

# 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),<sub>3</sub> 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)

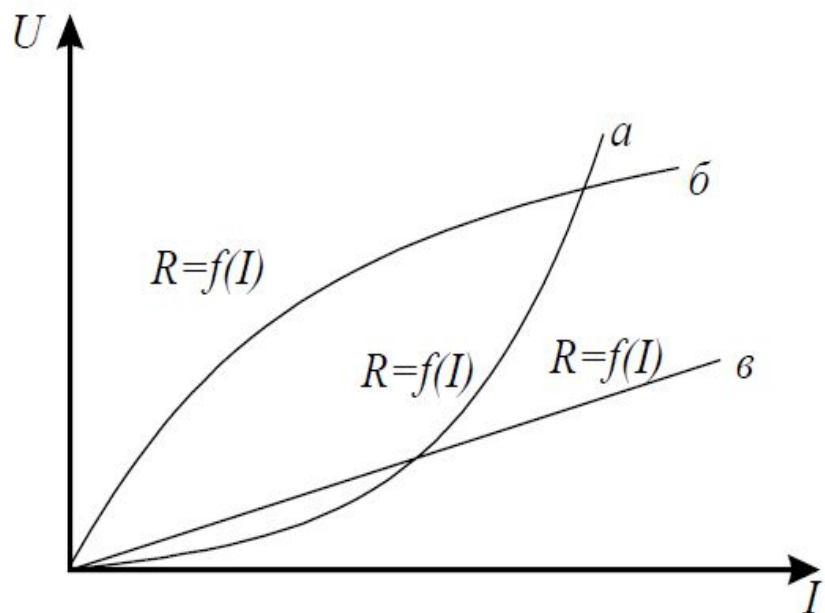
# Резистивные элементы

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

$T_0$  – начальная температура проводника, К;

$T$  – конечная температура проводника, К;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.




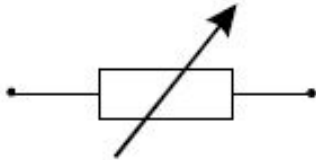
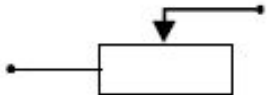

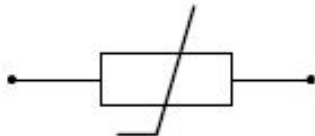
– Общий вид ВАХ металлического (а), полупроводникового (б), и константанового (в) резистивных элементов.

# 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

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

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

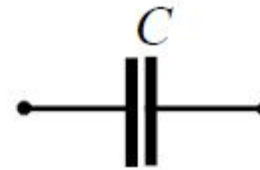
где  $L$  – индуктивность элемента, Гн. где  $C$  – емкость элемента, Ф.

Условное обозначение в схемах электрических цепей:

идеального индуктивного элемента:



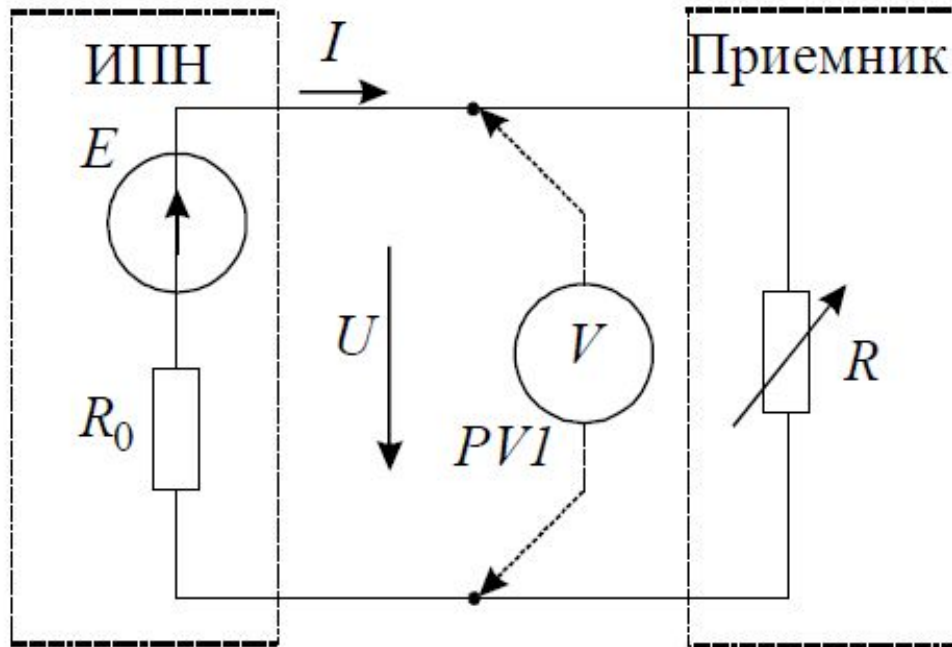
идеального емкостного элемента:



