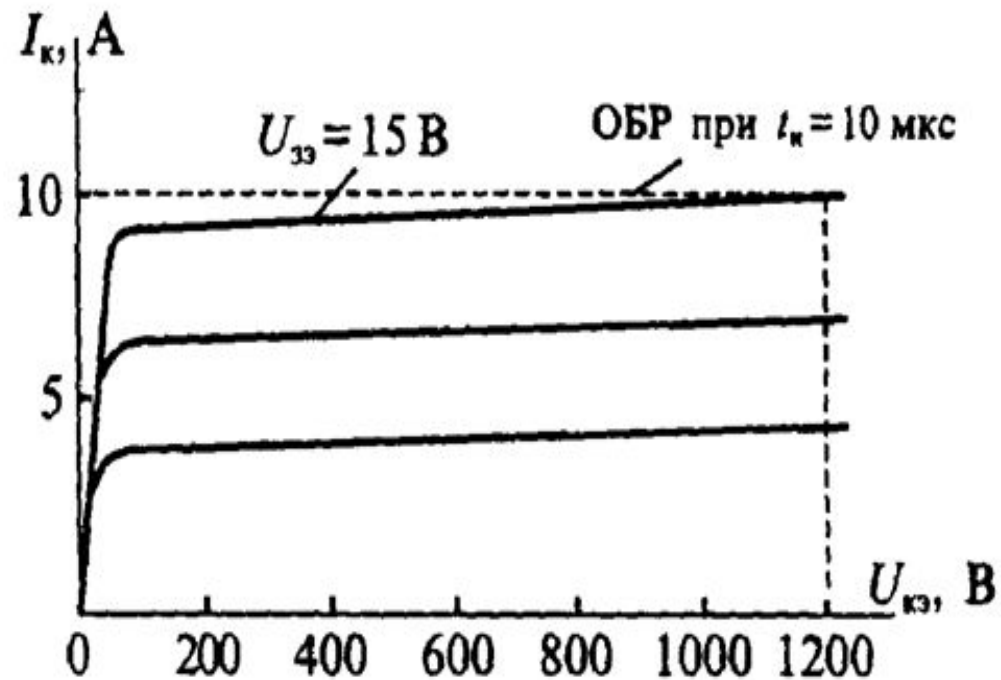


Рис. 1.107 Условное схематичное изображение транзистора БТИЗ (а) и его область безопасной работы (б)

Биполярный транзистор с изолированным затвором

Биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ) выполнены как сочетание входного униполярного (полевого) транзистора с изолированным затвором (ПТИЗ) и выходного биполярного n-p-p транзистора (БТ). Имеется много различных способов создания таких приборов, однако наибольшее распространение получили приборы JBT, в которых удачно сочетаются особенности полевых транзисторов с вертикальным каналом и дополнительного биполярного транзистора.

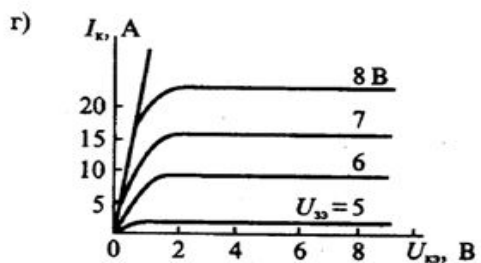
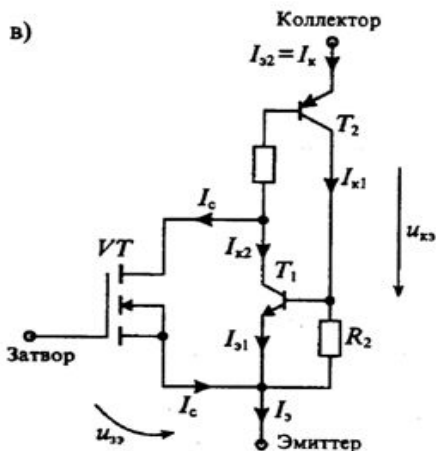
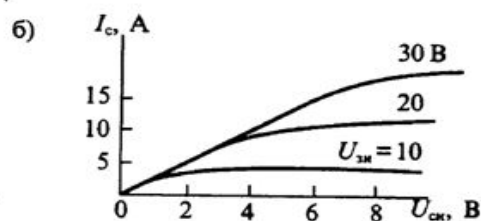
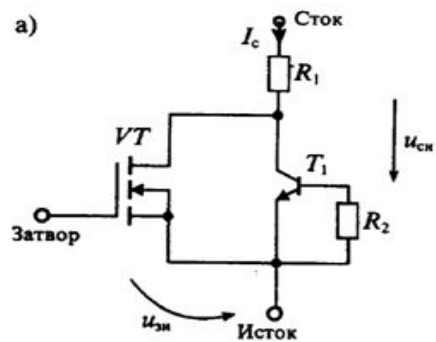


Рис. 1.108 Схема замещения ПТИЗ с вертикальным каналом (а) и его вольтамперные характеристики (б), схема замещения транзистора типа IGBT (в) и его вольтамперные

Лекция 15

- Динисторы, тиристоры, семисторы
- Пассивные элементы электроники

Динисторы, тиристоры, семисторы

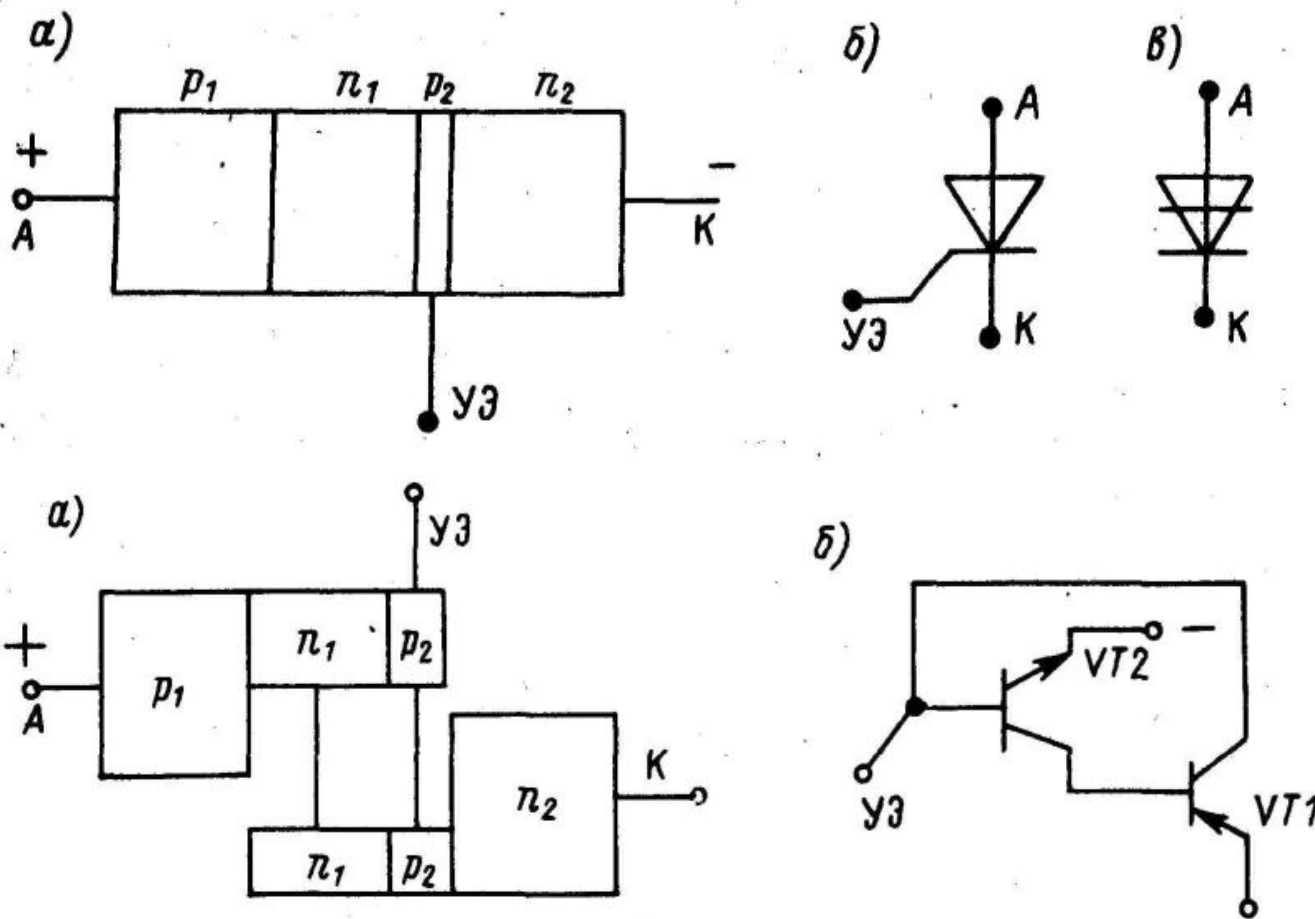


Рис. 1.110 а) уловное изображение четырехслойной полупроводниковой структуры

б) схемотехническое обозначение тиристора

в) схемотехническое обозначение динистора

$$I_2 = I_{обр} + \alpha_1 I_{э1} + \alpha_2 I_{э2} \quad (1.110) \quad I_{э1} = I_{э2} = I \quad (2.110)$$

Рис. 2.110. Представление тиристора в виде двух усилителей транзисторов разного типа (а и б)

$$(3.110)$$

$$I_2 = \frac{I_{обр}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} = I$$

Динисторы, тиристоры, семисторы

Рис. 1.111. ВАХ динистора при различных температурах

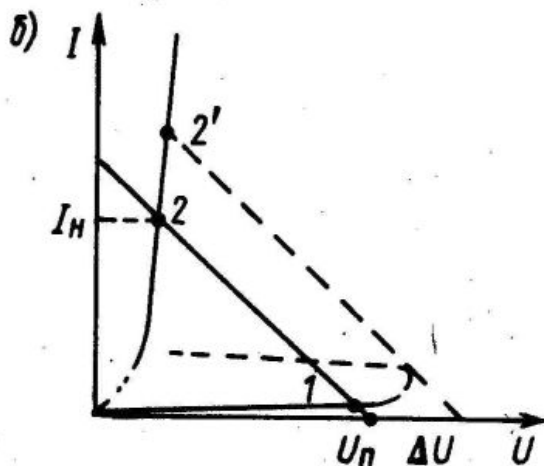
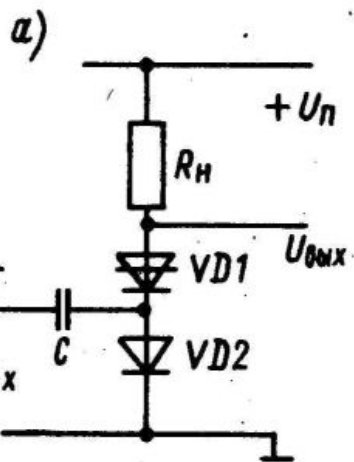
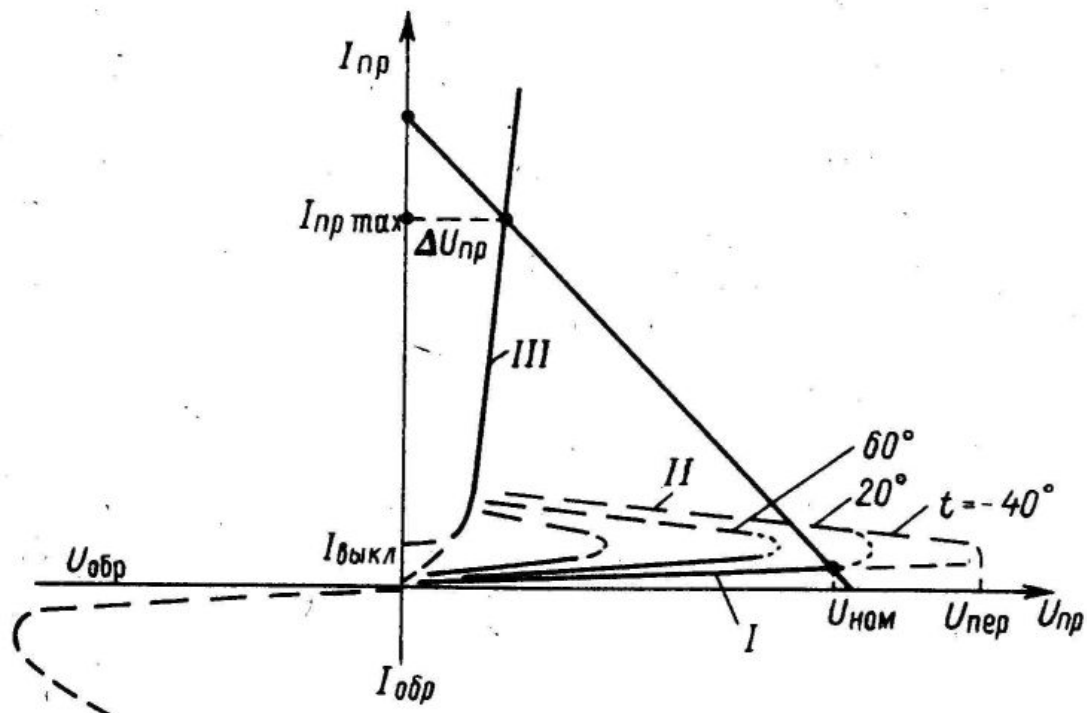


Рис. 2.111. Схема переключения динистора (а) и графическое изображение этого процесса (б)

Динисторы, тиристоры, семисторы

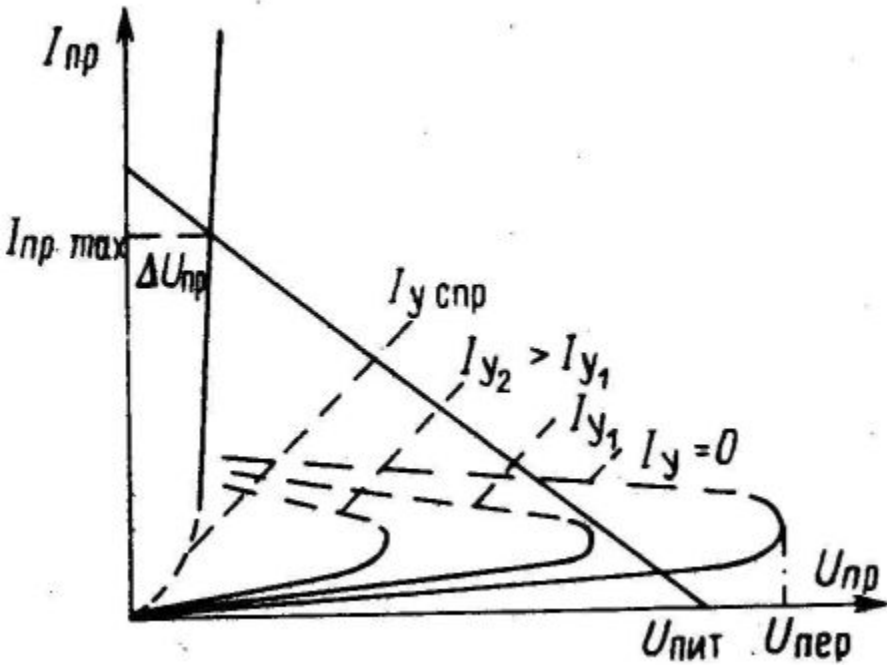


Рис. 1.112. ВАХ тиристора при различных токах управления

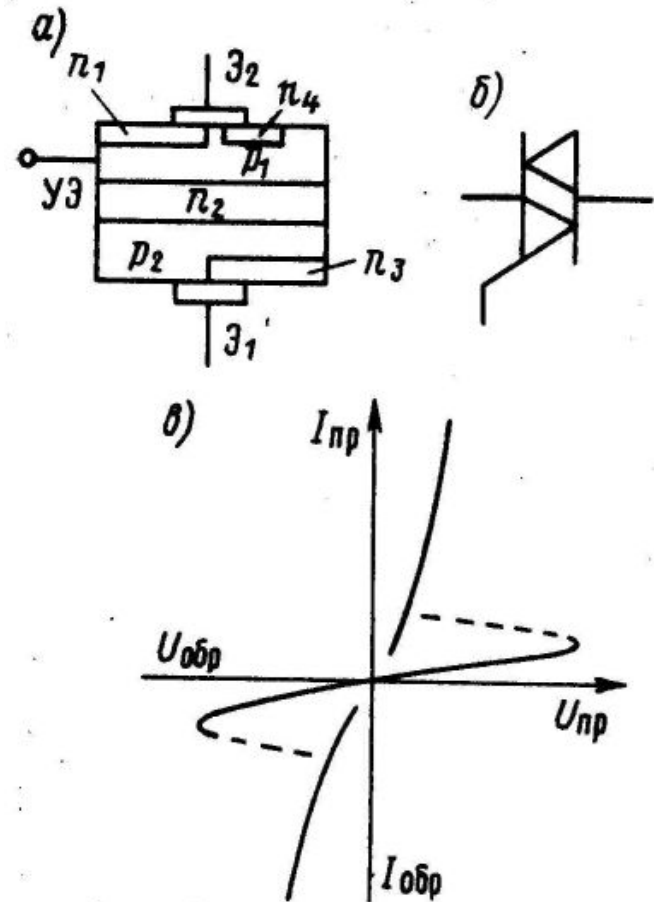


Рис. 2.112. Структура (а), условное обозначение (б) и характеристика (в) симметричного тиристора

Пассивные элементы электроники

Постоянные и переменные резисторы

- **Постоянным** называется резистор, сопротивление которого изменить при эксплуатации невозможно.
- **Переменные**, или регулируемые, резисторы (потенциометры) позволяют это делать.
- Если процесс изменения сопротивления осуществляется только в период наладки или настройки аппаратуры и далее его значение не меняется, то такое сопротивление называется **подстроечным**.

Основным параметром любого резистора является его номинальное сопротивление, измеряемое между крайними выводами при $t = 20 \pm 1$ °С.

Величина резистора стандартного номинала E24 не превышает $\pm 5\%$ и фактически диапазон между смежными номиналами полностью перекрывается этой погрешностью.

Таким образом, любой резистор этого ряда может иметь сопротивление, равное $(1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1) \times 10^p$, где $p > 1$.

Пассивные элементы электроники

- *Постоянные и переменные конденсаторы*

В зависимости от применяемого диэлектрика все конденсаторы делятся на пленочные, слюдяные, керамические (в основном малой емкости - до 10 000 пФ), бумажные и металлобумажные (от 470 пФ до 30 мкФ) и электролитические, последние значительно превосходят все первые типы по массогабаритным показателям, могут работать только при одной полярности приложенного напряжения (постоянном или пульсирующем), их емкость доходит до 47 000 мкФ.

Лекция 16

- Силовые преобразователи.
Классификация
- Выпрямители, основные схемные реализации
- Фильтры для снижения влияния гармонических искажений

Силовые преобразователи. Классификация

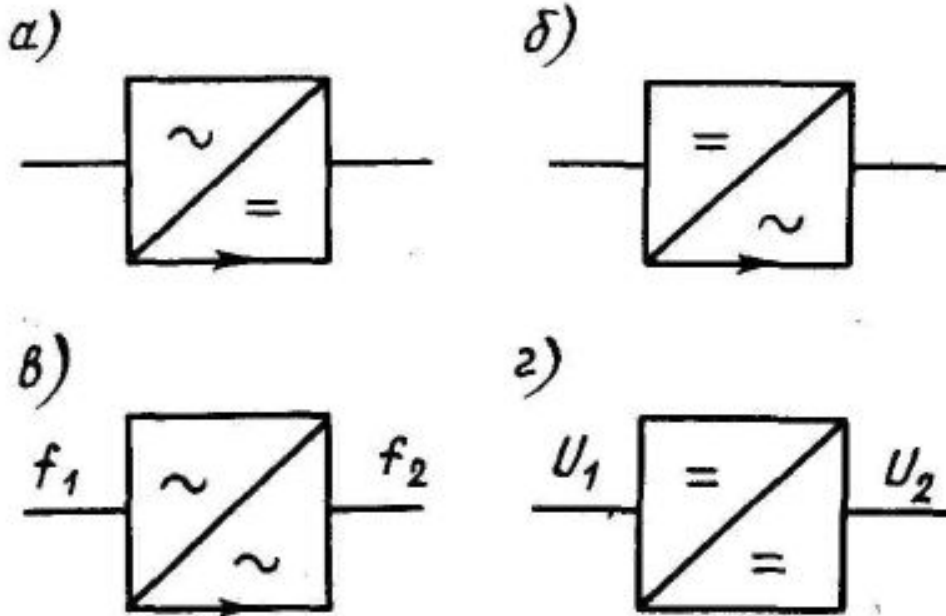


Рис. 1.115. Структуры
вторичных источников питания

- 1. выпрямители** - неуправляемые и управляемые (рис. 1.115, а);
- 2. инверторы** - автономные и ведомые сетью (рис. 1.115, б);
- 3. преобразователи частоты** - со звеном постоянного тока и непосредственные (рис. 1.115, в);
- 4. импульсные преобразователи** постоянного напряжения или тока

Выпрямители, основные схемные реализации

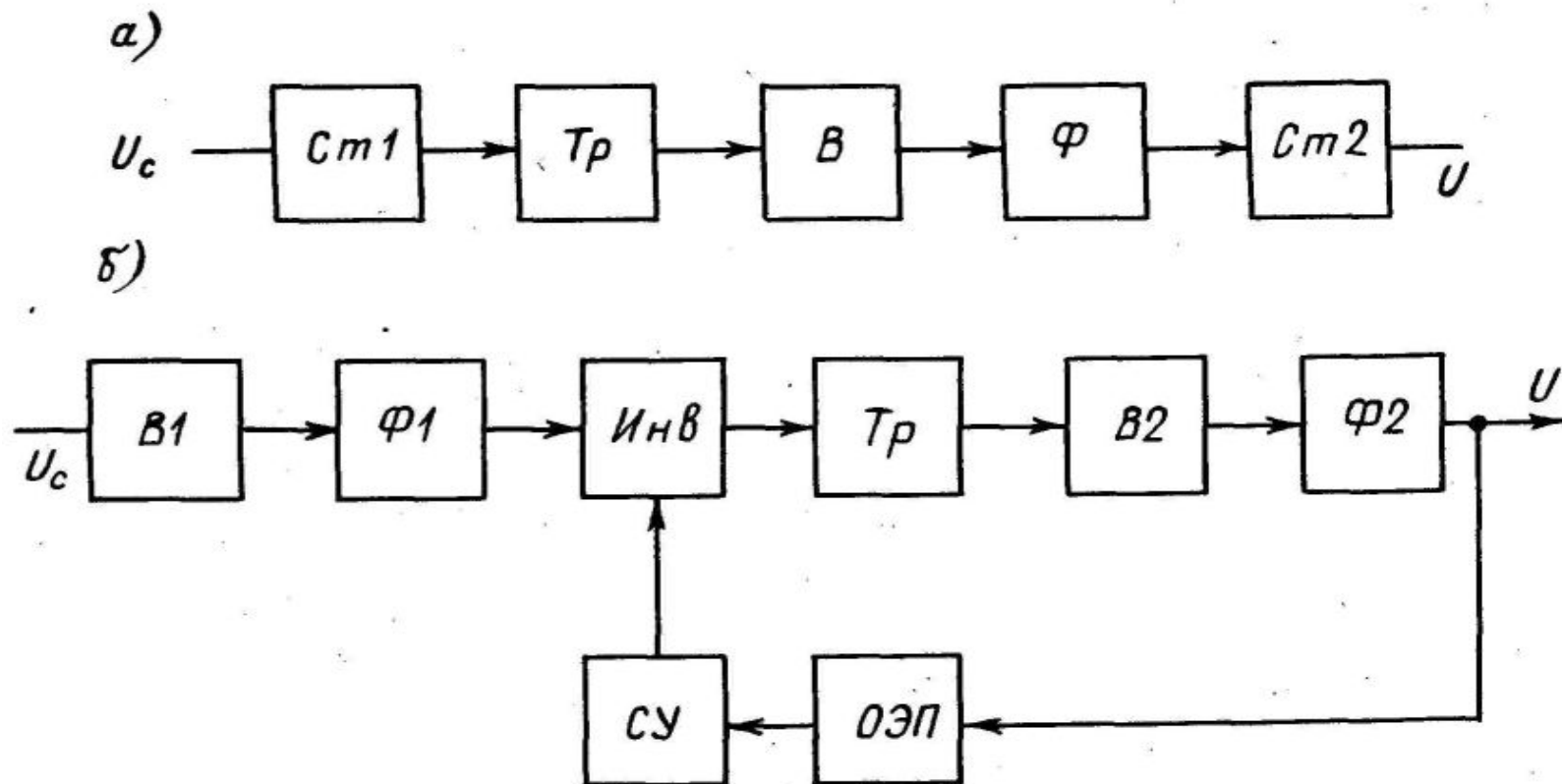
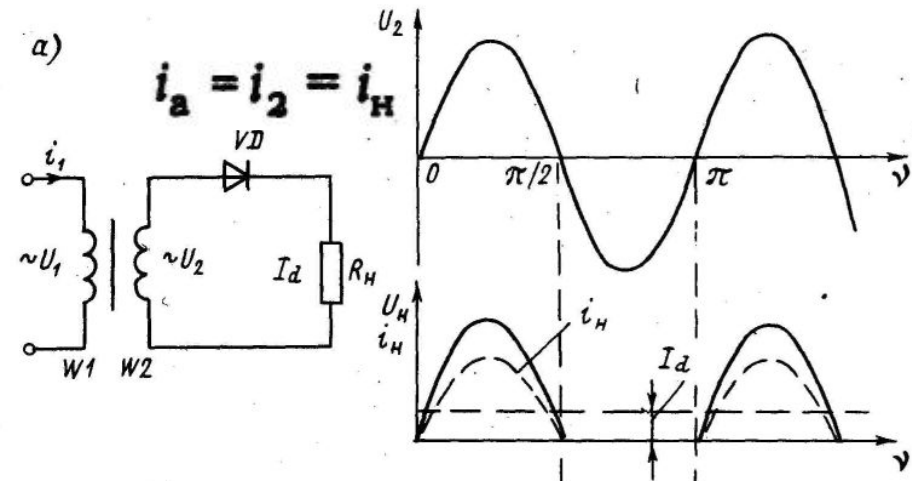


Рис. 1.116. Структурные схемы выпрямительных устройств: а - традиционная; б - усовершенствованная

Однополупериодный однофазный выпрямитель.



$$(5.117) P_2 = I_2 U_2 = 1,57 I_d \cdot 2,22 U_d = 3,49 P_d$$

$$k_{\pi}^i = \frac{2}{m^2 - 1} \quad (6.117)$$

m -число фаз
выпрямления
умноженное на номер
гармоники

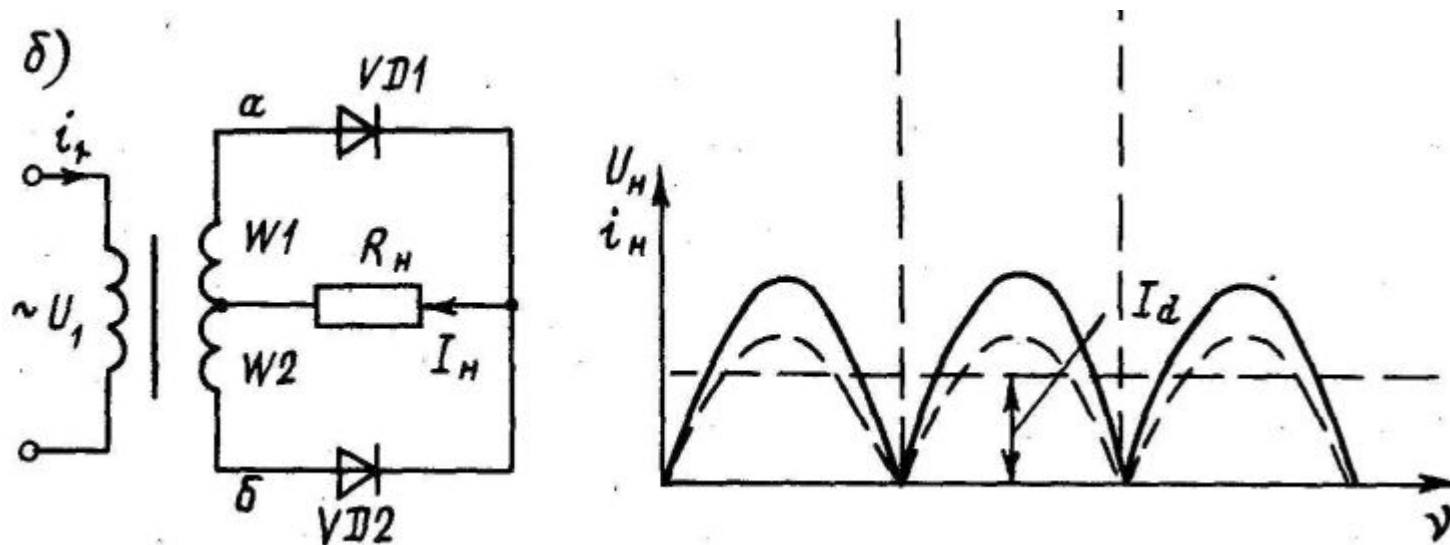
$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_{2 \max} \sin \nu \, d\nu = \frac{I_{2 \max}}{2\pi} \cos \nu \Big|_0^{\pi} = \frac{I_{2 \max}}{\pi} \quad (1.117)$$

$$U_{в \max} = U_{2 \max} = I_{\max} R_H = \pi I_d R_H = \pi U_d \quad (2.117)$$

$$U_d = \frac{U_{2 \max}}{\pi} = \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi} = 0,45 U_2, \quad U_2 = 2,22 U_d \quad (3.117)$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} i_2^2 \, d\nu} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_{2 \max}^2 \sin^2 \nu \, d\nu} = \frac{\pi}{2} I_d = 1,57 I_d \quad (4.117)$$

Двухполупериодный однофазный выпрямитель. (схема Миткевича)

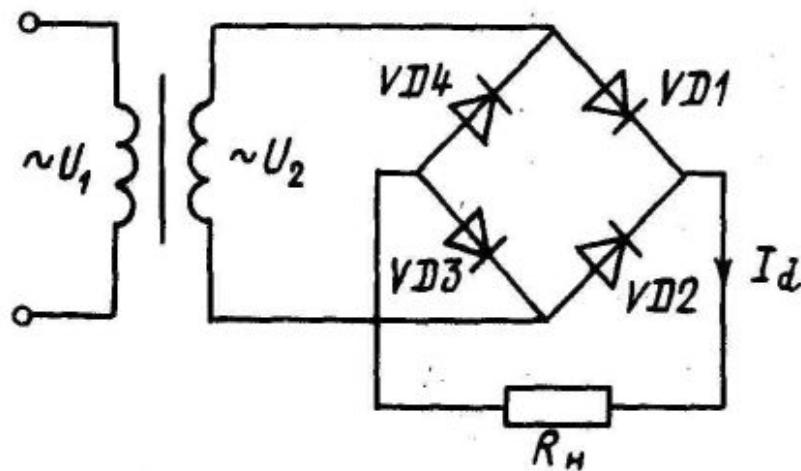


Расчетная мощность трансформатора равна

$$P_{\text{тр}} = \frac{P_1 + P_2}{2} = 1,48 P_d.$$

Частота пульсации в этой схеме в два раза больше, чем в предыдущей: $f_{\text{п}} = 2f_c$, а коэффициенты пульсации для первых трех гармоник соответственно равны: $k_{\text{п}}' = 0,667$, $k_{\text{п}}'' = 0,133$, $k_{\text{п}}''' = 0,057$.

Двухполупериодный однофазный выпрямитель. (схема Греча)



$$U_{в \max} = U_{2 \max} = \sqrt{2} U_2 = 1,57 U_d .$$

Ток вторичной обмотки трансформатора

$$I_2 = \frac{U_2}{R_H} = \frac{1,11 U_d}{R_H} = 1,11 I_d .$$

Расчетная мощность трансформатора

$$P_{тр} = P_1 = P_2 = 1,11 U_d \cdot 1,11 I_d = 1,23 P_d .$$

Частота и коэффициенты пульсации такие же, как в предыдущей схеме.

Фильтры для снижения влияния гармонических искажений

Фильтром называется устройство предназначенное для снижения уровня гармонических искажений

$$q = k'_{\text{П ВХ}} / k'_{\text{П ВЫХ}} \quad (1.120)$$

$$\eta = P_{\text{Н}} / (P_{\text{Н}} + P_{\text{ПОТ}}) \quad (2.120)$$

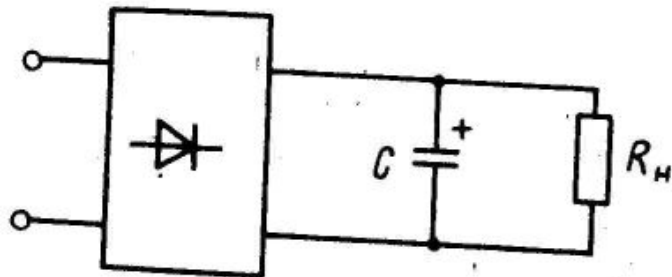
$$\Delta U / \Delta t_1 = -I_{\text{Н}} / C; I_{\text{Н}} = U_{\text{Н}} / R_{\text{Н}} \quad (3.120)$$

$$C = \frac{U_{\text{Н}} \Delta t_1}{R_{\text{Н}} \Delta U} = \frac{\Delta t_1}{R_{\text{Н}} \Delta U / U_{\text{Н}}} = \frac{\Delta t_1}{2k_{\text{П}} R_{\text{Н}}} \quad (4.120)$$

$$\Delta t_1 = T/m \quad (5.120)$$

$$C = \frac{10^6}{2mk_{\text{П}} R_{\text{Н}} f} \quad (6.120)$$

а)



б)

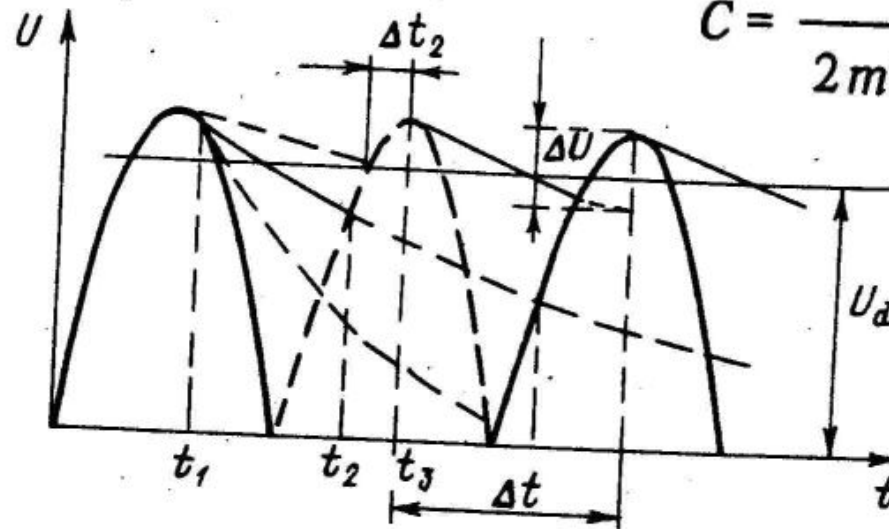
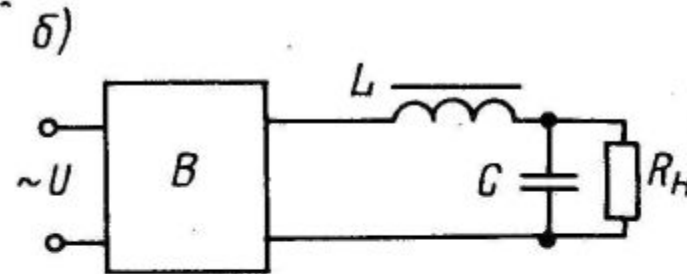
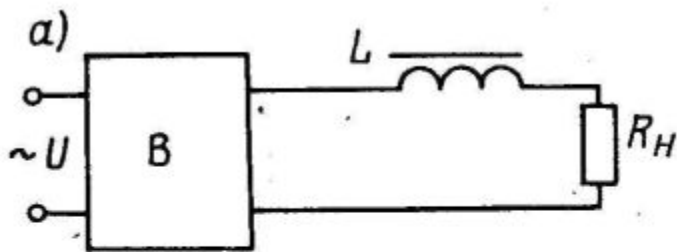


Рис. 1.120 Схема простейшего фильтра и временная диаграмма его работы

Фильтры для снижения влияния гармонических искажений



$$q = \omega_{\pi}^2 LC - 1 \quad (2.121)$$

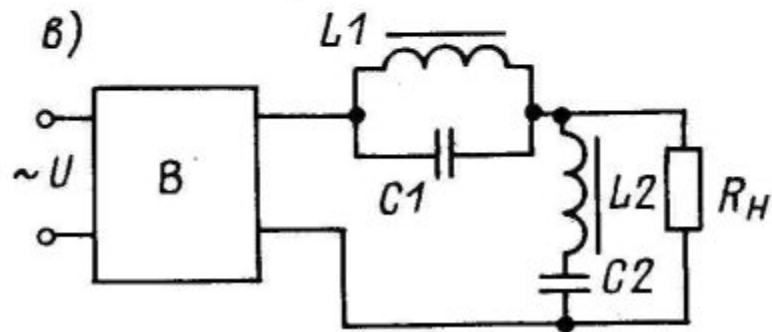


Рис. 1.121 Индуктивный (а), комбинированный (б) и резонансный (в) фильтры

$$q = \frac{U'_{\text{т вх}} / I}{U'_{\text{т вых}} / I} = \frac{z_{\text{вх}}}{z_{\text{вых}}} = \frac{\sqrt{R_{\text{H}}^2 + (\omega_{\pi} L)^2}}{R_{\text{H}}} \approx \frac{\omega_{\pi} L}{R_{\text{H}}} \quad (1.121)$$

Лекция 17

- Автономные инверторы тока и напряжения
- Широтно-импульсные преобразователи постоянного напряжения

Автономные инверторы тока и напряжения(основные определения)

- **Инвертором** называется устройство обеспечивающее преобразование постоянного напряжения в переменное напряжение или ток с регулируемой амплитудой и частотой.
- Если инвертор работает на нагрузку не имеющую дополнительного источника питания, то он называется **автономным(АИ)**, в отличии от зависимого инвертора(ЗИ).
- **АИ применяется** : 1)для питания потребителей переменного тока от аккумуляторов ; 2) в частотно-управляемых электроприводах; 3)в системах прямого преобразования энергии, солнечные

Автономные инверторы тока и напряжения(основные определения)

- Требования к АИ : максимальный КПД преобразования, возможность регулирования напряжения и частоты в широких пределах, массогабаритные показатели, стоимость и т.д.
- Элементная база АИ – транзисторы(биполярные, МОП и JBT), тиристоры со схемами принудительной коммутации, двухоперационные тиристоры (ДОТ)
- АИ делятся на инверторы напряжения(АИН) и тока (АИТ) в зависимости от характера и связей с основным источником питания