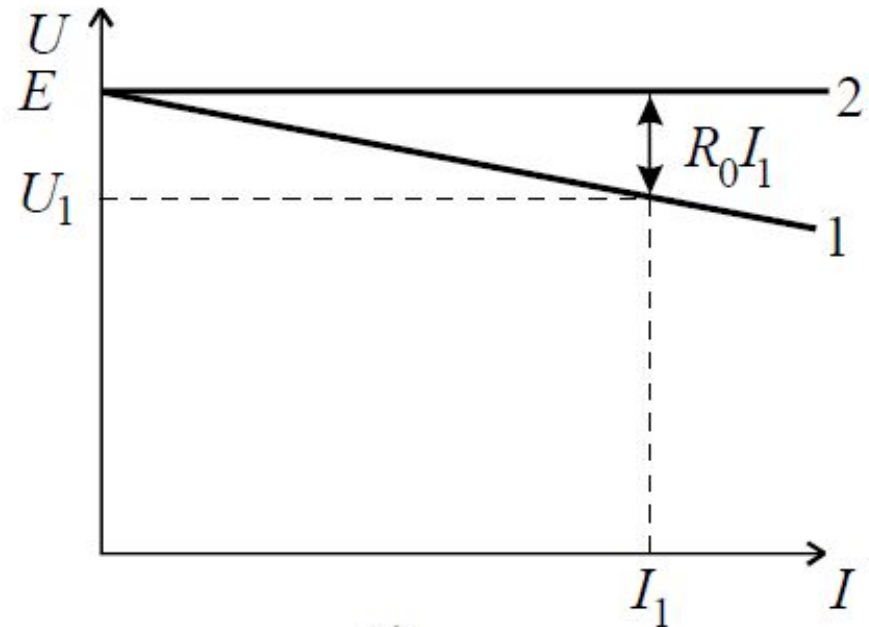
# Источник постоянного напряжения

Источник 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

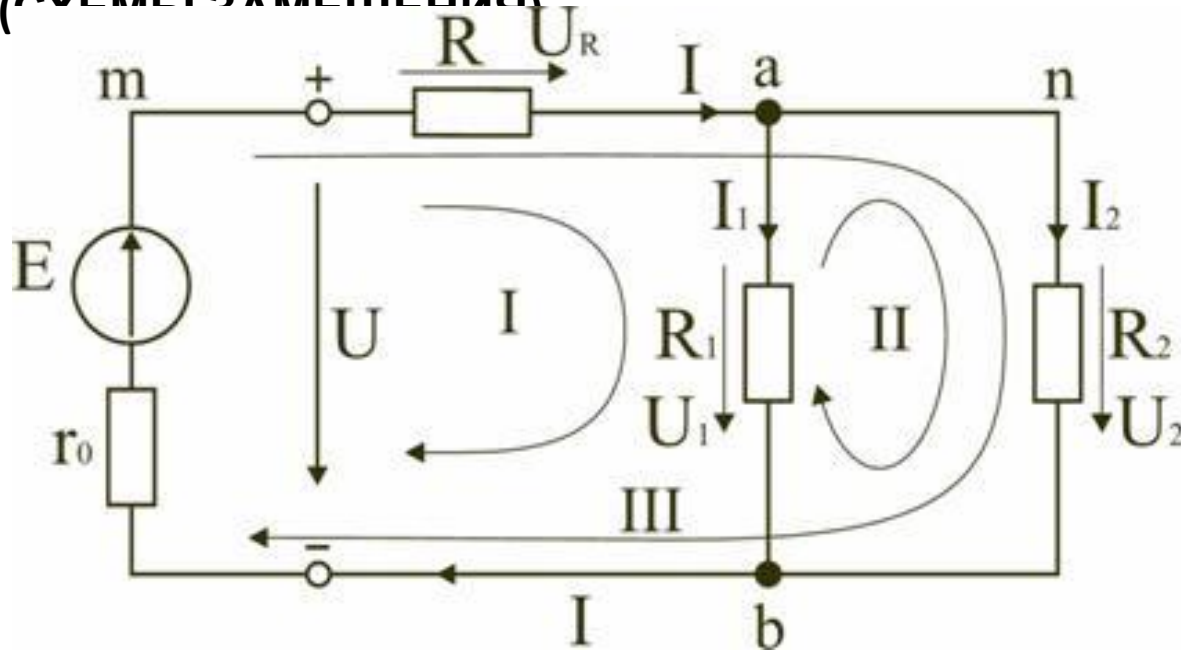
- Первые шаги электротехники были связаны с освоением энергии постоянного тока, которая вырабатывалась гальваническими элементами.
- В настоящее время основными источниками постоянного тока (ИПТ) являются выпрямительные преобразователи (выпрямители), химические аккумуляторы, электромашинные генераторы 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 <sup>12</sup> 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)

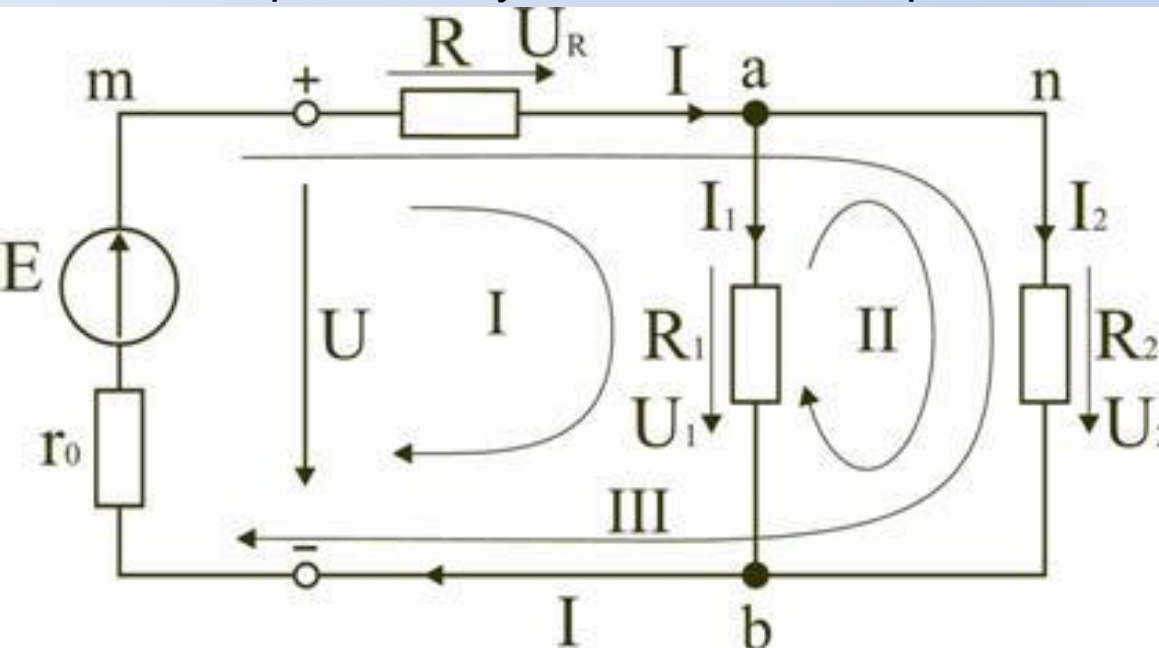


**ВЕТВЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ (СХЕМЫ)** – участок цепи с одним и тем же током. Ветвь может состоять из одного или нескольких последовательно соединенных элементов. Схема на рис. имеет три ветви: ветвь  $bma$ , в которую включены элементы  $r_0, E, R$  и в которой возникает ток  $I$ ; ветвь  $ab$  с элементом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



находятся в параллельных **КОНТУР** – любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям. В схеме можно выделить три контура: I –  $bmab$ ; 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*

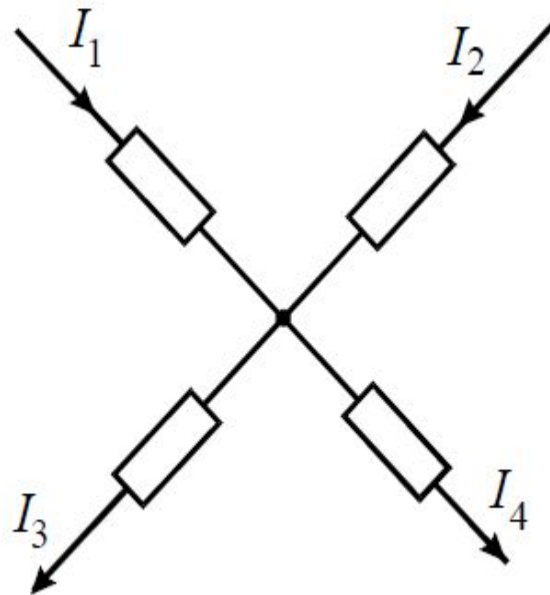
- ПЕРВЫЙ ЗАКОН КИРХГОФА
- ВТОРОЙ ЗАКОН КИРХГОФА
- РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ВДОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ
- ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЯ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
- ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ



# ПЕРВЫЙ ЗАКОН КИРХГОФА

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

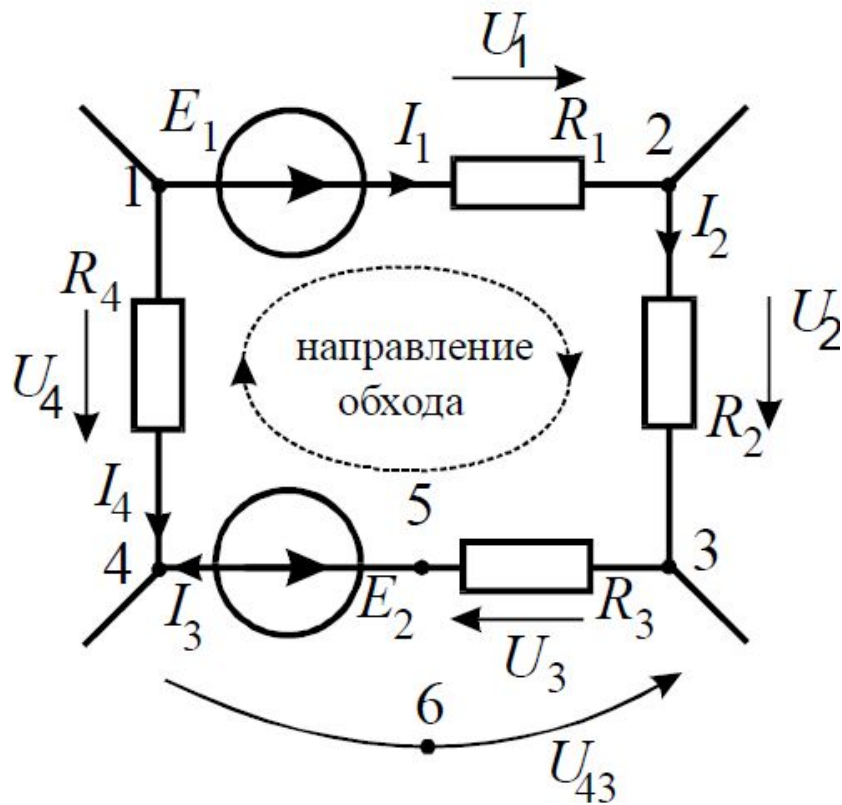
Всем токам, направленным *от узла*, в уравнении (2.1) приписывается одинаковый знак, например, *положительный*, тогда все токи, направленные *к узлу*, войдут в уравнение с *отрицательным* знаком.



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

# 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

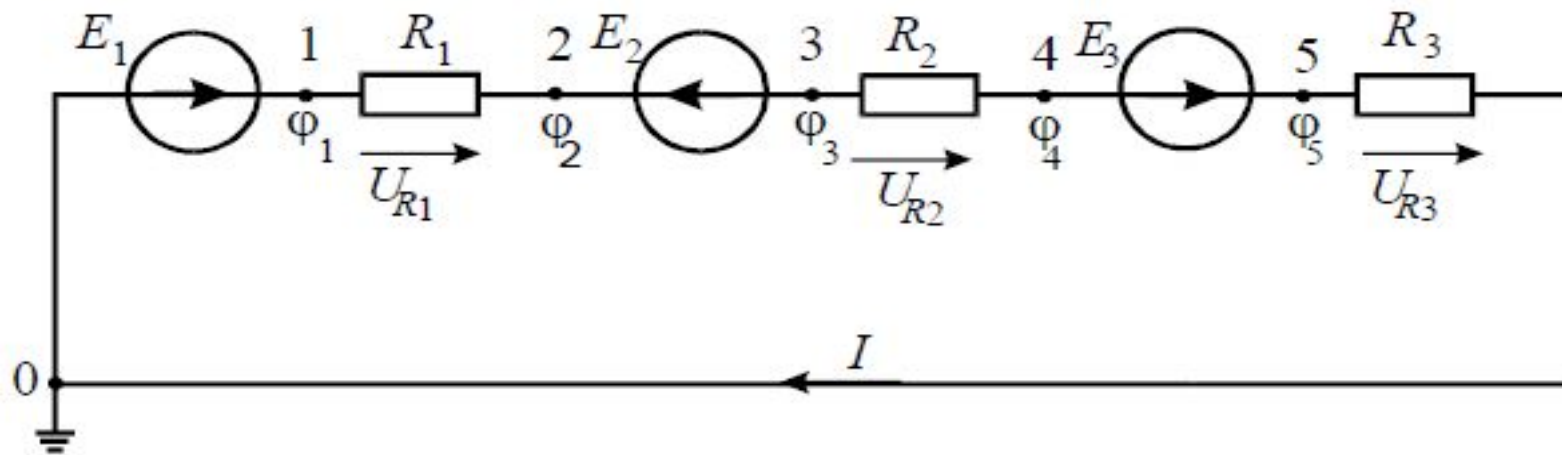
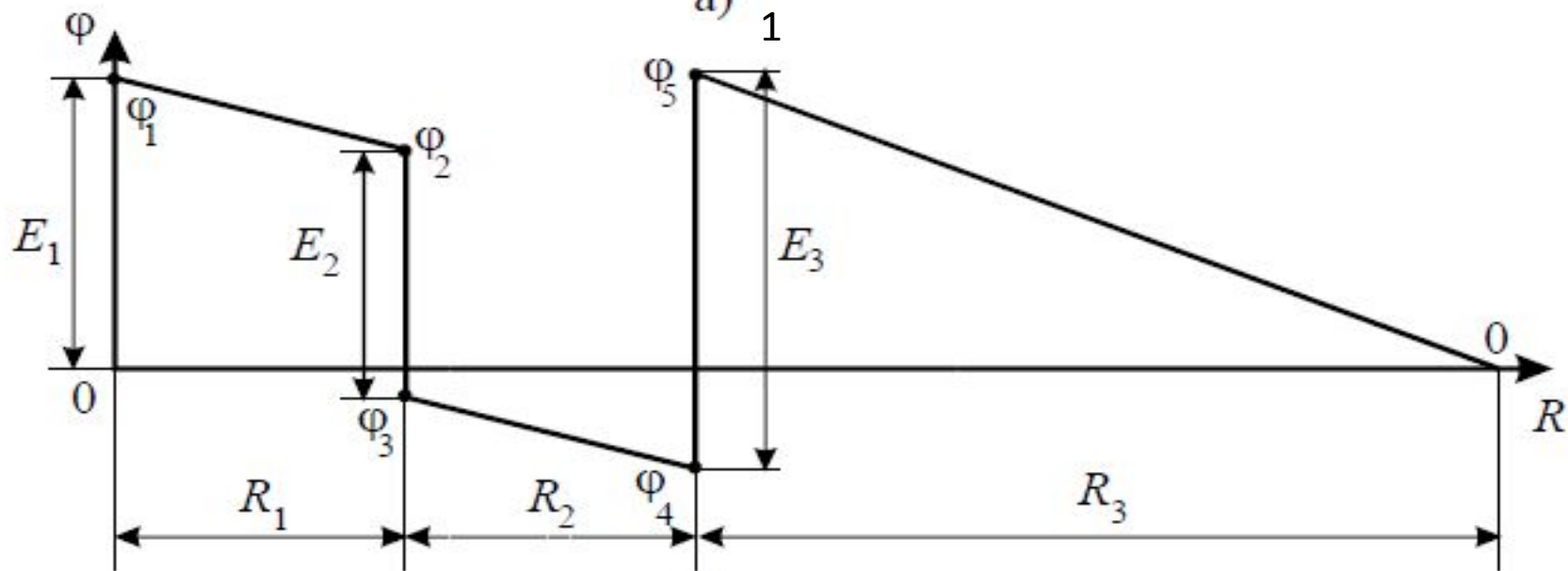


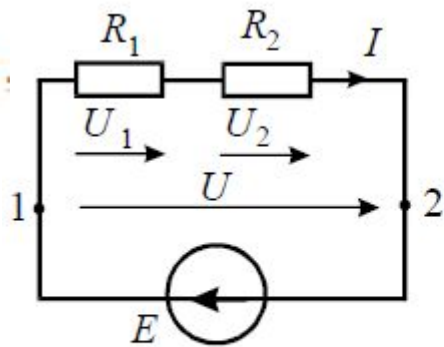
Рис.6.



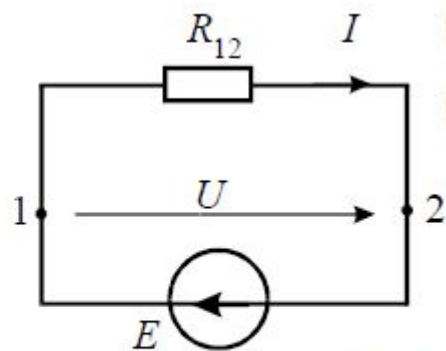
б) Рис.6.