Автономные инверторы напряжения

АИН формирует в нагрузке переменное напряжение путем периодического подключения нагрузки к источнику с изменением полярности питающего напряжения за счет очередного попарного включения вентилей

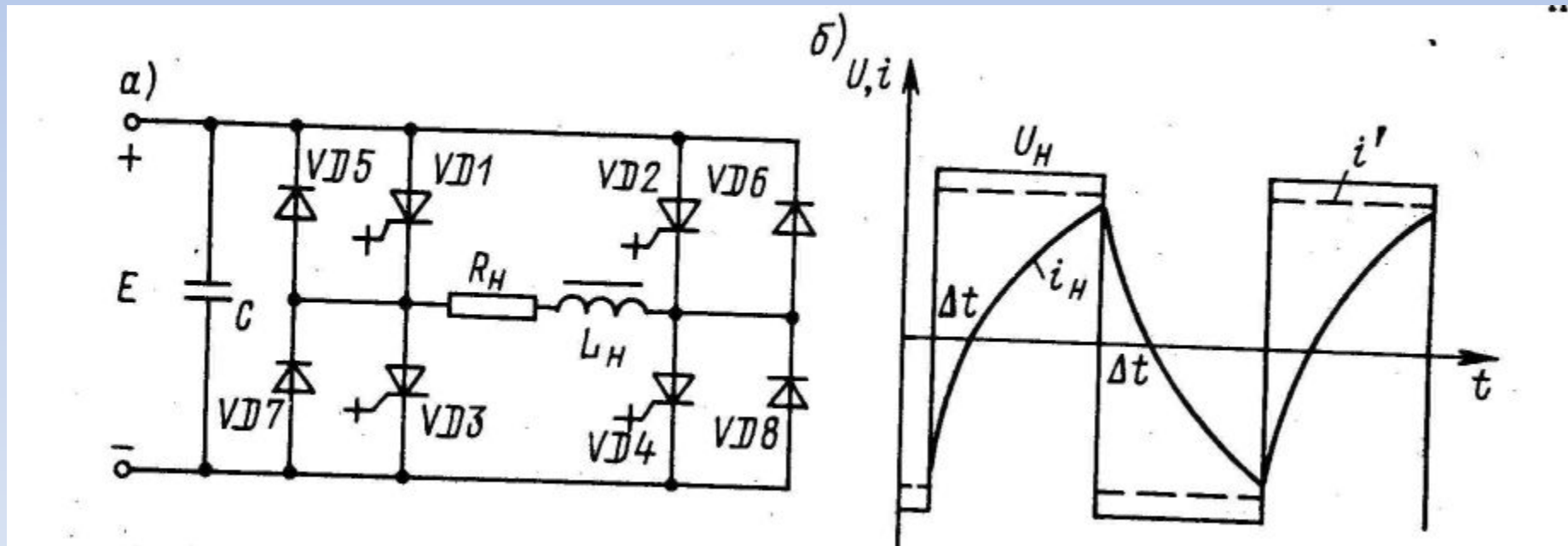


Рис.1.125 АИН на двухоперационных
тиристорах

Автономные инверторы напряжения

Регулировать напряжение АИН можно

1. Изменяя величину питающей ЭДС
2. Изменяя величину задержки при переключении вентилей
3. Применением двух инверторов

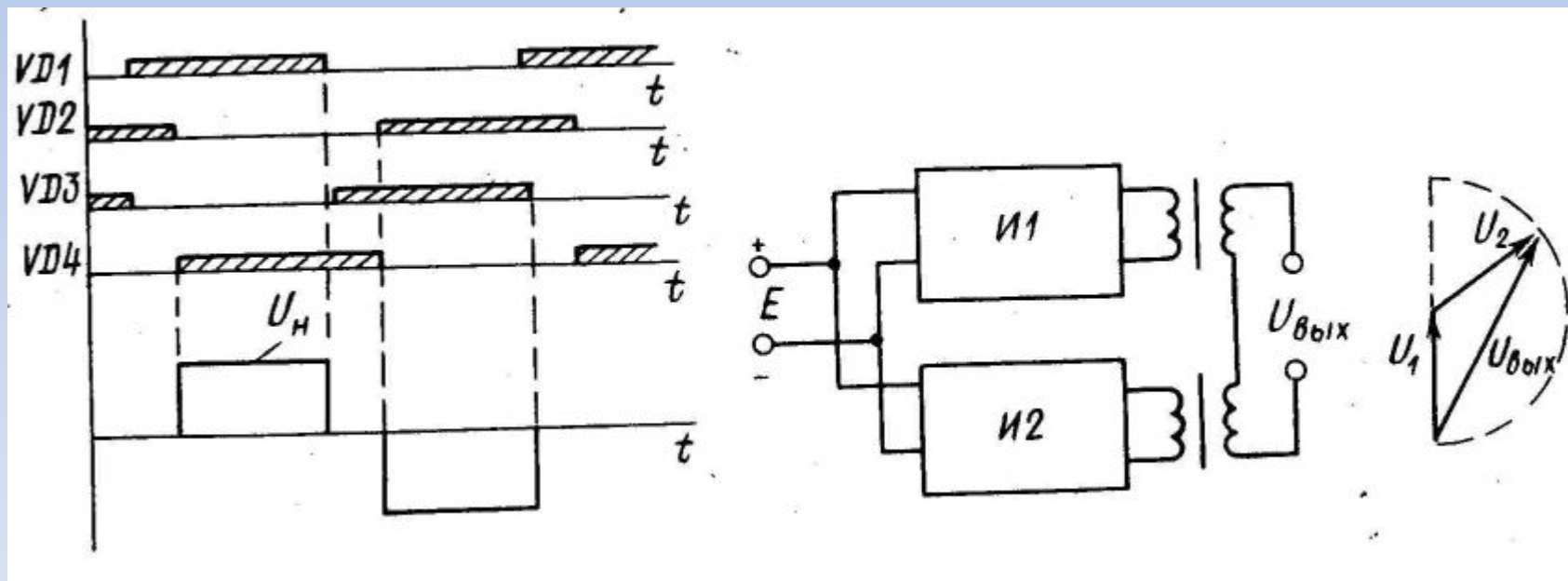


Рис.1.126 Способы регулирования величины
напряжения АИН

Автономные инверторы тока

АИТ получает питание через большую по величине индуктивность поэтому ток практически не изменяется, однако напряжение меняется по экспоненциальному закону

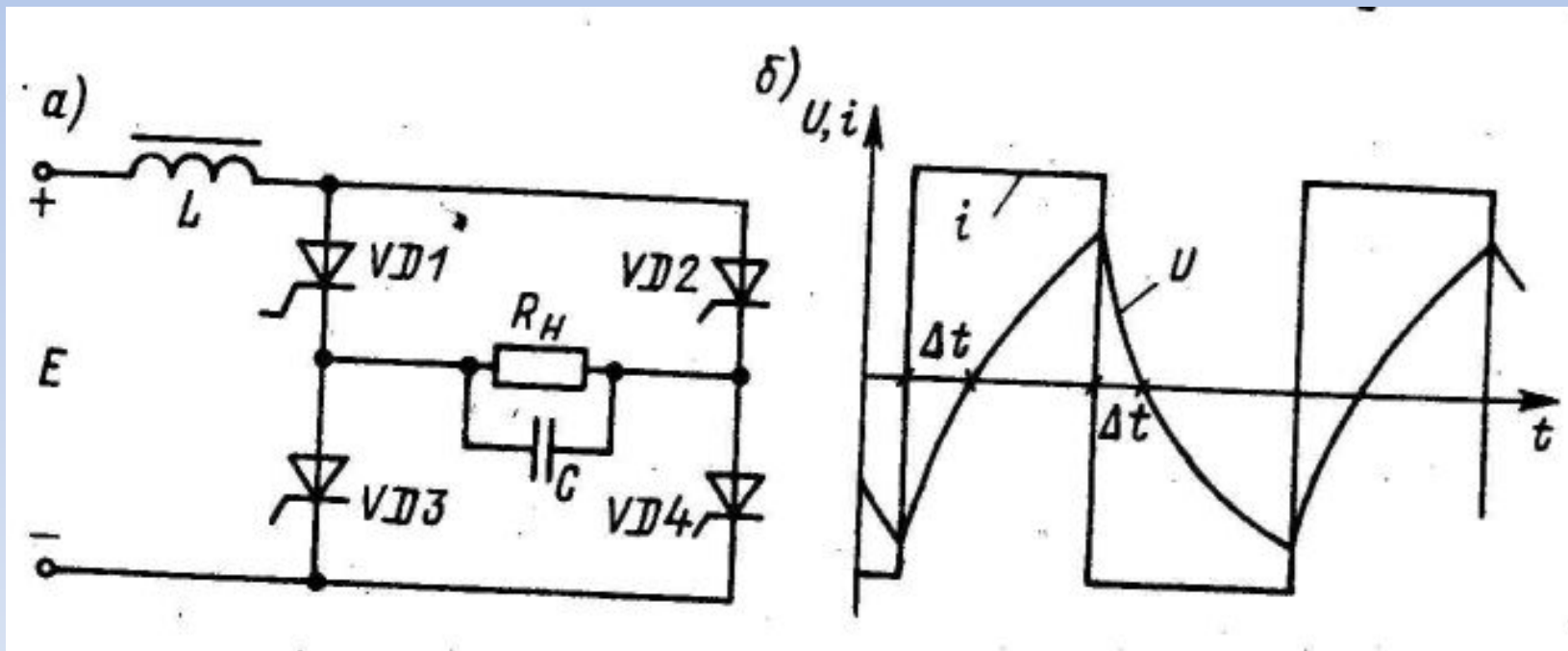


Рис.1.127 Принцип действия АИТ, временные диаграммы его работы

Широтно-импульсные преобразователи постоянного напряжения(ШИП)

Преобразование одного уровня питающего напряжения постоянного тока в другой может быть реализовано различными методами, но ШИП обеспечивает высокий КПД при низком уровне мешающих гармоник. Поэтому он нашел самое широкое применение в существующих схемах автономного питания и регулирования.

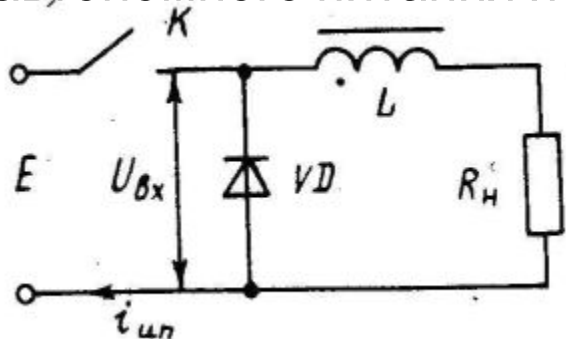
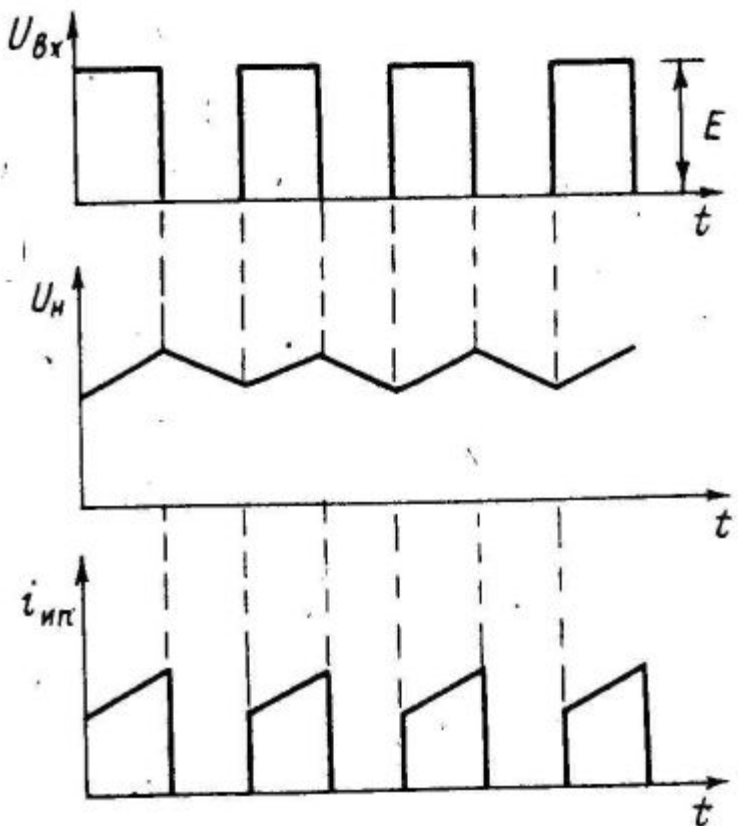


Рис. 1.128

Принципиальная
Схема простейшего
ШИП

Рис. 2.128 Временные
диаграммы
Работы ШИП



Широтно-импульсные преобразователи постоянного напряжения (ШИП)

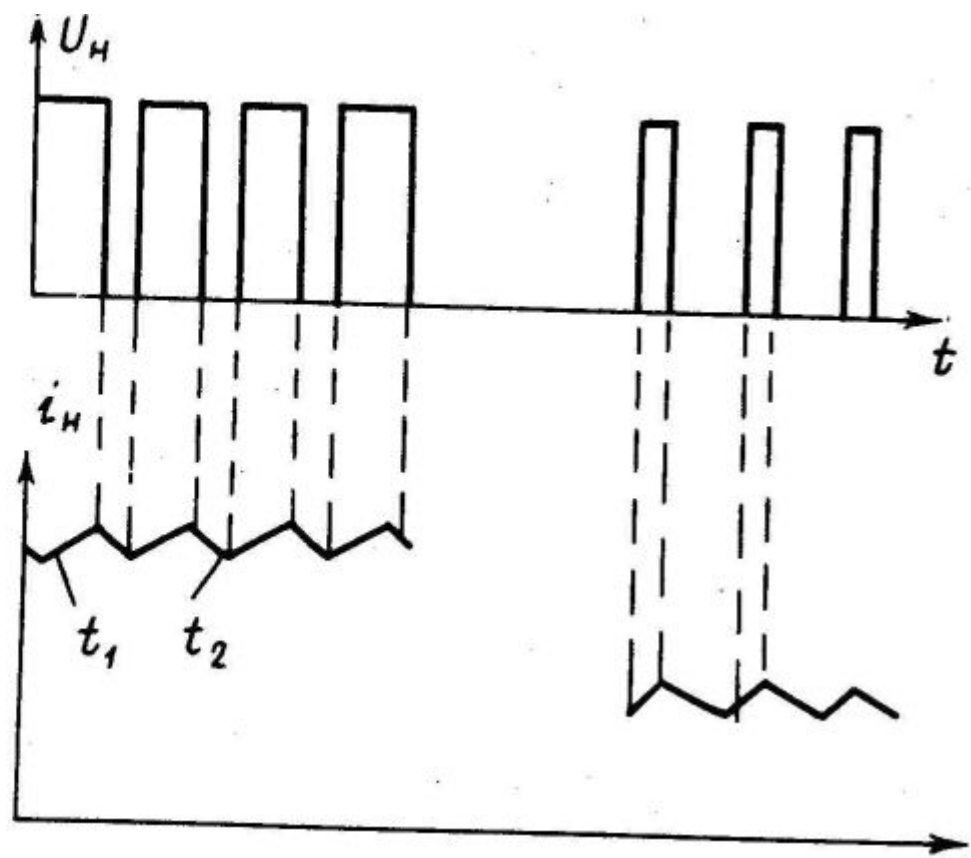
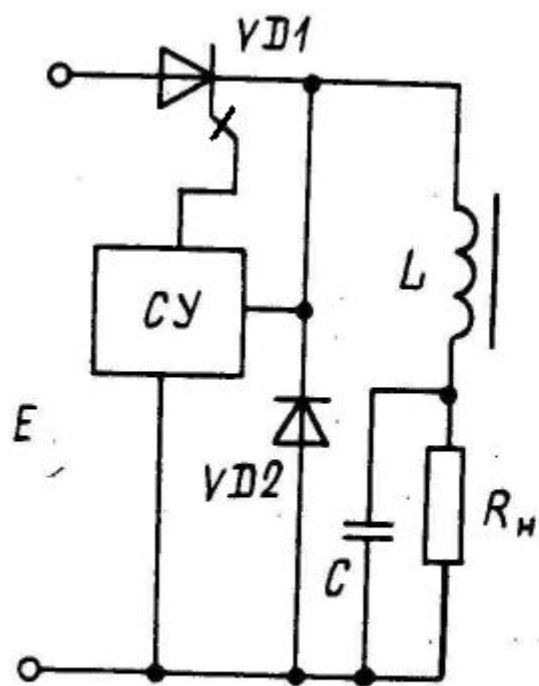


Рис. 1.129
Принципиальная схема
ШИП на
двухоперационном
тиристоре

Рис. 2.129
Временная
диаграмма работы ШИП
на двухоперационном
тиристоре

Расписание ТЕСТОВ на 27 мая

ТЕСТ №1 (10 баллов) для всех групп с 14ч 00м до 15ч00м(одна попытка)

ТЕСТ №2(10 баллов) для МБ и МП с 15 ч 00 м до 16 ч 00 м(две попытки)

ТЕСТ №2(5 баллов) для МО и МА, МД и ММ с 16 ч 00 м до 17 ч 00 м(две попытки)

ТЕСТ №3(10 баллов) для МБ и МП с 17 ч 00 м до 18 ч 00 м(две попытки)

ТЕСТ №3(5 баллов) для МО и МА, МД и ММ с 18 ч 00 м до 19 ч 00 м(две попытки)

ОБЩИЙ ТЕСТ(30 баллов) для МБ и МП с 19 ч 00 м до 21 ч 00 м(две попытки)

ОБЩИЙ ТЕСТ(20 баллов) для МО и МА, МД и ММ с 21 ч 00 м до 23 ч 00 м(две попытки)

Общий тест(40 баллов) для волонтеров с 23 ч(одна попытка)

Микропроцессор – основные определения

Логические основы цифровой электроники

Биологический нейрон и его электронная реализация

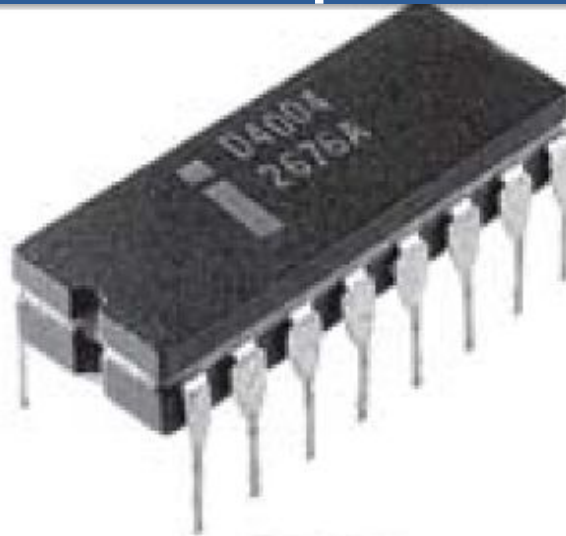
Примеры реализации цифровых систем управления

- Микропроцессор (МП) — это электронное цифровое устройство, для обработки цифровой информации и управления процессом этой обработки в соответствии с программно заданными алгоритмами, выполненное на одной или нескольких интегральных схемах с высокой степенью интеграции электронных элементов.
- Микропроцессор — изобретение, объединившее достижение интегральных технологий с основными результатами развития фундаментальной и прикладной математики, кибернетики и информатики

Изобретатели первого в мире микропроцессора ИНТЕЛ 4004



Ted Hoff

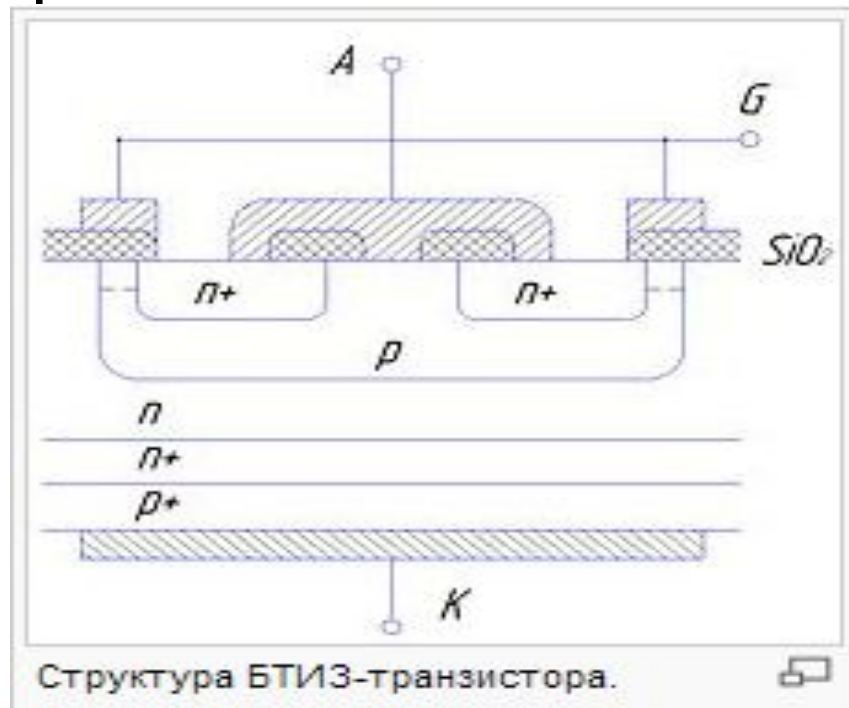


Federico Faggin



Masatoshi Shima

Виполярний транзистор з ізолюваним затвором



Діапазон використання — від десятків до 1200 [ампер](#) по току, від сотень вольт до 10 кВ по напругі.