# Последовательное и параллельное соединения резистивных элементов

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



а) Рис. 7.1



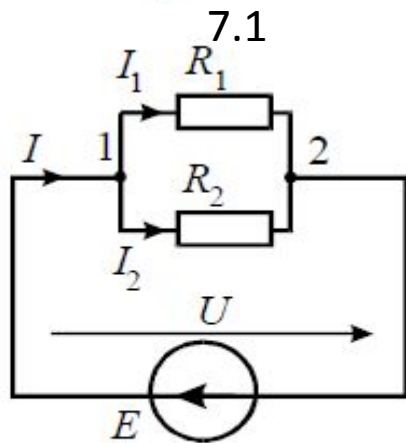
б) Рис. 7.2

$$U = IR_1 + IR_2;$$

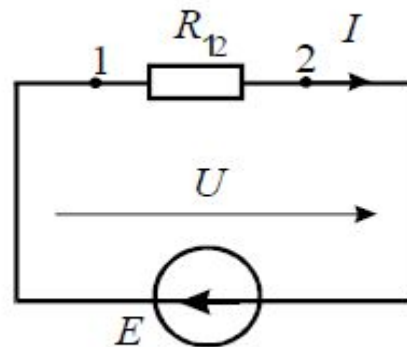
$$U = I(R_1 + R_2) = IR_{12}, \quad (7.2)$$

$$R_{1,2,\dots,n} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (7.3)$$

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



а) Рис. 7.3



б) Рис. 7.4

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

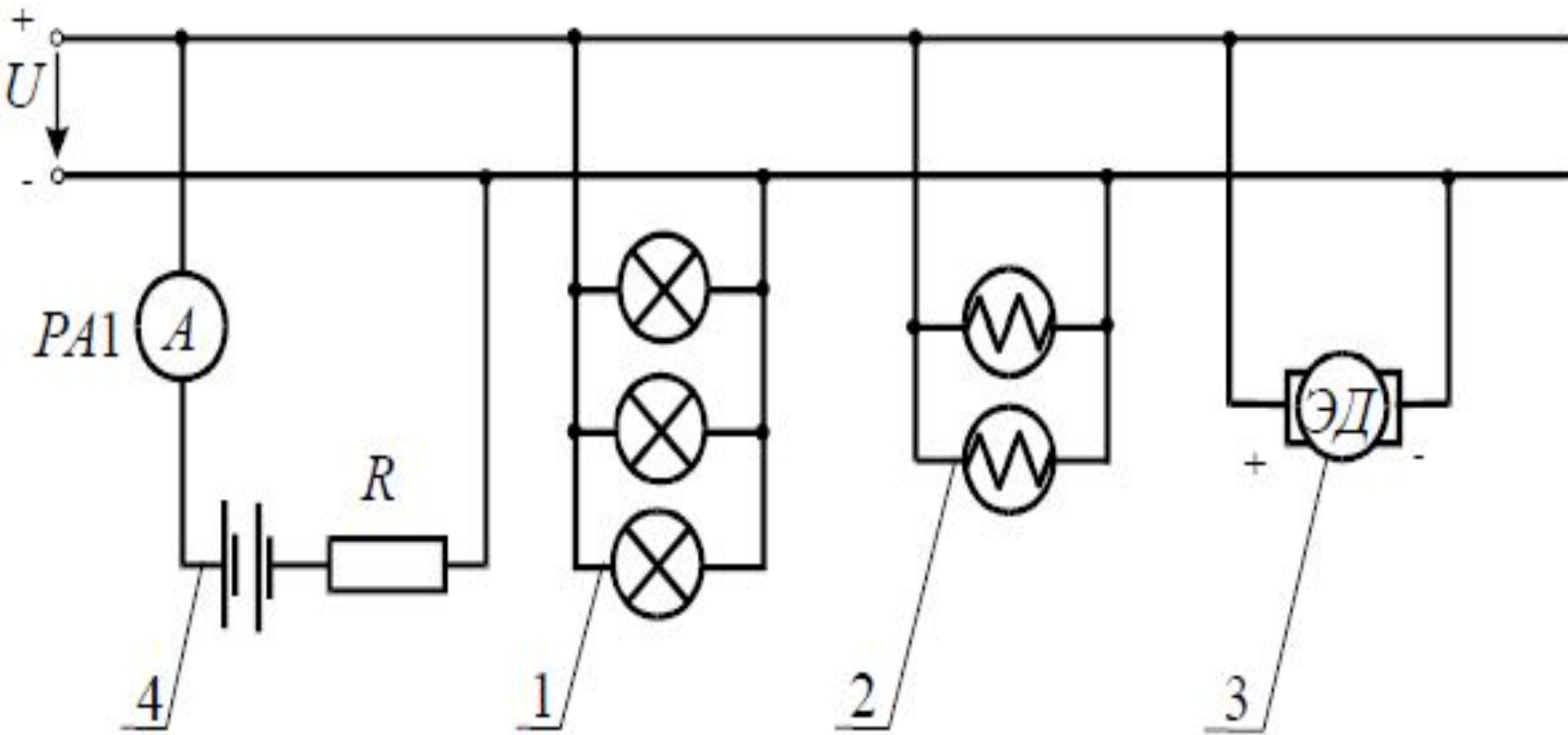
$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

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

(7.5)

$$(7.6) \quad G_{1,2,\dots,n} = G_1 + G_2 + \dots + G_n$$

# Схема ЭЦ с параллельно включенными приемниками электрической энергии



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

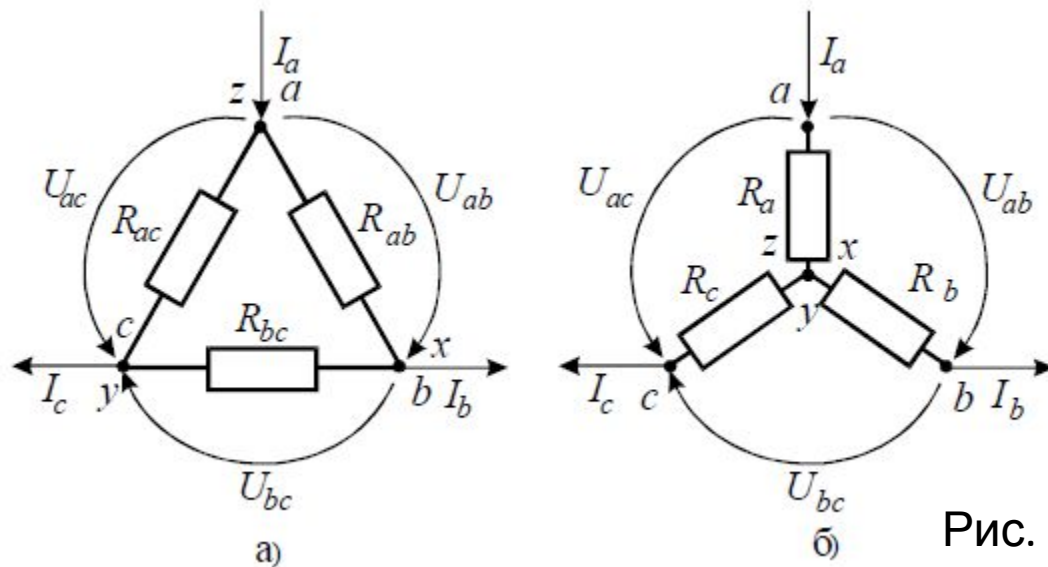
Рис.  
8.1

# 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



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

Рис. 9.1

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

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

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

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

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

# 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=10<sup>3</sup> Вт), 1 мегаватт (1 МВт=10<sup>6</sup> Вт), 1 киловатт-час (1

$$W = I^2 R t \quad (10.1)$$

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

$$W = UI t .$$

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

$$P_u = -E \cdot I$$

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

$$(10.3) \quad P_{np} = \frac{U^2}{R} = U^2 G;$$

$$P_{np} = UI .$$

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

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



# 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

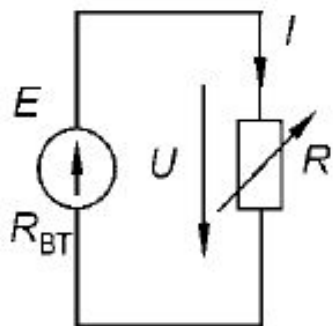


Рис.12.

1

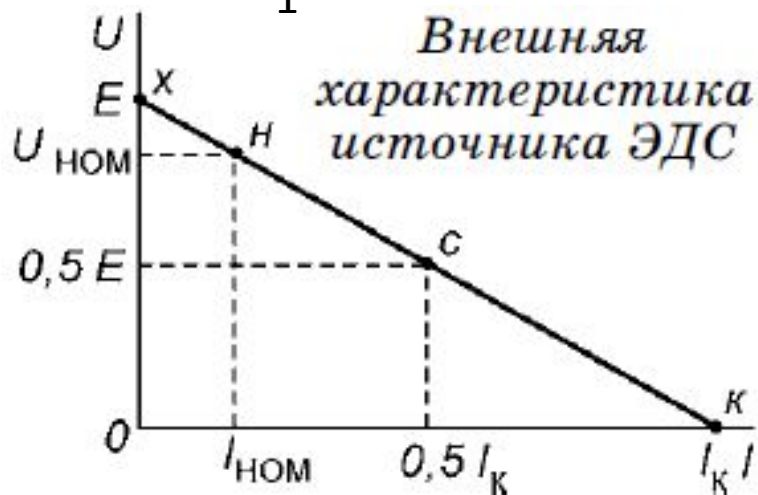


Рис.12.

2

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

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

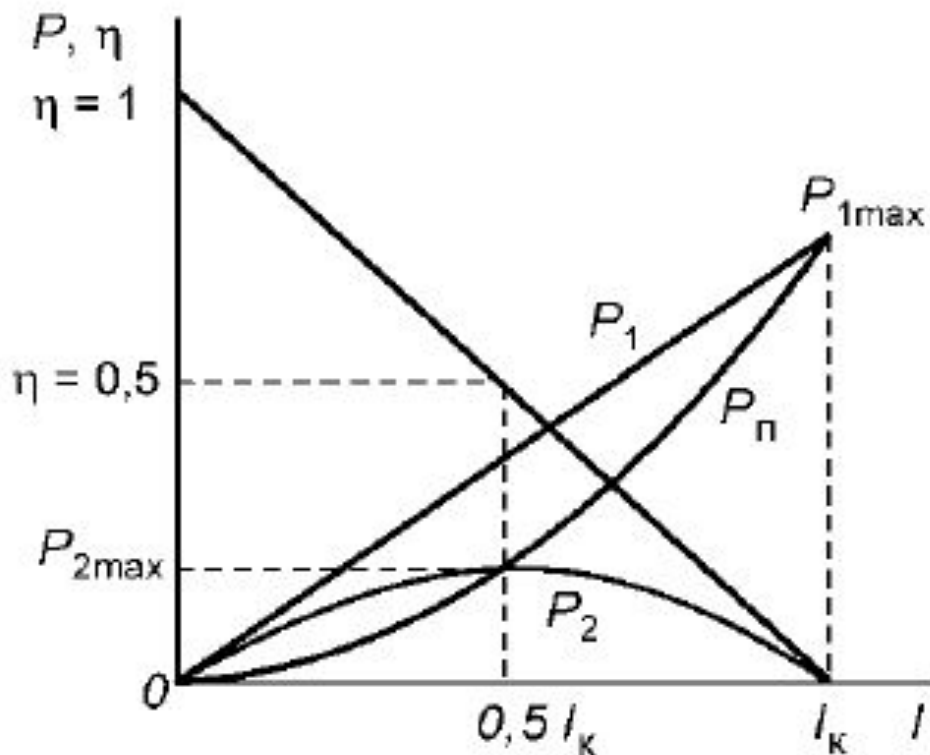
$$U = E - R_{\text{BT}}I \quad (12.3)$$

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

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

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В ЦЕПЯХ

## ТОКА



*Энергетические зависимости  
в цепях постоянного тока*

$$P_2 = P_1 - P_{\Pi} = EI - R_{\text{BT}}I^2$$

$$\frac{dP_2}{dI} = E - 2R_{\text{BT}}I = 0$$

$$R = R_{\text{BT}}$$

$$I = \frac{E}{2R_{\text{BT}}} = I_c = 0,5I_k$$

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

$$P_{1c} = EI_c = \frac{E^2}{2R_{\text{BT}}}$$

$$\eta_c = P_{2c}/P_{1c} = 0,5$$

# Лекция №4

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

# Метод эквивалентных

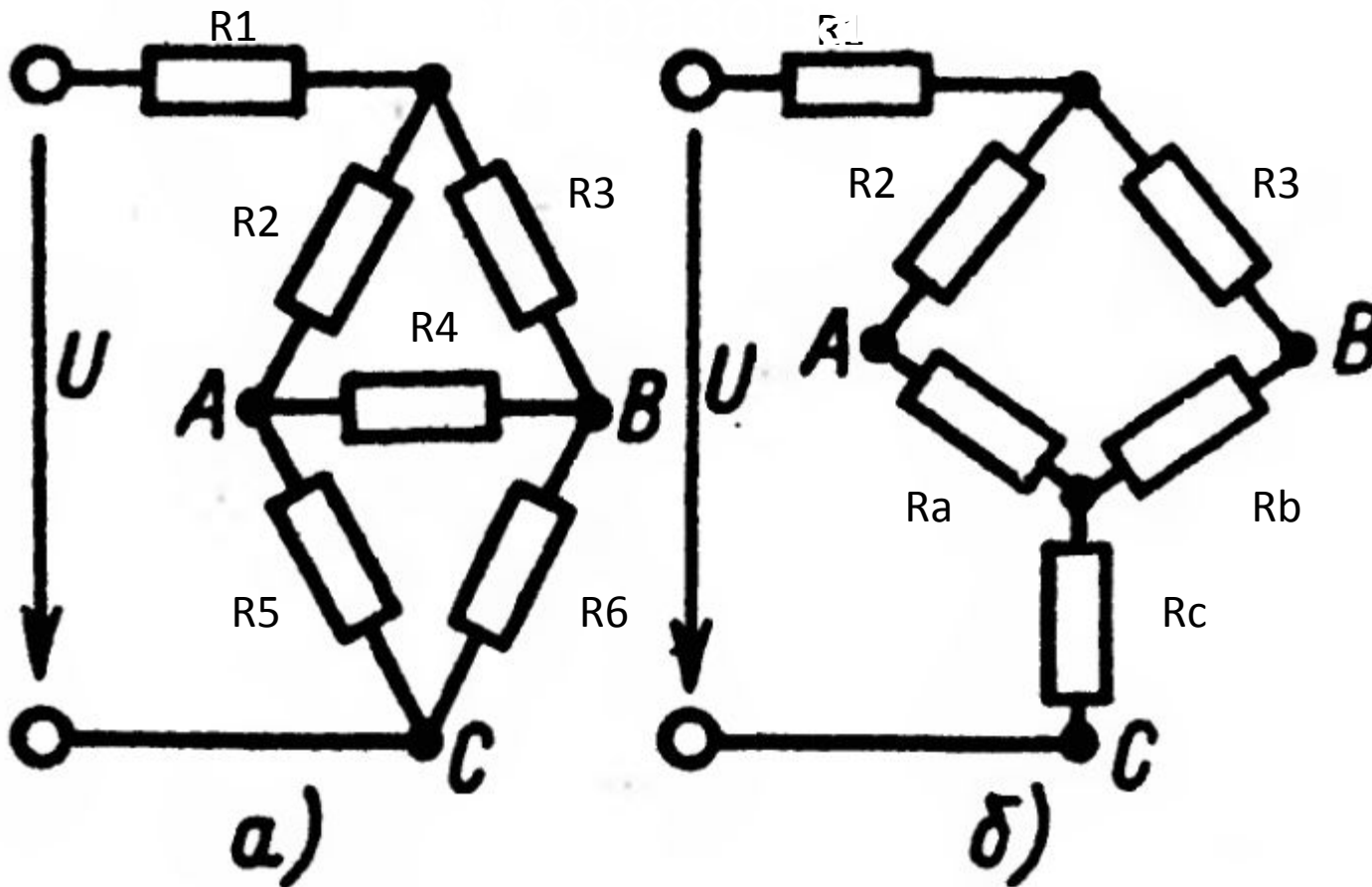


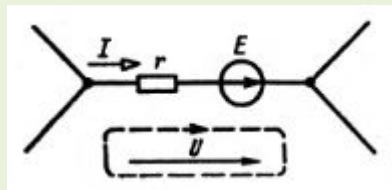
рис. 15а) Исходная электрическая цепь

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)