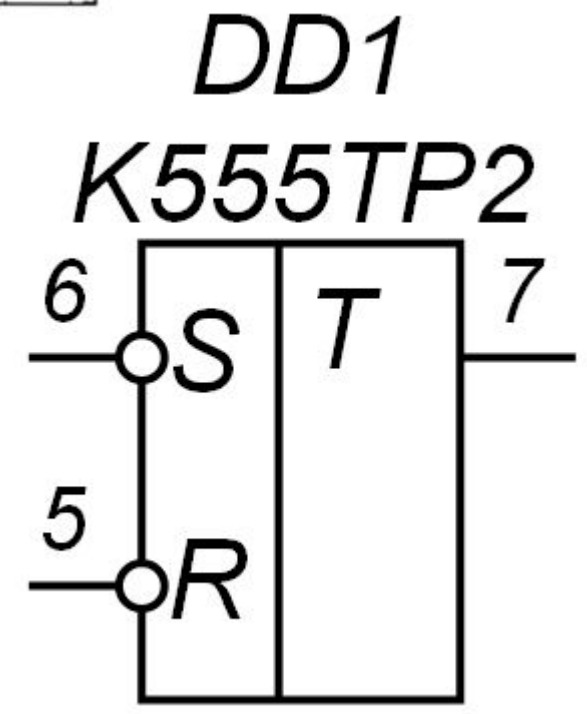
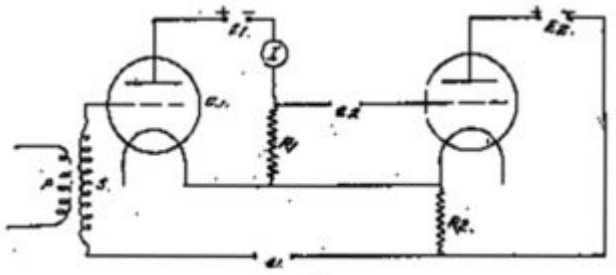
Основне застосування БТІЗ — це [інвертори](#), імпульсні регулятори току, [частотно-регульовані приводи](#).



Сборка на БТІЗ для комутації напруги до 3300 В і токів до 1200 А.

Двоичные переменные могут принимать два значения: 0 и 1. Они называются также логическими или булевыми переменными и обозначаются символами x_1, x_2, \dots . Переключательные функции (ПФ) зависят от двоичных переменных. Они, как и аргументы, могут принимать лишь два значения: 0 или 1. ПФ называют также логическими или булевыми функциями. Будем обозначать ПФ в виде $f(x_1, x_2, \dots)$, указывая в скобках аргументы, либо в виде y_1, y_2, y_3, \dots . ПФ в свою очередь могут служить аргументами еще более сложных логических функций. Следовательно, можно построить ПФ любой заранее заданной сложности, пользуясь ограниченным числом логических связей.

В 1918 году Михаил Александровичем Бонч-Бруевичем в Нижнем Новгороде в радиотехнической лаборатории создано катодное реле в современном исполнении - электронный триггер



Логические переменные и функции

- Для формального описания узлов цифровой электронной техники при их анализе и синтезе используется аппарат алгебры логики. Основные положения алгебры логики разработал в XIX в. английский математик Джордж Буль. Алгебру логики называют также булевой алгеброй.
- В булевой алгебре различают двоичные переменные и переключательные функции.
- Двоичные переменные могут принимать два значения: 0 и 1. Они называются также логическими или булевыми переменными и обозначаются символами x_1, x_2, x_3, \dots
- Переключательные функции (ПФ) зависят от двоичных переменных. Они, как и аргументы, могут принимать лишь два значения: 0 или 1.
- ПФ называют также логическими или булевыми функциями. Будем обозначать ПФ в виде $f(x_1, x_2, x_3, \dots)$, указывая в скобках аргументы, либо в виде y_1, y_2, y_3, \dots . ПФ в свою очередь могут служить аргументами еще более сложных логических функций. Следовательно, можно построить ПФ любой заранее заданной сложности, пользуясь ограниченным числом логических связей.

Элементарные логические функции

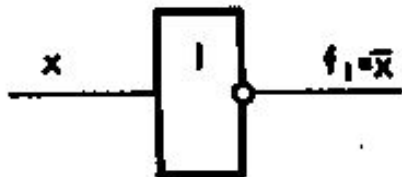
функции

- **Логическое отрицание (функция НЕ).** Логическим отрицанием переменной x называется такая ПФ $f_1(x)$, которая имеет значение 1, когда $x = 0$ и значение 0, когда $x = 1$.

ПФ НЕ читается: « f_1 есть (эквивалентно) не x ».

x	f_1
0	1
1	0

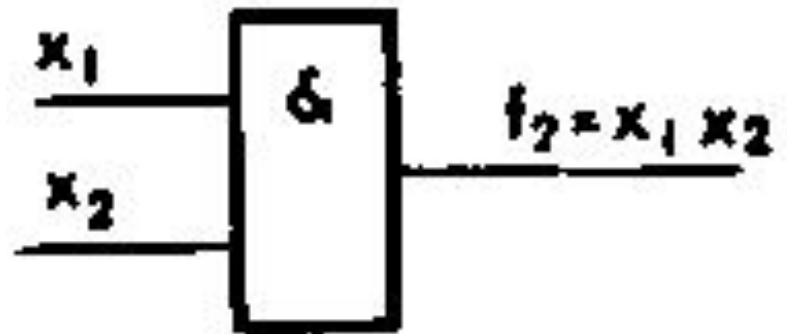
- Функцию НЕ выполняет физический элемент (электронная схема), который называется элементом НЕ или инвертором. Обозначение инвертора на функциональных схемах показано на рис



Элементарные логические функции

- **Логическое умножение (конъюнкция).**
Конъюнкция двух (или любого другого числа) переменных x_1 и x_2 принимает значение 1 только на наборе, в котором все переменные имеют значения 1. На остальных наборах эта функция имеет значение 0.

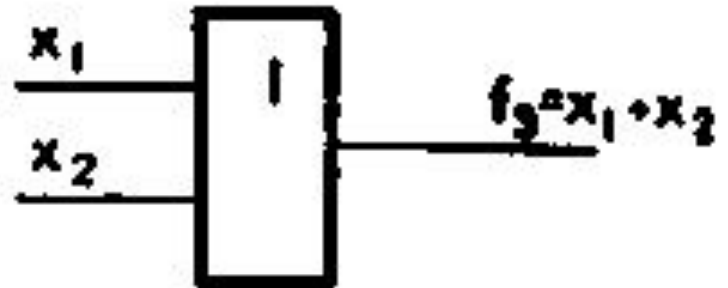
x_1	x_2	f_2
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



Элементарные логические функции

- **Логическое сложение (дизъюнкция).** Дизъюнкция двух (или любого другого числа) переменных x_1 и x_2 имеет значение 0 только на наборе, в котором все переменные имеют значение 0. Если хотя бы одна из переменных равна 1, функция будет иметь значение

x_1	x_2	f_3
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

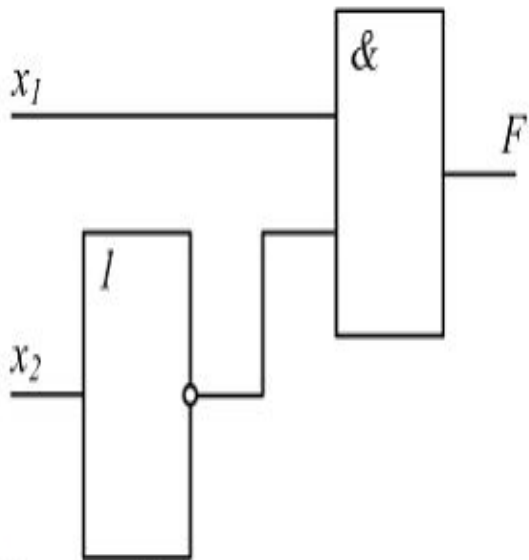


Элементарные логические функции

Основы электроники и электрические измерения / Основы цифровой электроники

Помощь ?

Задание N 22.



Выходной сигнал $F = 1$, если сигналы на входах x_1 и x_2 соответственно равны ...

Варианты ответа:

- 1; 1
- 0; 1
- 1; 0
- 0; 0

Закон Меткалфа

Закон Меткалфа гласит, что полезность сети приблизительно равна половине квадрата численности пользователей этой сети $\frac{n^2}{2}$. Но так как пользователь не может подключиться сам к себе, выражение примет вид $\frac{n(n-1)}{2}$ или $\frac{n^2 - n}{2}$.

Этот закон был впервые сформулирован **Робертом Меткалфом** в отношении **Ethernet**. Закон описывает такое понятие как **Сетевой эффект** и используется в **многоуровневом сетевом маркетинге**, в **социальных сетях** и **маркетинге** как таковом.

Закон Гильдера

утверждает, что рост пропускной способности сетей в целом, как минимум, в три раза превышает вычислительную мощность компьютеров. Это означает, что развитие пропускной способности сетей будет все время, по крайней мере, адекватно возрастающим потребностям передачи данных. Это, в свою очередь, делает возможным передачу все более и более «богатого» содержания.

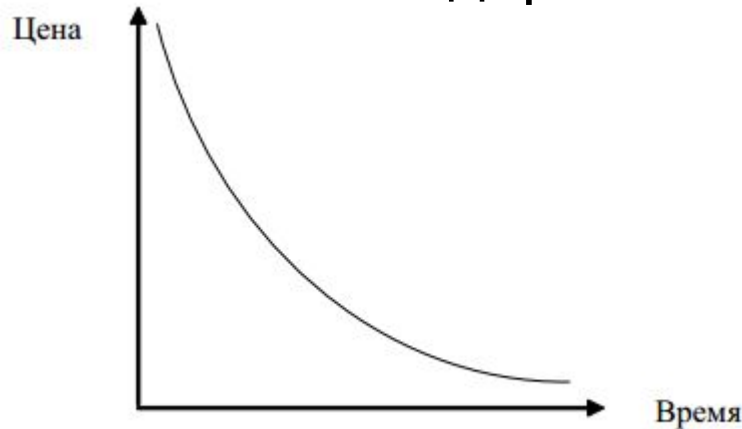
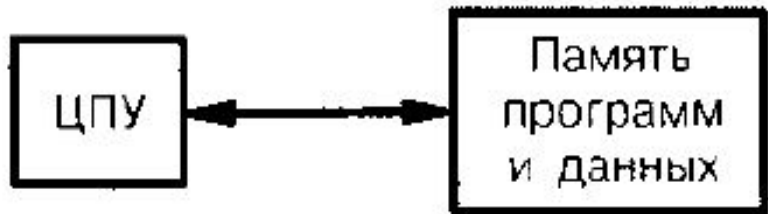


Рис. 5. Кривая Гильдера

Классификация МК по архитектуре



Принстонская архитектура.



Джон фон
Нейман



Гарвардская архитектура.



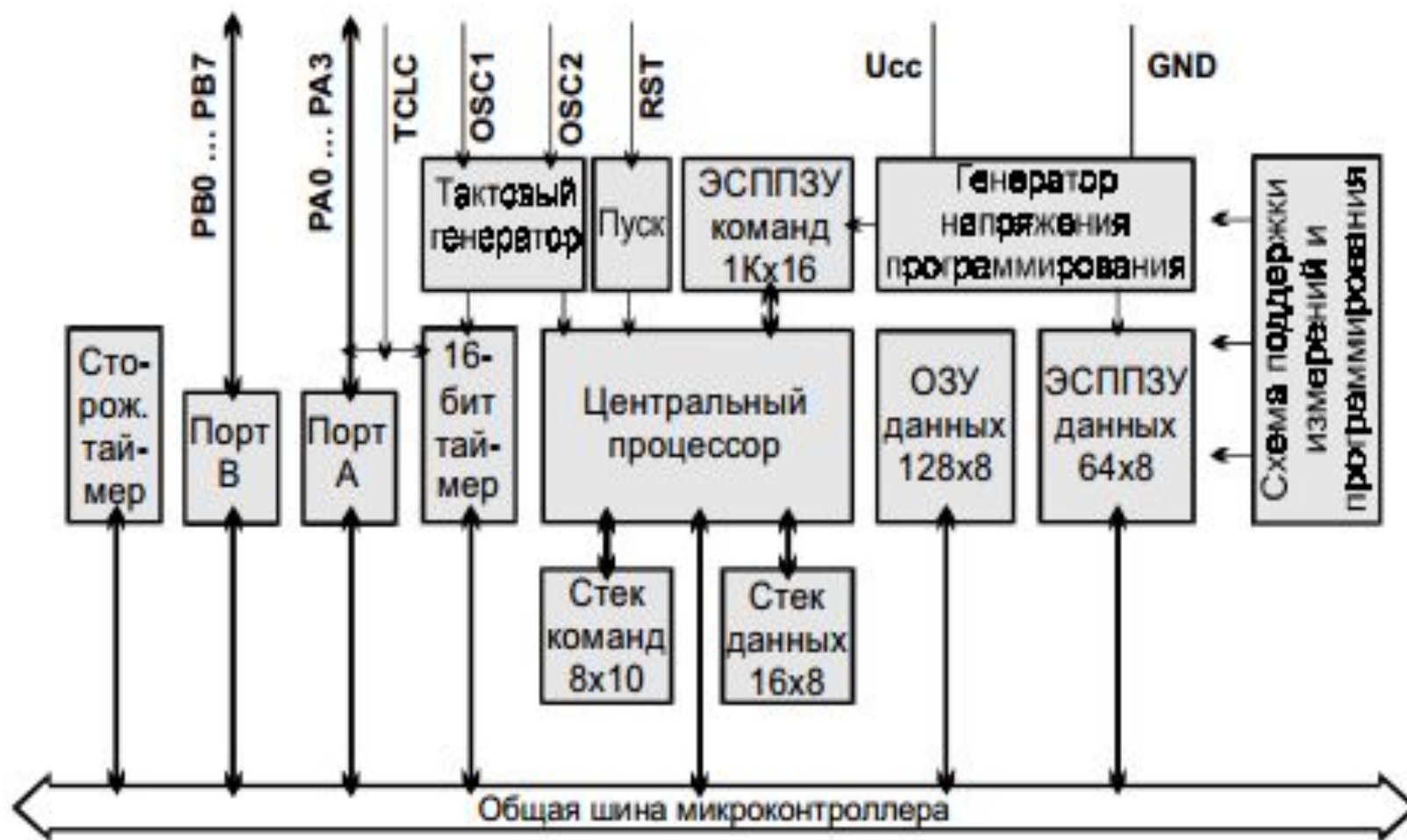
Сергей Алексеевич
Лебедев

Классификация МК по понятию платформам

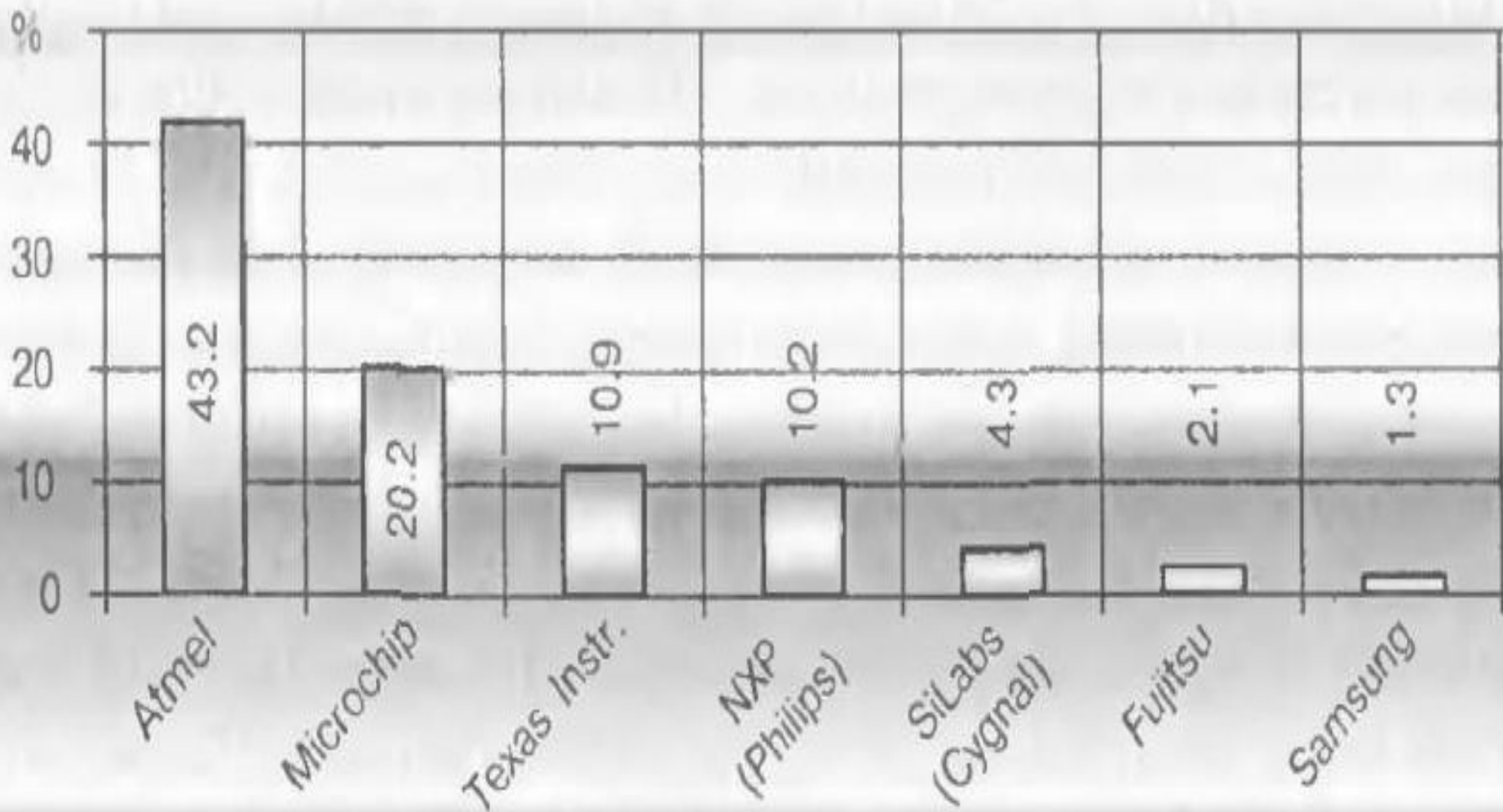
- • ядро MCS-51 - AT89Cх051, AT89C5х, AT89S (Atmel), DS89 (Maxim/Dallas);
- • ядро AVR - ATtiny, AT90S, ATmega, ATXmega (Atmel);
- • ядро PIC - PIC10, PIC12, PIC16, PIC18 (Microchip).
- • ядро SX — SXxxx (Uvicom, ранее Scenix);
- • ядро 68HC — 68HC08, 68HC12 (Freescale Semiconductor, ранее Motorola);
- • ядро ST — ST62, ST7 (STMicroelectronics, ранее SGS-THOMSON);
- • ядро CIP-51 — C8051 (Silicon Laboratories, ранее Cygnal Integrated);
- • ядро 8052 - W78E516 (Winbond);
- • ядро «ТЕСЕЙ» - КР1878ВЕ1 («Ангстрем»).