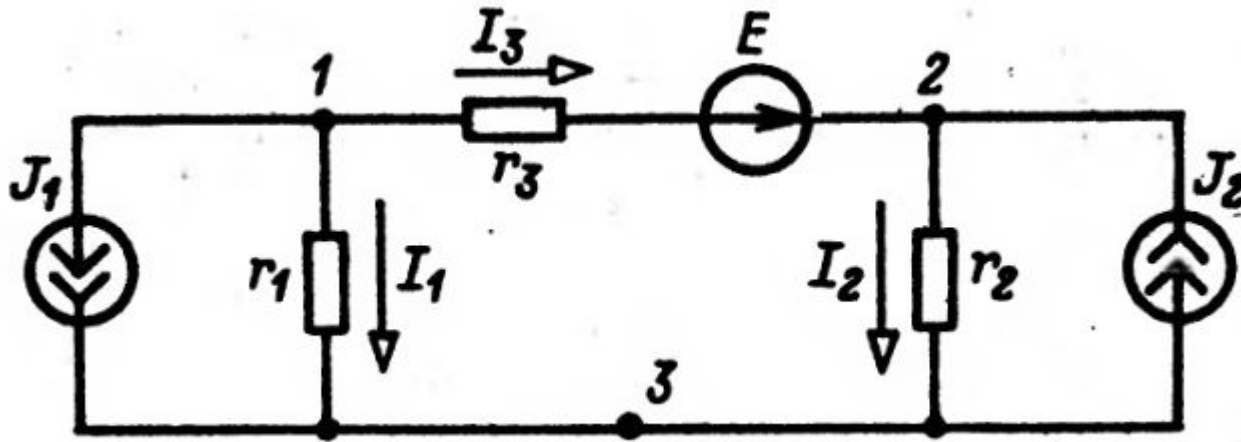


Рис.

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)

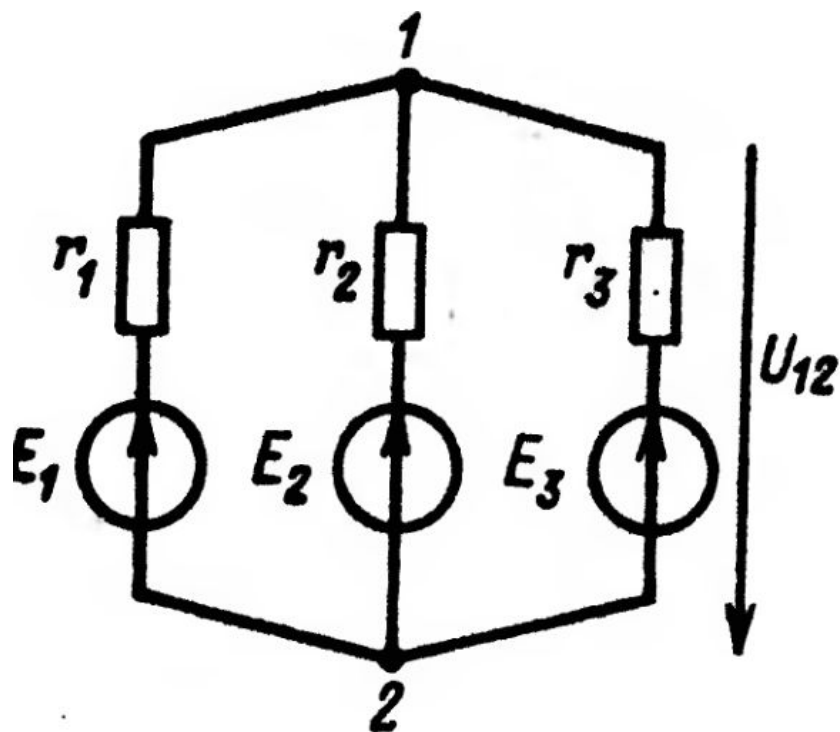
Рис.

17.2

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

# 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)

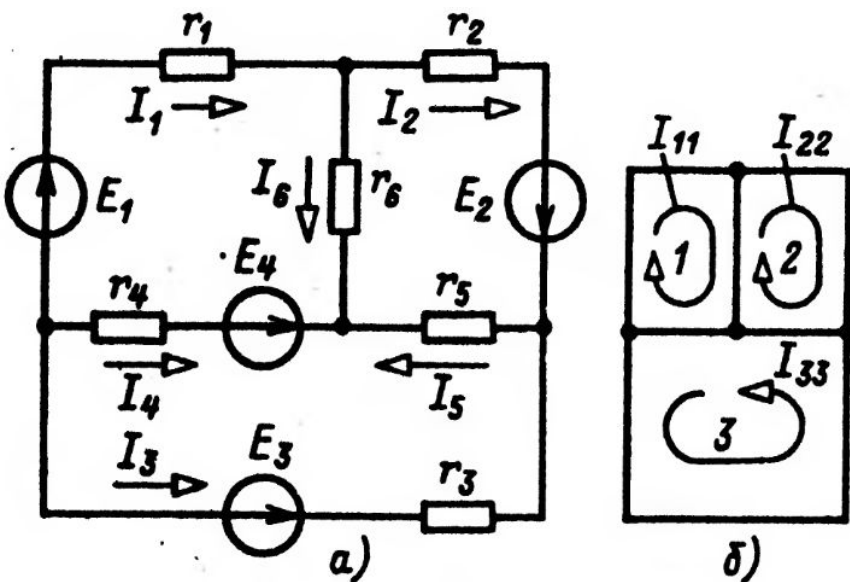


Рис.  
20.1

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)

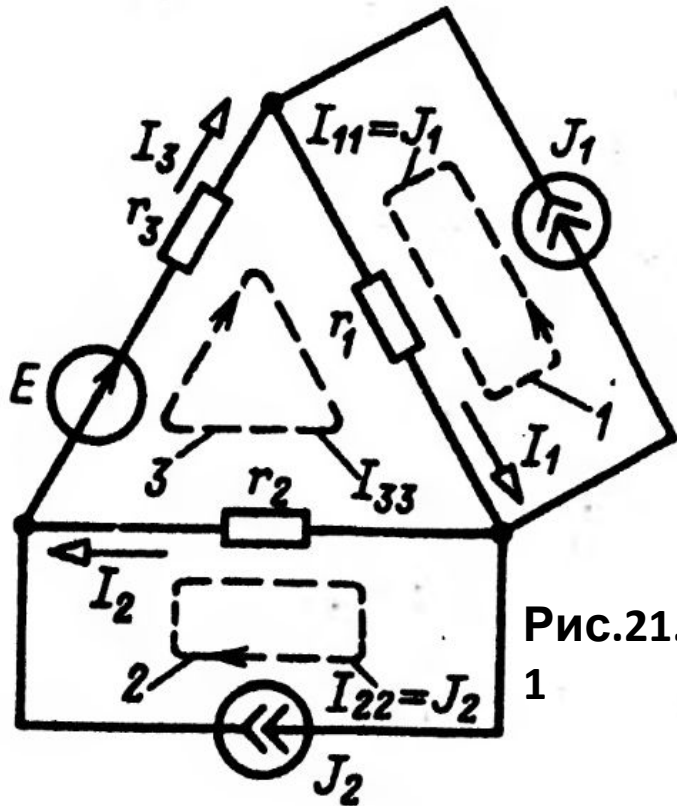


Рис.21.  
1

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  $B$  ветвями,  $B_j$  из которых содержат источники тока, число независимых контуров без источников тока и соответствующих им неизвестных контурных токов равно  $K = B - B_j - Y + 1$ . В цепи на схеме число ветвей  $B = 5$ , ветвей с источниками тока  $B_j = 2$ , узлов  $Y = 3$ , независимых контуров без источников тока  $K = B - B_j - Y + 1 = 5 - 2 - 3 + 1 = 1$  (контур 3). Уравнение по второму закону Кирхгофа для контура 3 при выбранных

включениях контурных токов:

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

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

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

# Метод эквивалентного генератора (активного двухполюсника)

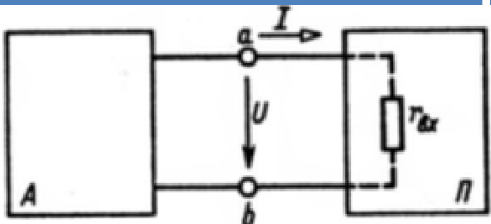
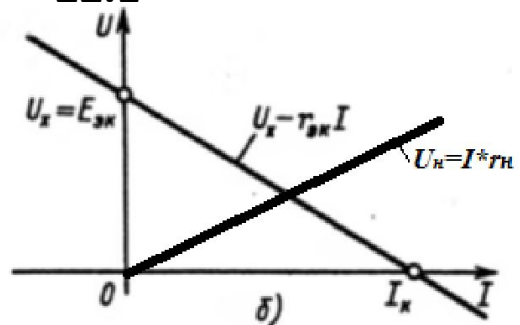
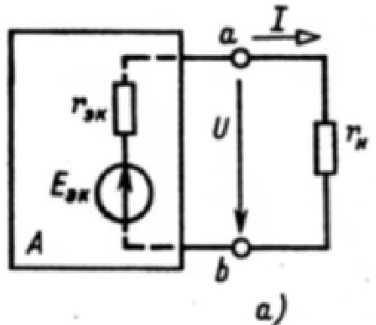


Рис. 22.1

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

$$U = U_X - r_{ЭК} I \quad (22.1)$$

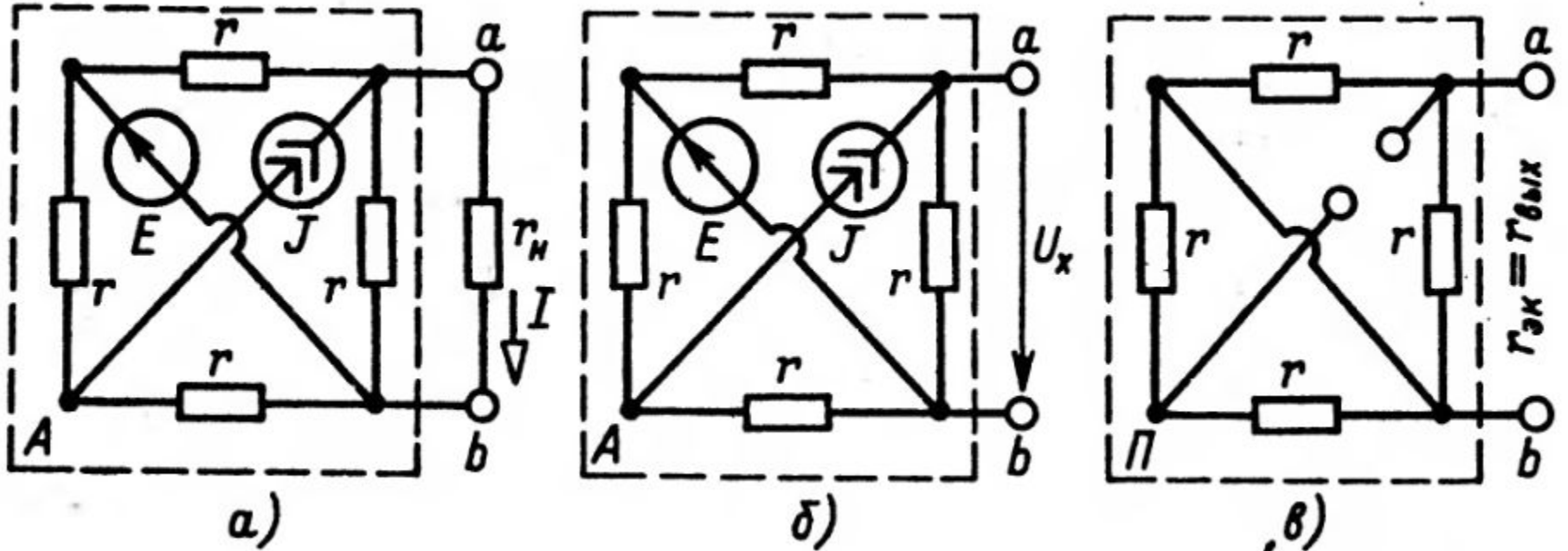


$$r_{ЭК} = r_{ВЫХ} = U_X / I_К \quad (22.2)$$

Рис. 22.2

$$I = \frac{E_{ЭК}}{r_n + r_{ЭК}} = \frac{U_X}{r_n + r_{ВЫХ}} \quad (22.3)$$

# Метод эквивалентного генератора (активного двухполюсника)



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

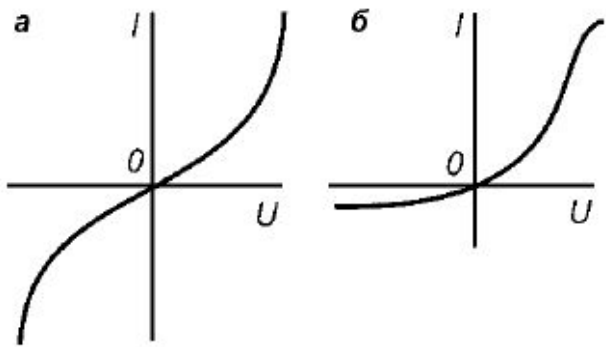
$$r_{\text{вых}} = r/2 \quad (23.2)$$

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

Рис. 23.1 Эквивалентные преобразования сложной цепи

# Лекция 5

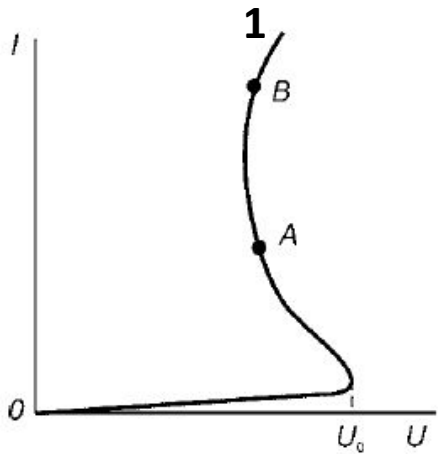
- **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА**
- **МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ЦЕПЕЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ  
ЭЛЕМЕНТАМИ**
- **ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ, ОСНОВНЫЕ  
ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ**



Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов

*a* — симметричная; *b* — несимметричная.