Микроконтроллер КР1878ВЕ1(ядро Тесей)
предназначен для использования в системах
управления, работающих в масштабе реального
времени.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ИС

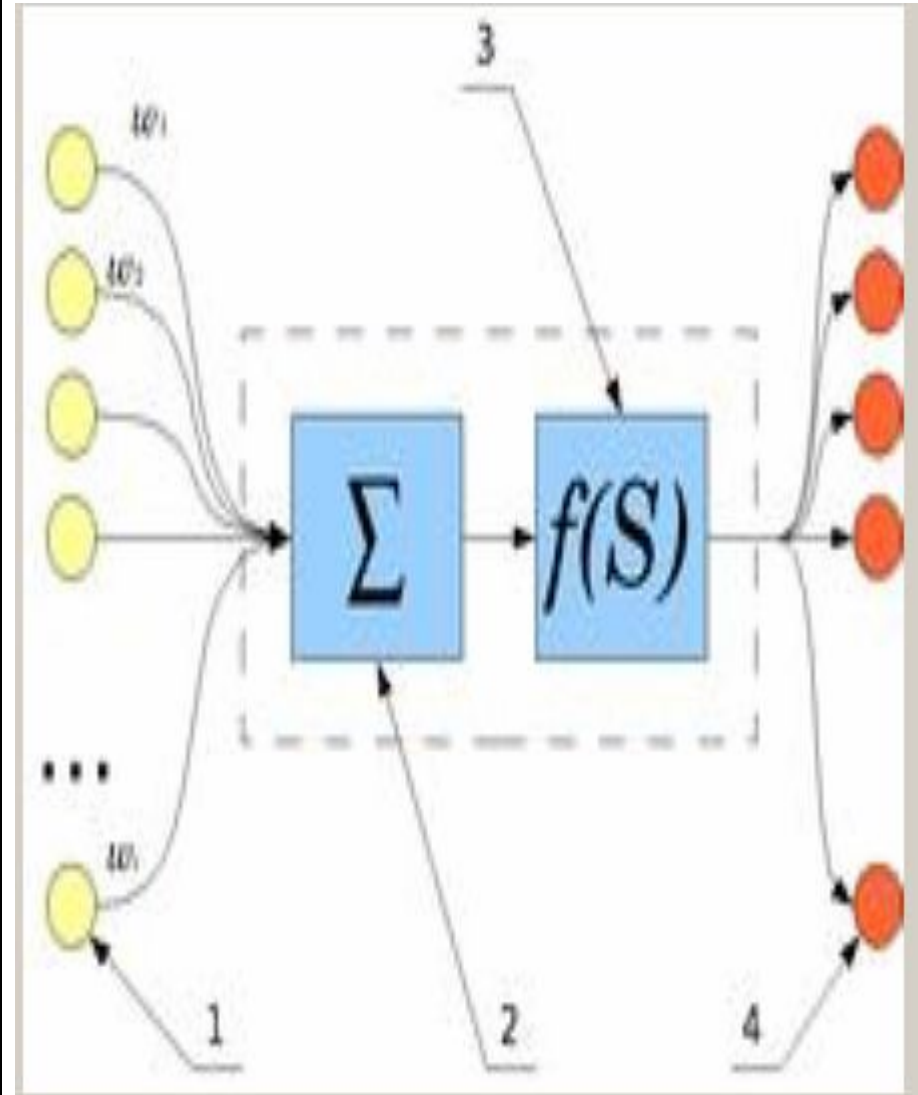
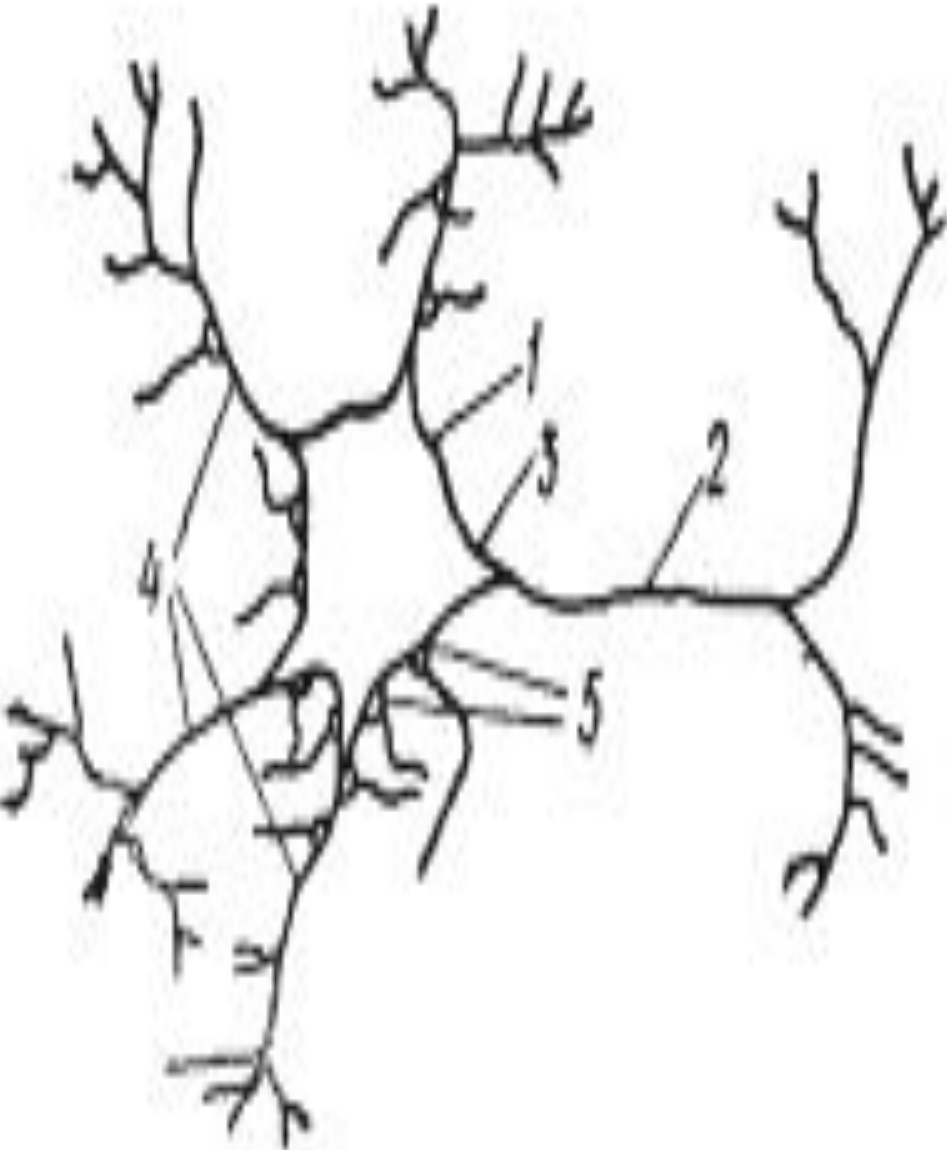


Классификация МК по платформам

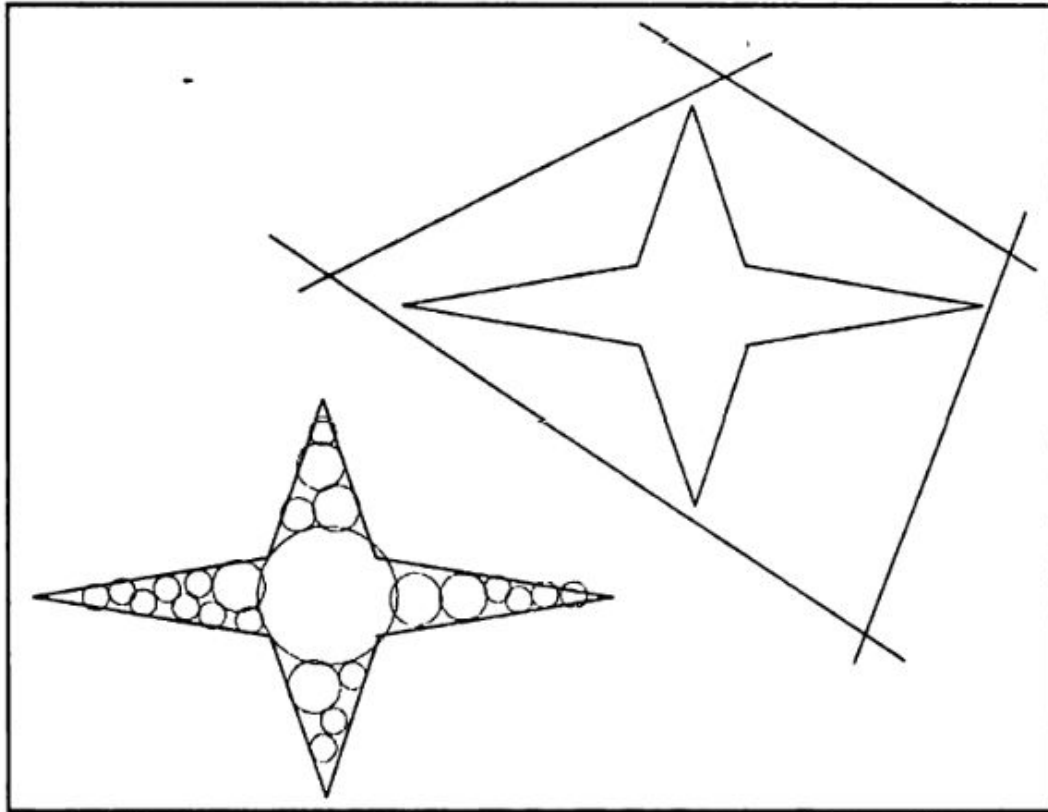


Индексы популярности фирм производителей МК

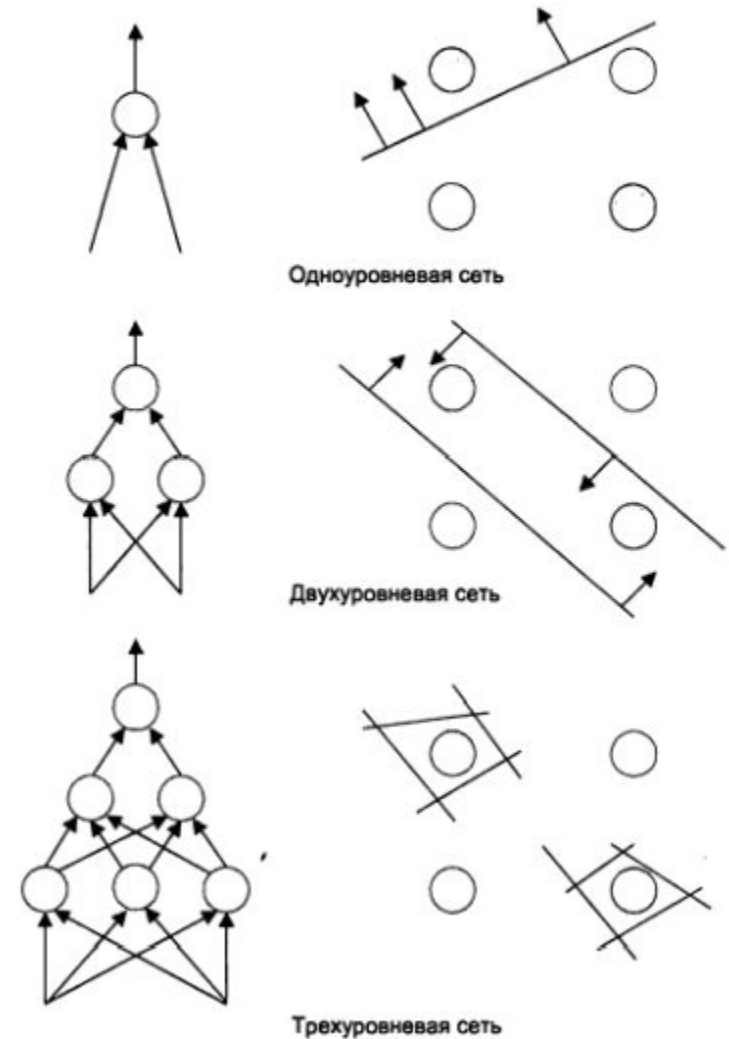
Биологический нейрон и его электрическая модель



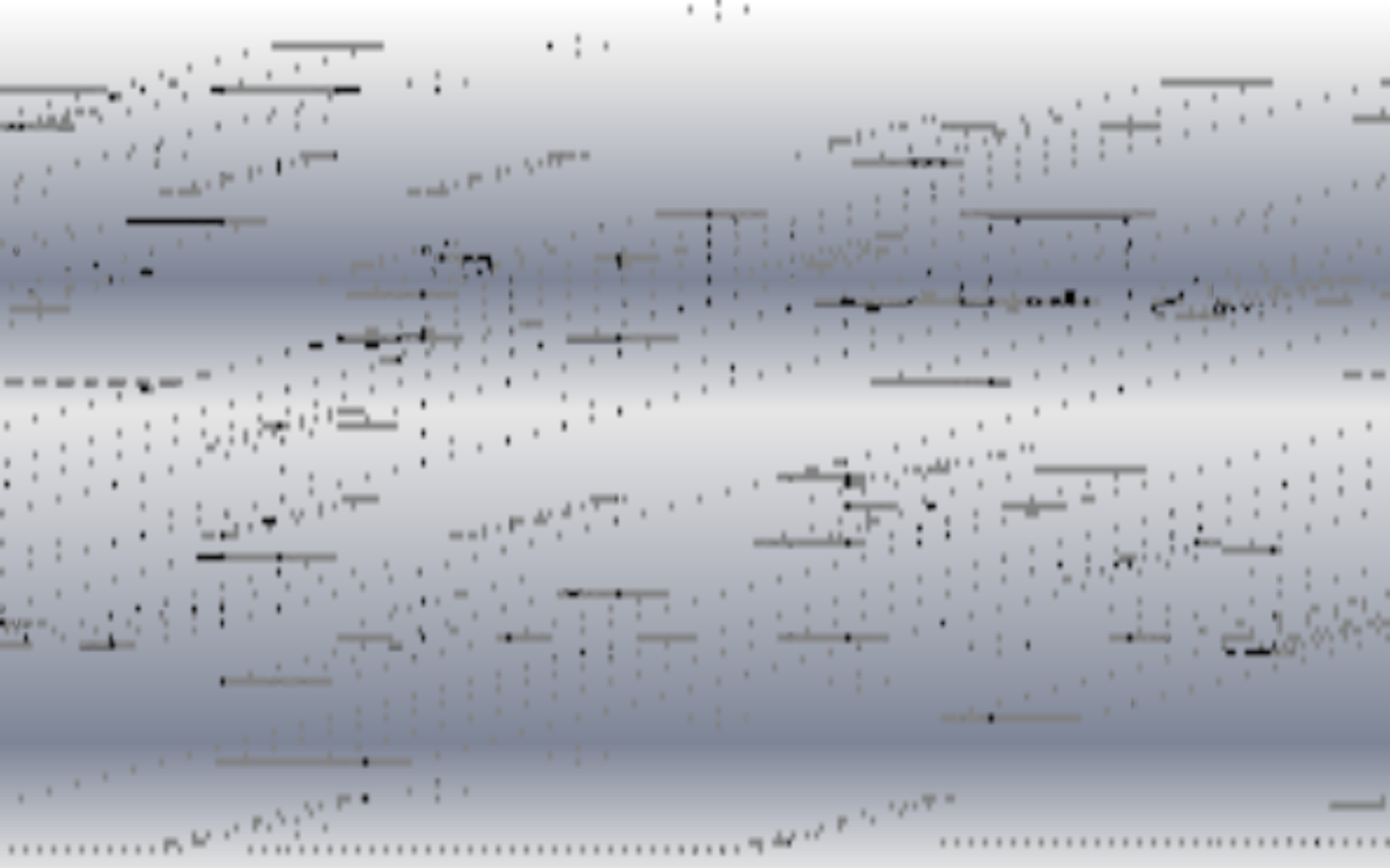
Биологический нейрон и его электрическая модель



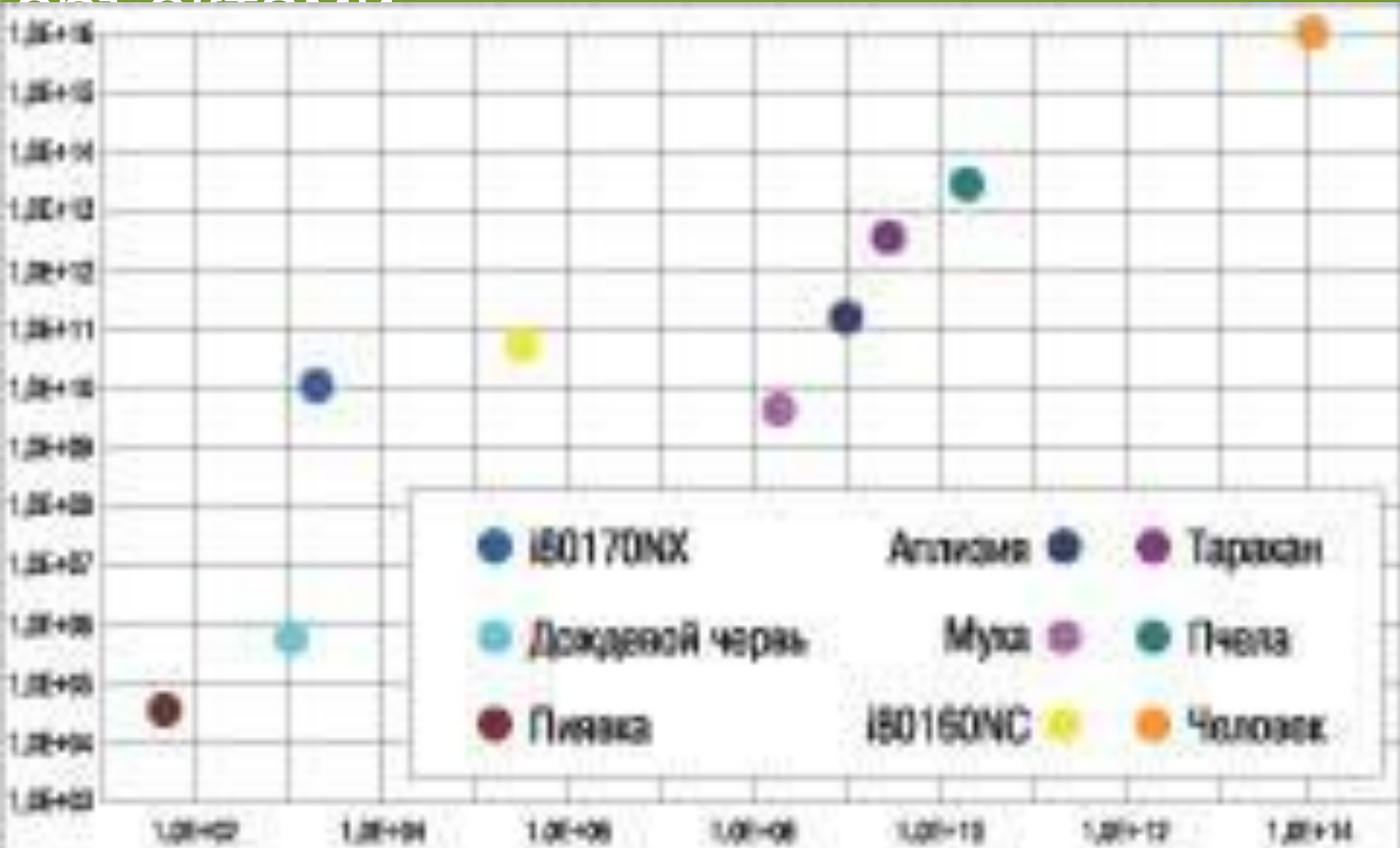
. Выделение областей в двумерном пространстве



Нейропроцессоры. Электронная модель нейрона



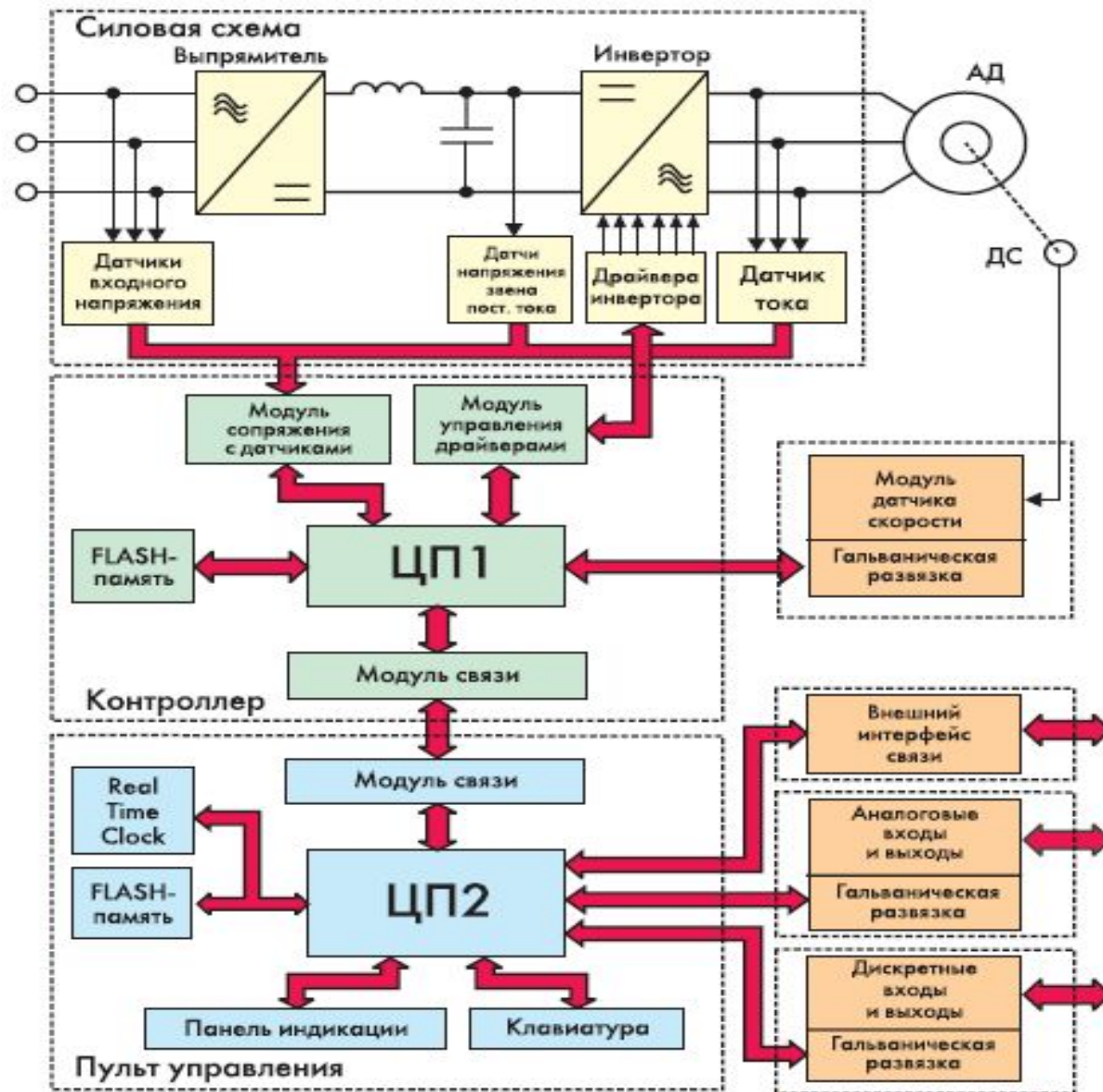
Сравнение мощности нейропроцессоров с биологическими объектами



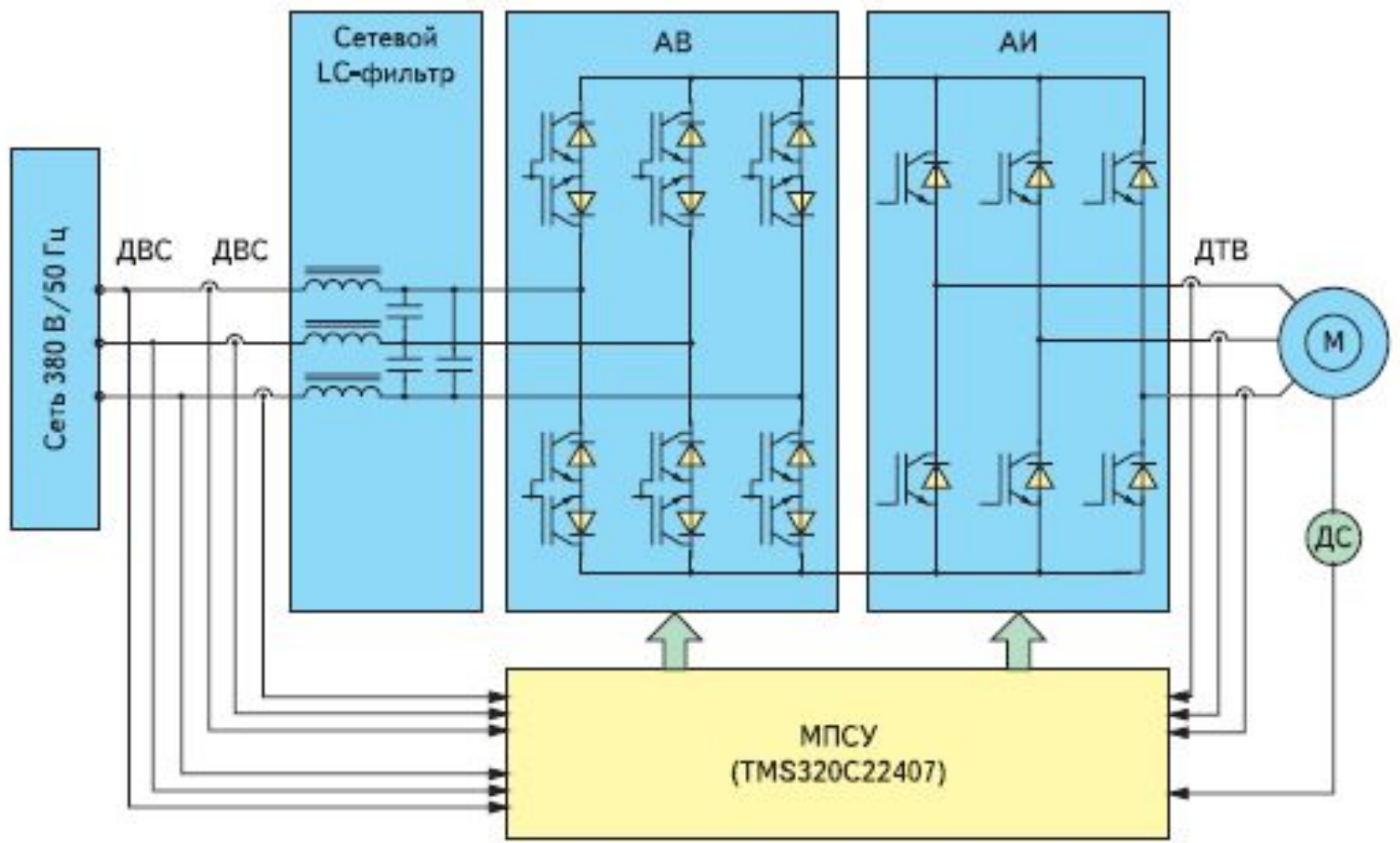
Применение микропроцессоров в электроэнергетике, примеры разработок и исследований

- применения МК в системах управления электроприводом
- применение нейропроцессоров в су электроприводом

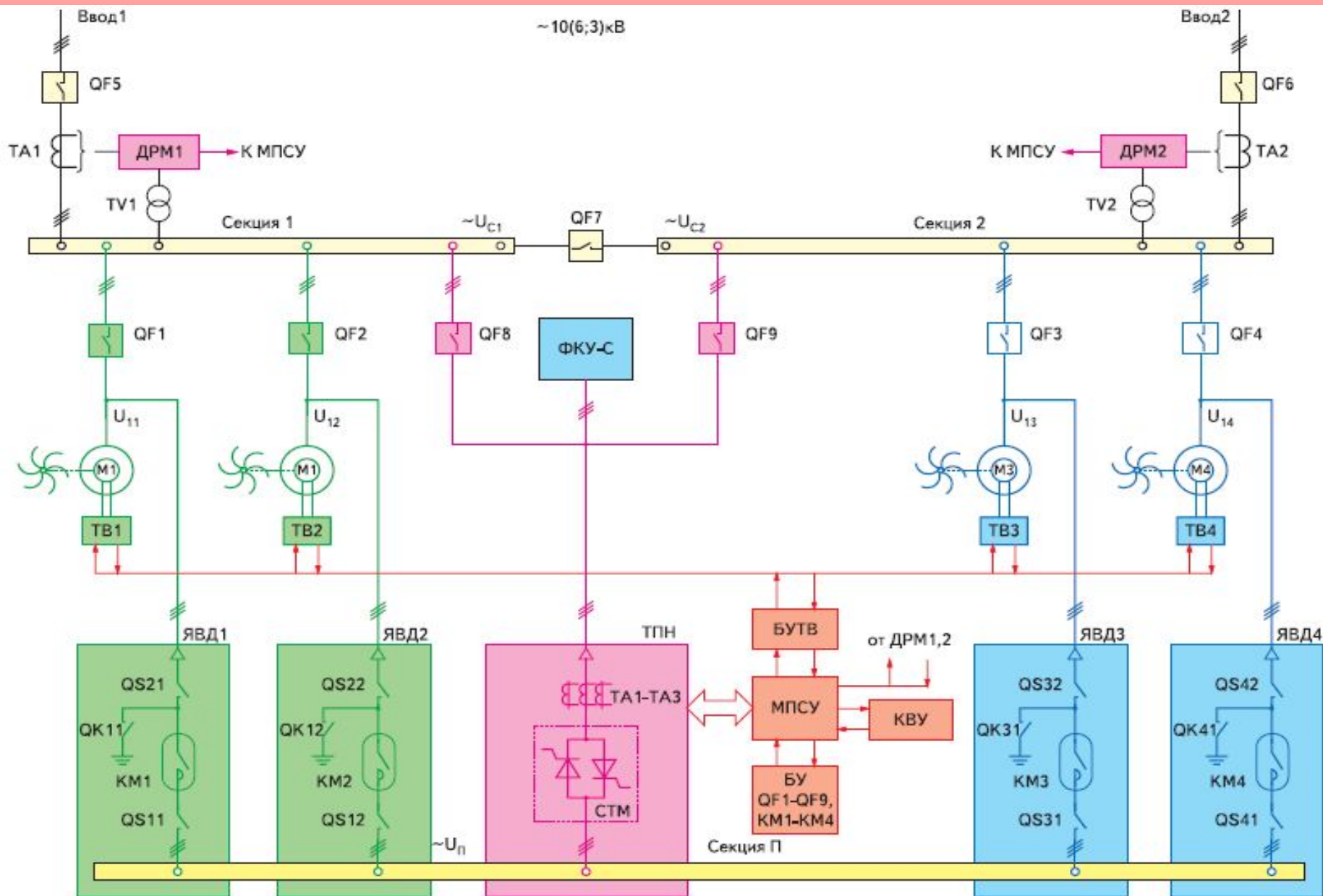
Типовая схема микропроцессорного управления асинхронным электроприводом



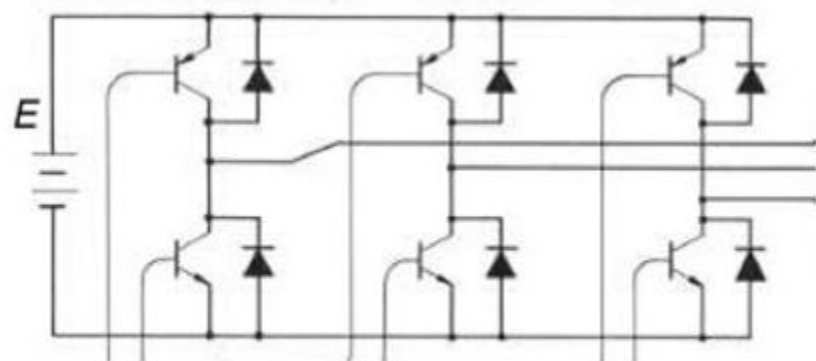
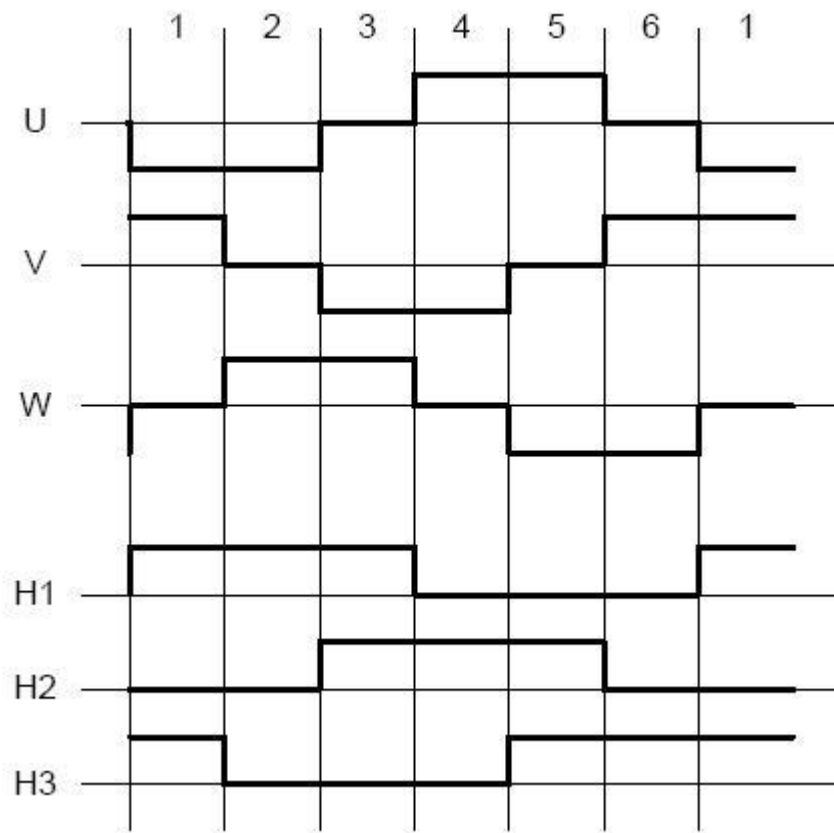
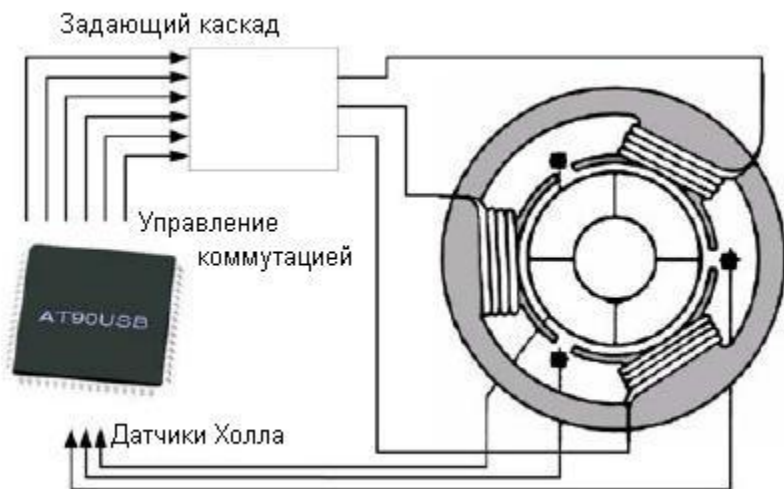
Силовая часть электропривода с непосредственным преобразователем частоты



Электрическая схема автоматизированного плавного пуска четырех высоковольтных СЭП центробежных механизмов

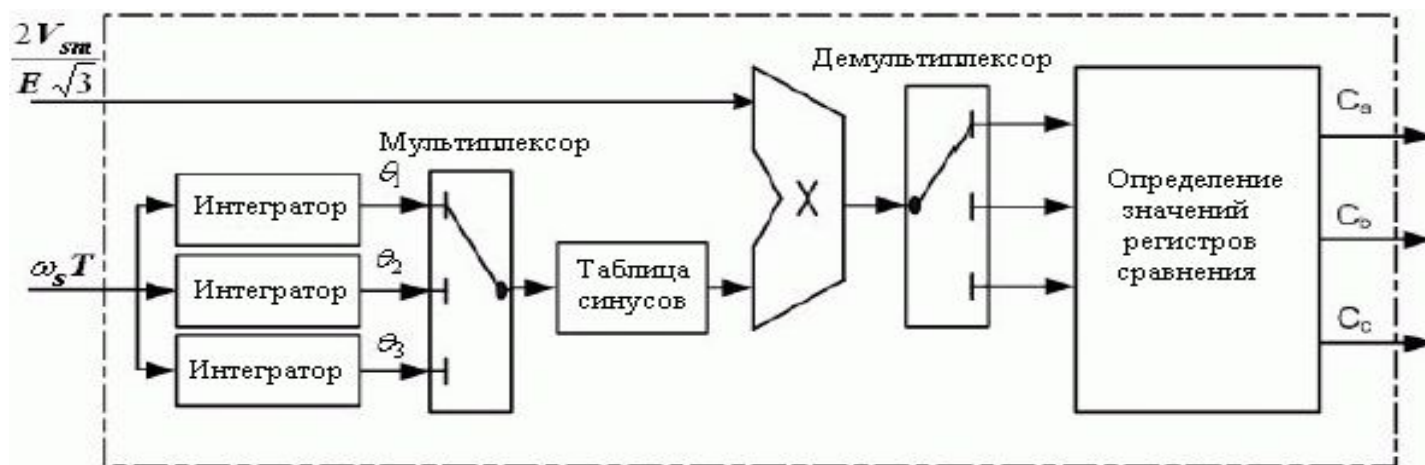
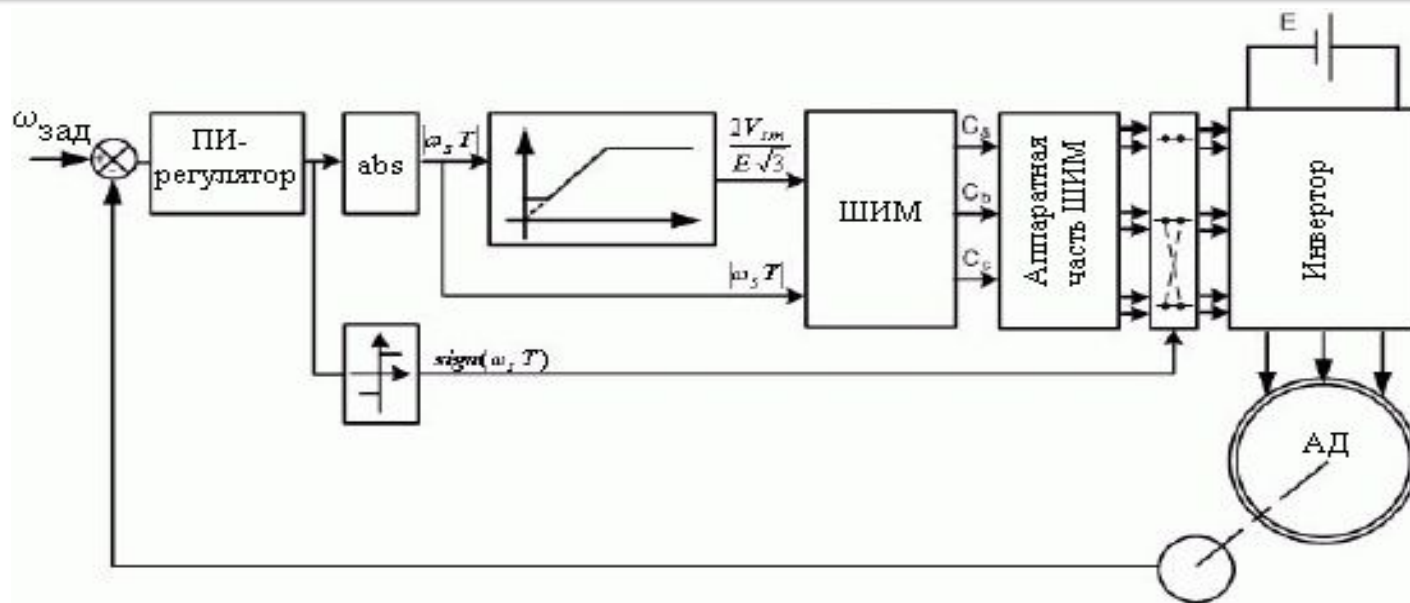


Управление трехфазовым вентильным электродвигателем на основе датчиков с помощью семейства AT90USB

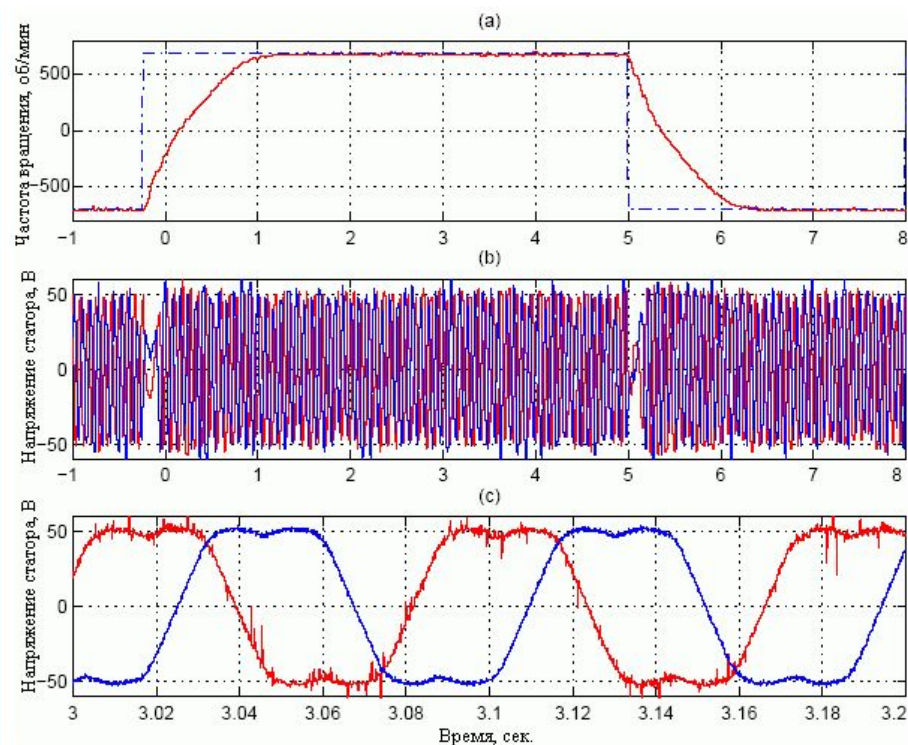
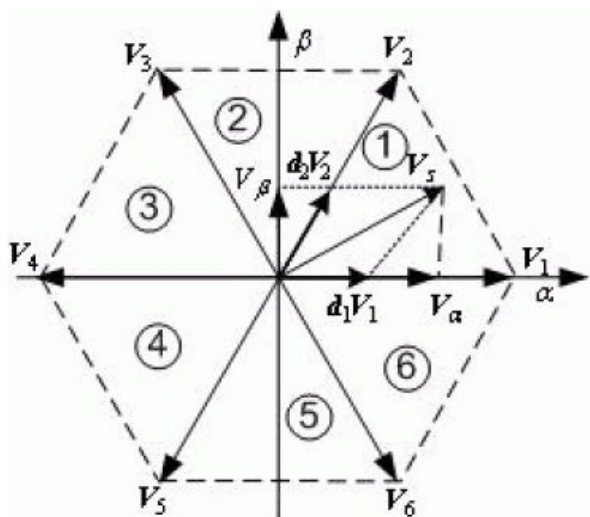
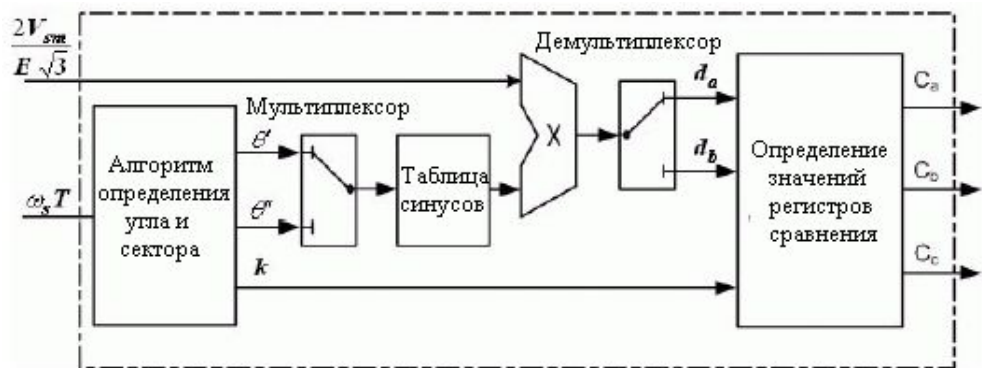
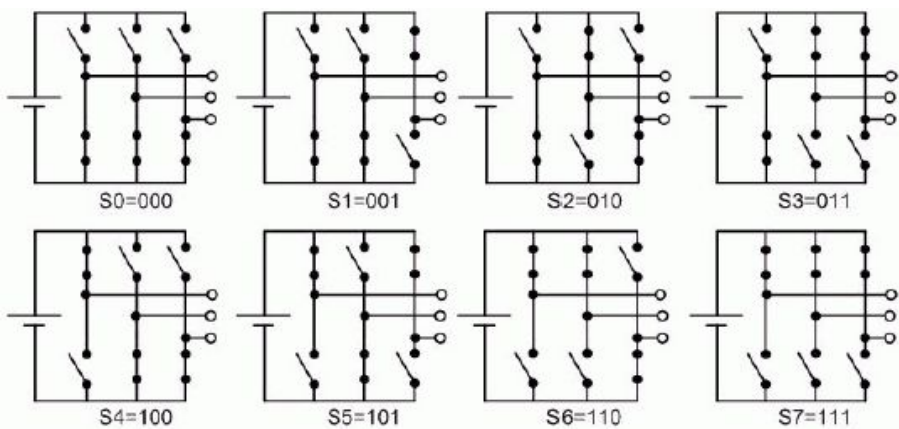


Типичный задающий каскад для вентильного электродвигателя

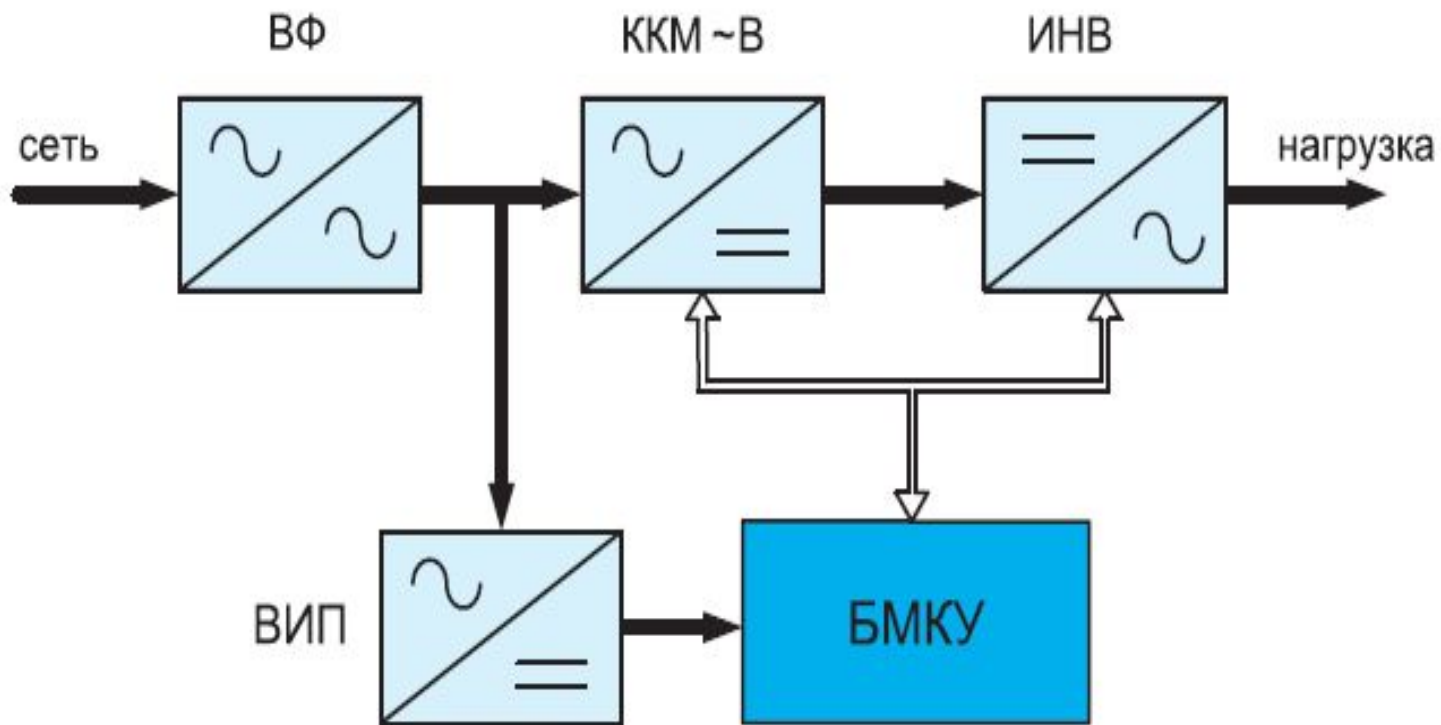
AVR494: Управление асинхронным электродвигателем переменного тока по принципу постоянства V/f и обычного ШИМ-управления



AVR495: Управление асинхронным электродвигателем переменного тока по принципу постоянства V/f и векторного ШИМ-управления



Прецизионный стабилизатор напряжения с двойным преобразованием энергии



Структурная схема СДП: ВФ – входной фильтр; ККМ-В – корректор коэффициента мощности – выпрямитель; ИНВ – ШИМ-инвертор; ВИП – вторичный источник питания; БМКУ – блок микроконтроллерного управления

Исследование свойств нейрорегуляторов в управлении электроприводом (МВТУ имени Баумана, 2012)

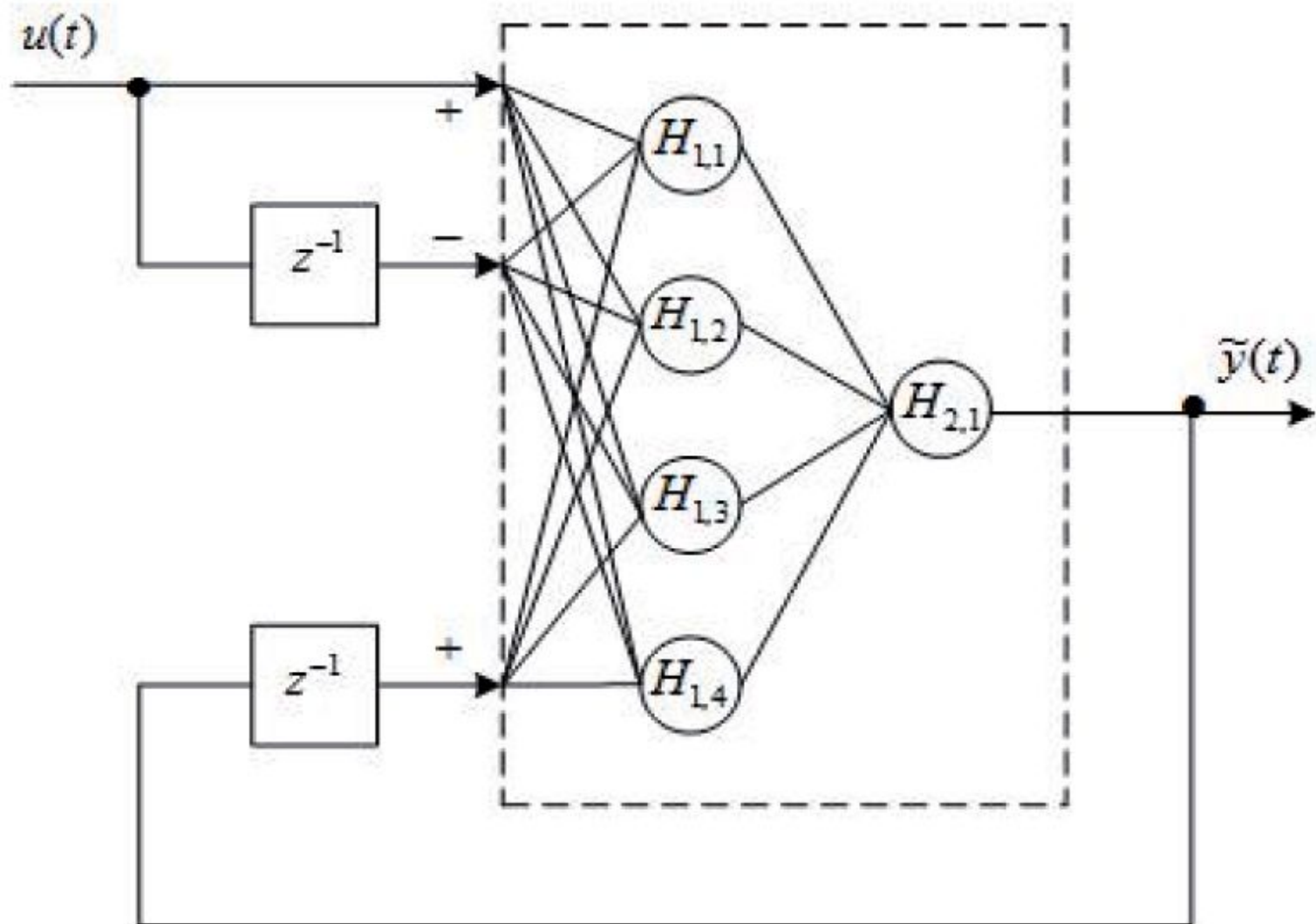


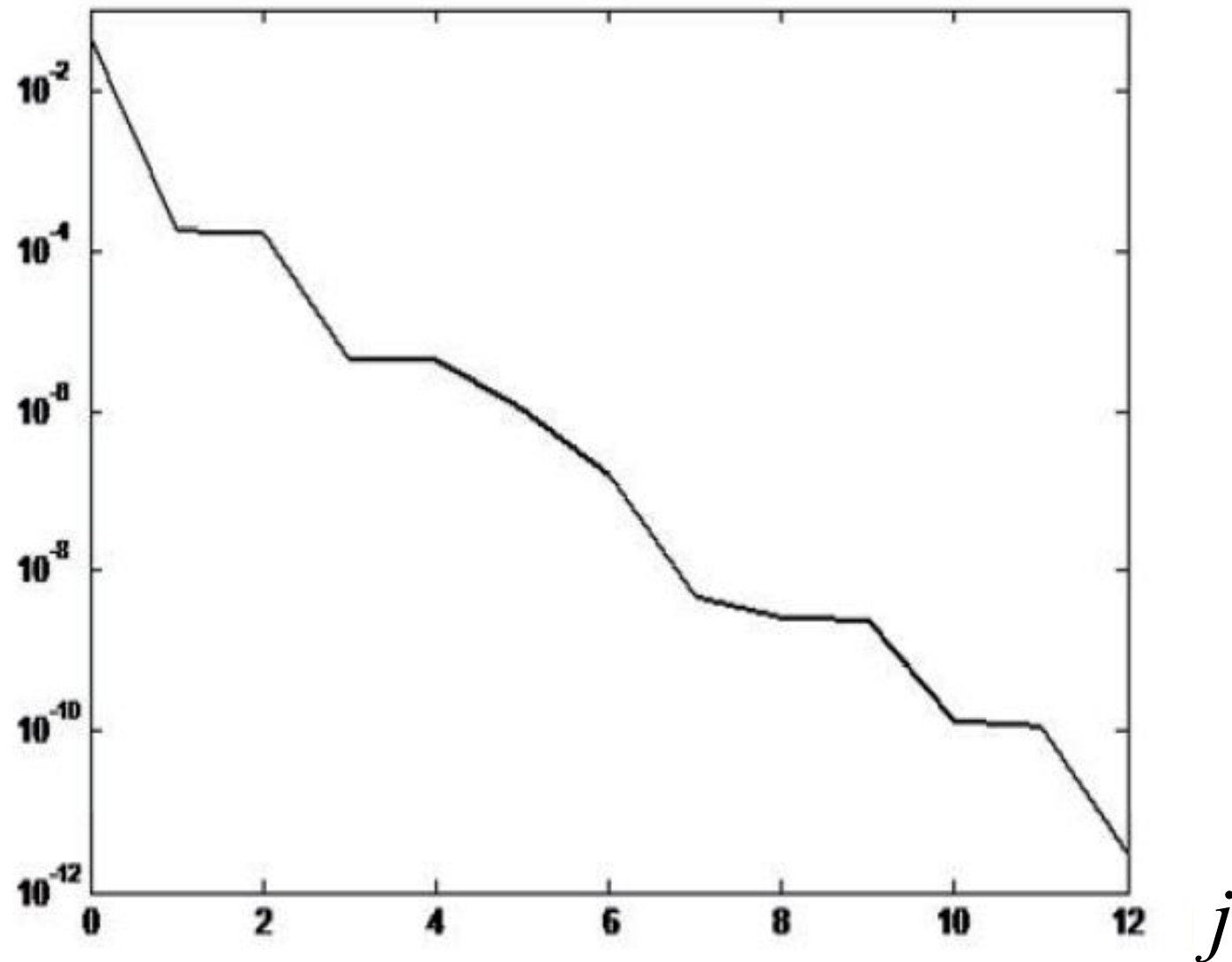
Рис. 6. Функциональная схема нейрорегулятора

Исследование свойств нейрорегуляторов в управлении электроприводом (МВТУ имени Баумана, 2012)

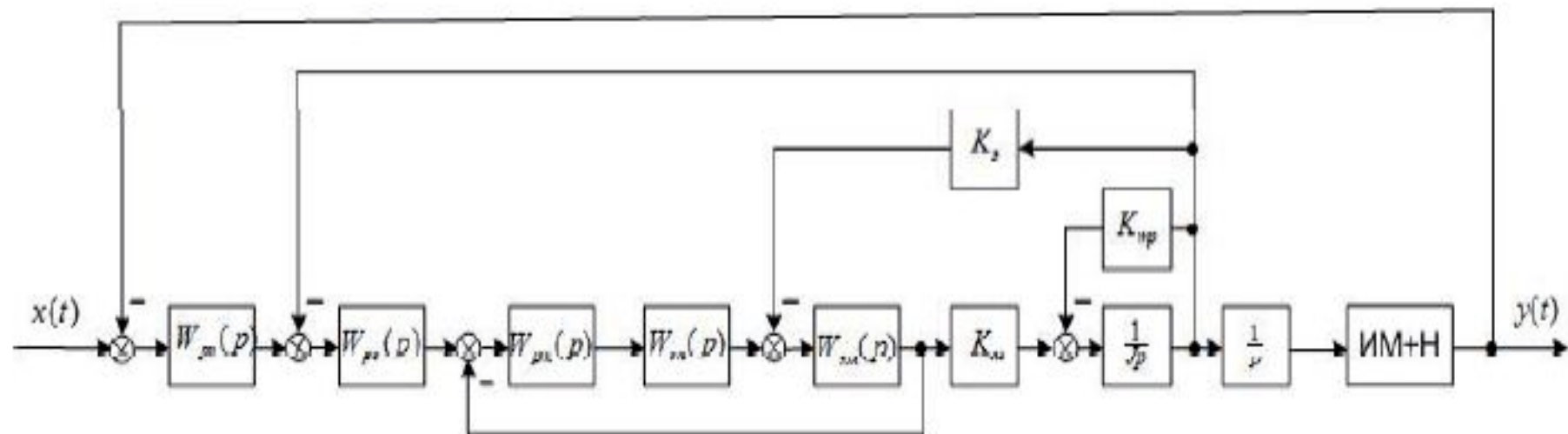


Рис. 5. Схема адаптивной нейросетевой САУ электроприводом с эталонной моделью:
1, 2, 3 – контуры угла поворота, тока и скорости соответственно

Исследование свойств нейрорегуляторов в управлении электроприводом (МВТУ имени Баумана, 2012)



Изменение ошибки в процессе обучения нейрорегулятора: j – число эпох обучения



1. Структурная схема САУ электроприводом

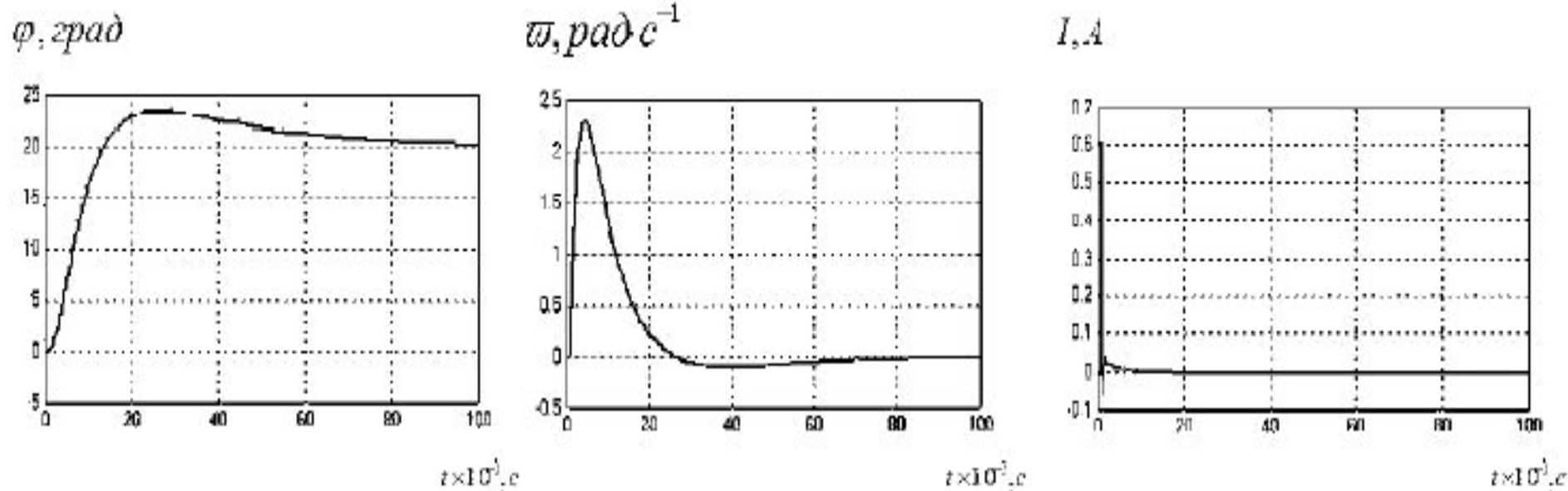
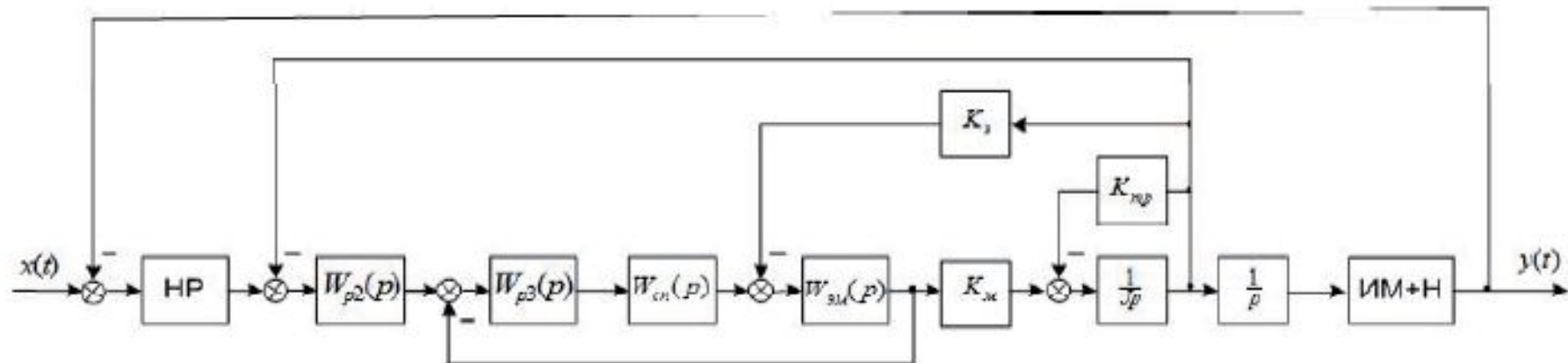
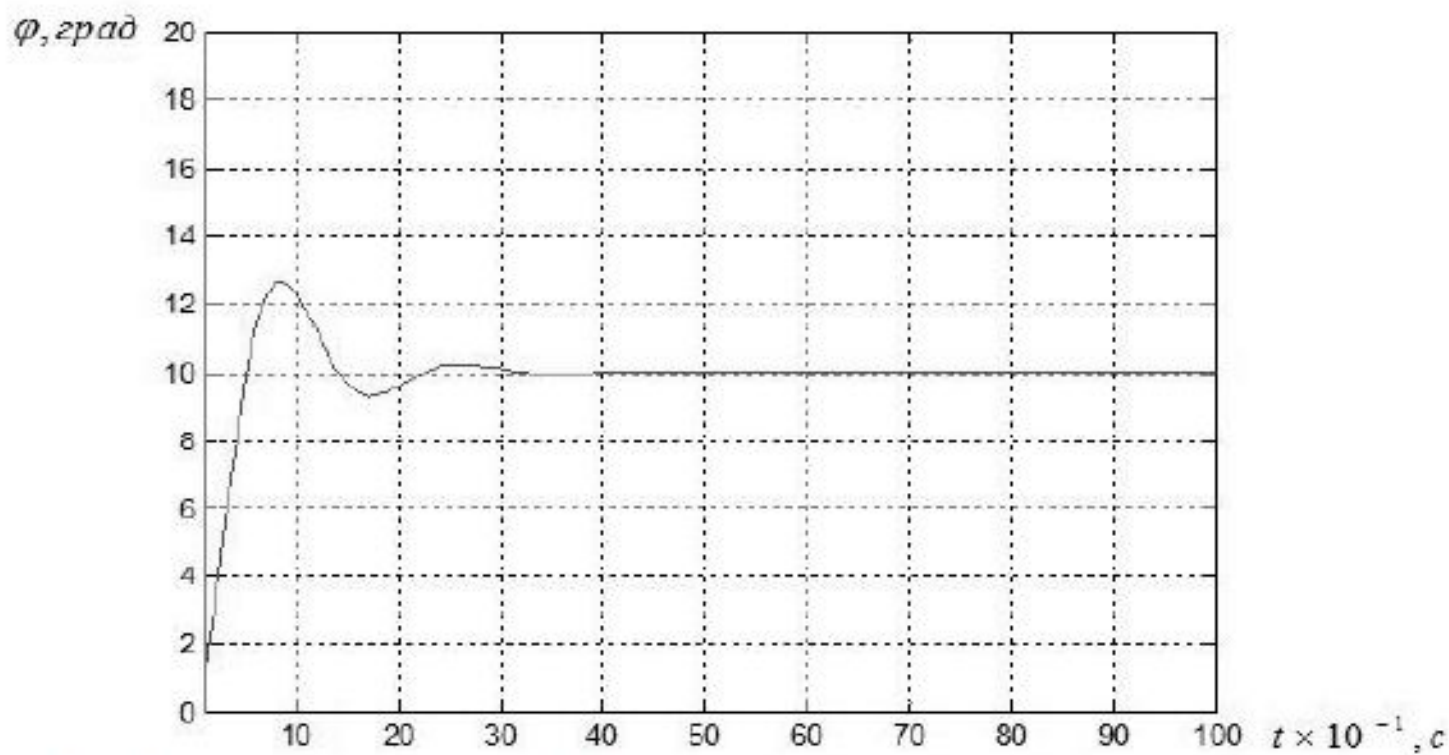


Рис. 3. Переходные процессы в САУ электроприводом: параметры механической передачи не меняются во времени

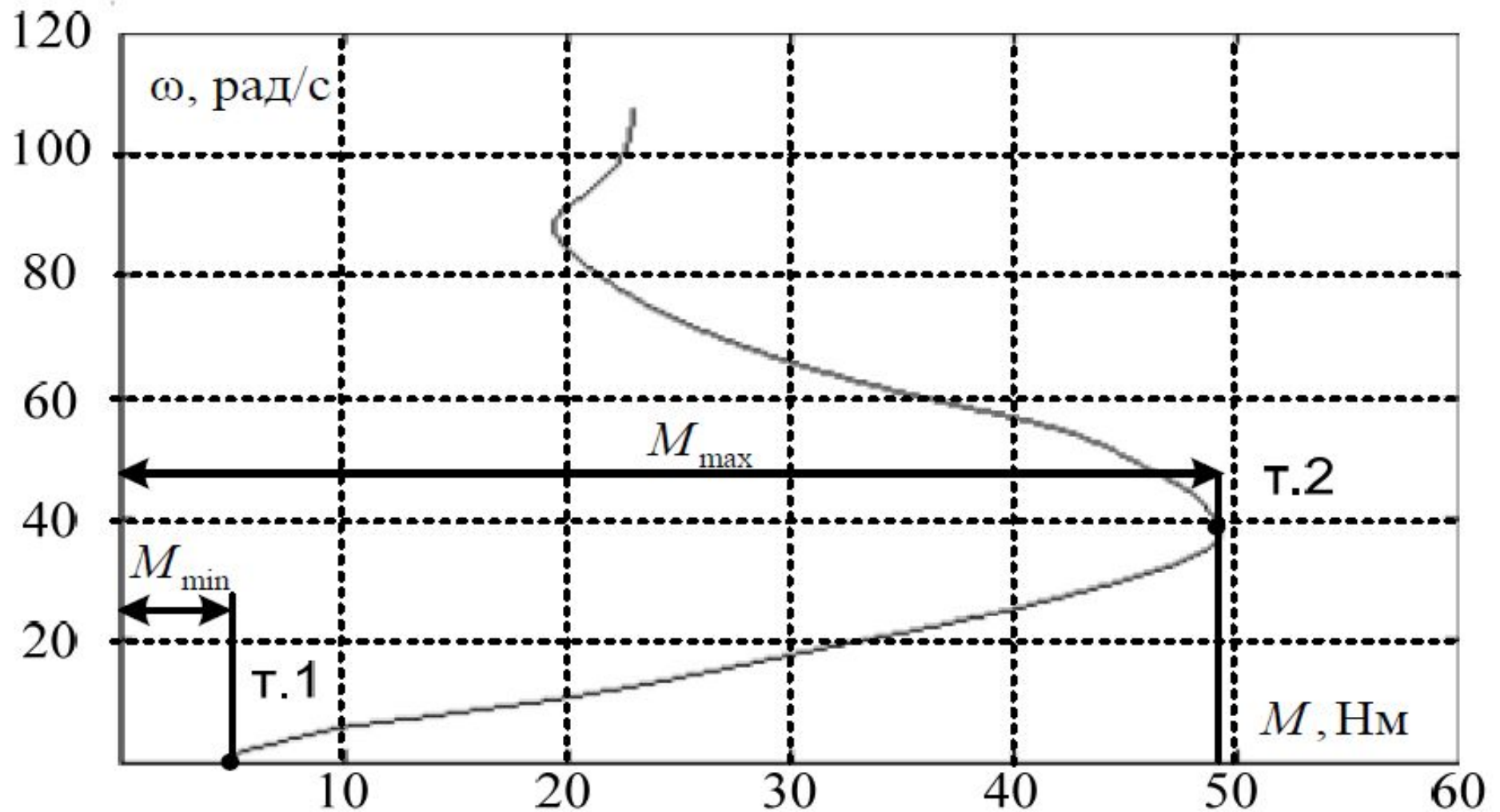


Структурная схема САУ электроприводом с путевым нейрорегулятором



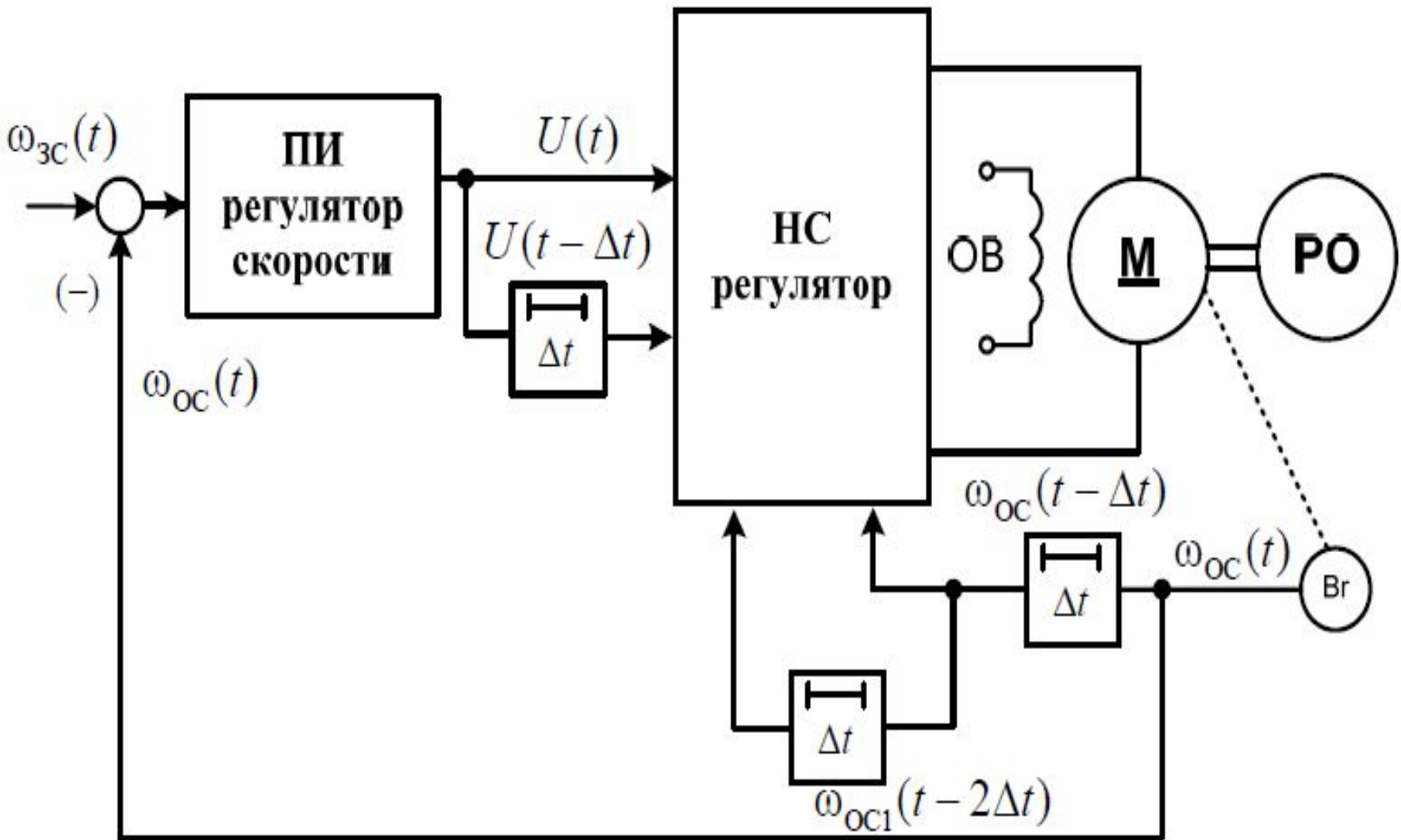
Переходный процесс в САУ электроприводом с путевым нейрорегулятором

Исследование свойств нейрорегуляторов в управлении электроприводом (ТИАСУР, 2012)



. Зависимость момента сопротивления от скорости

Исследование свойств нейрорегуляторов в управлении электроприводом (ТИАСУР, 2012)



Структурная схема электропривода постоянного тока с независимым возбуждением, работающего на нагрузку типа «пара трения»