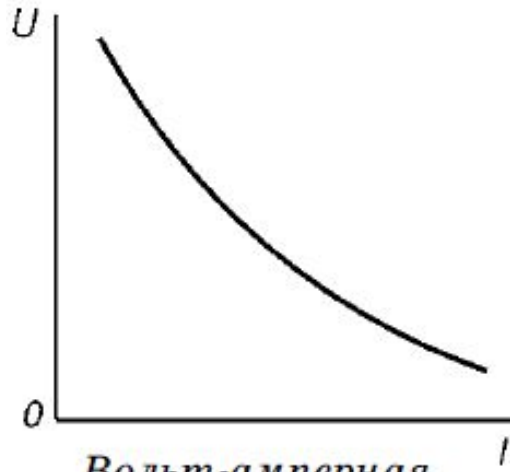
**Рис.24.**



Вольт-амперная характеристика лампы с тлеющим разрядом

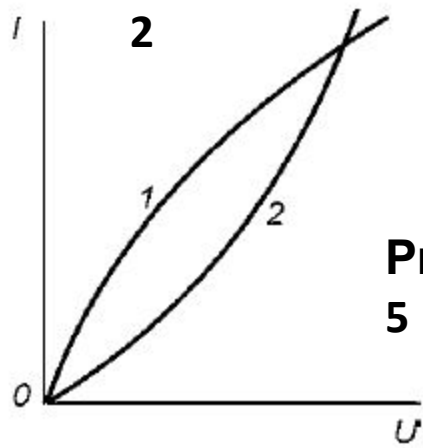
**Рис.24.**

4



Вольт-амперная характеристика электрической дуги

**Рис.24.**

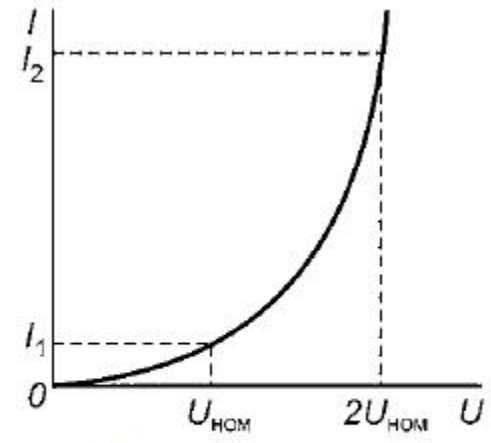


Вольт-амперные характеристики ламп накаливания

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

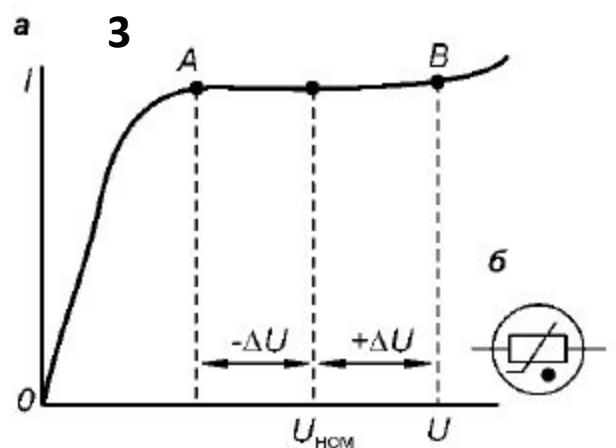
**Рис.24.**

5



Вольт-амперная характеристика тиристового элемента

**Рис.24.**

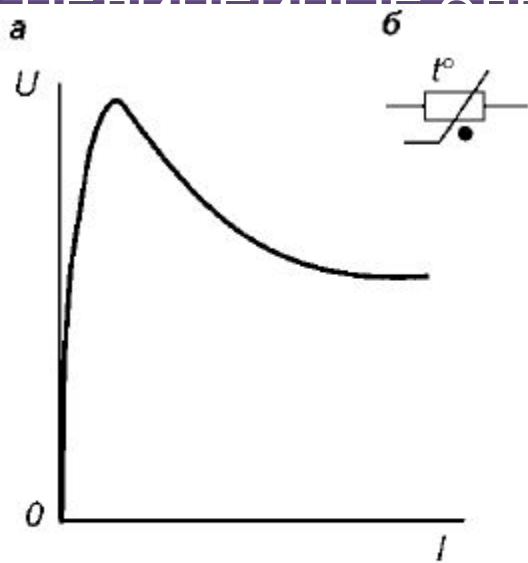


Барреттер

**Рис.24.**

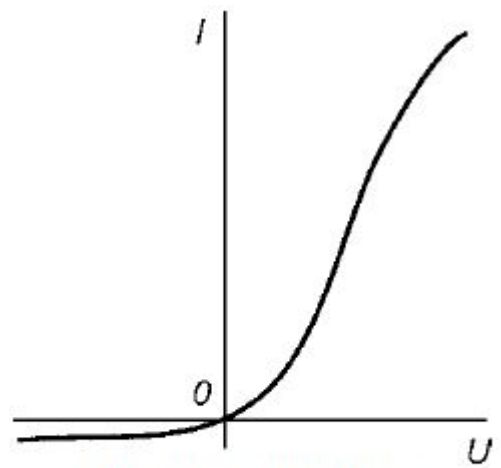
6

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

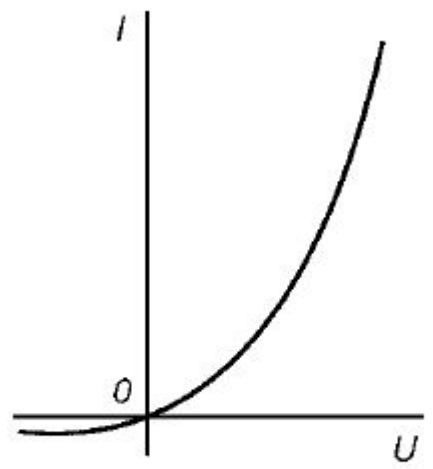


**Термистор**

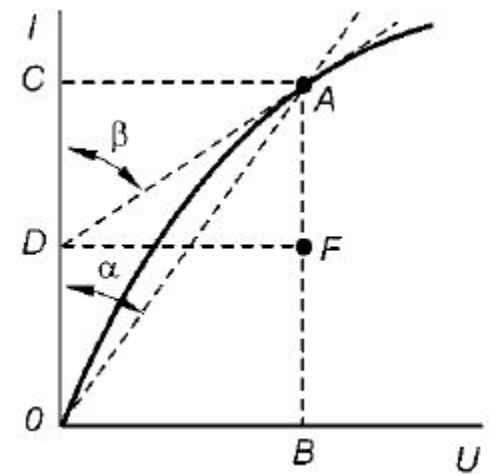
*a* — вольт-амперная характеристика; *b* — условное обозначение на электрических схемах.



*Вольт-амперная характеристика электронной лампы (диода)*



*Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода*



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

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

$$R_{диф} = \frac{dU}{dI} = \frac{m_u |DF|}{m_i |FA|} = m_R \operatorname{tg} \beta, \quad (25.2)$$



# 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.

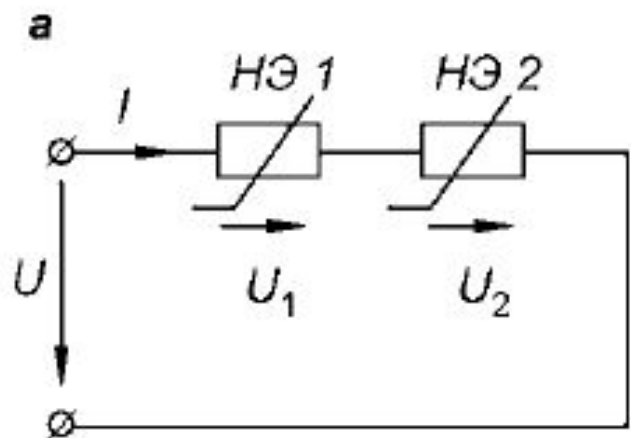


Рис.26.

1  
Последовательное соединение  
нелинейных элементов

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

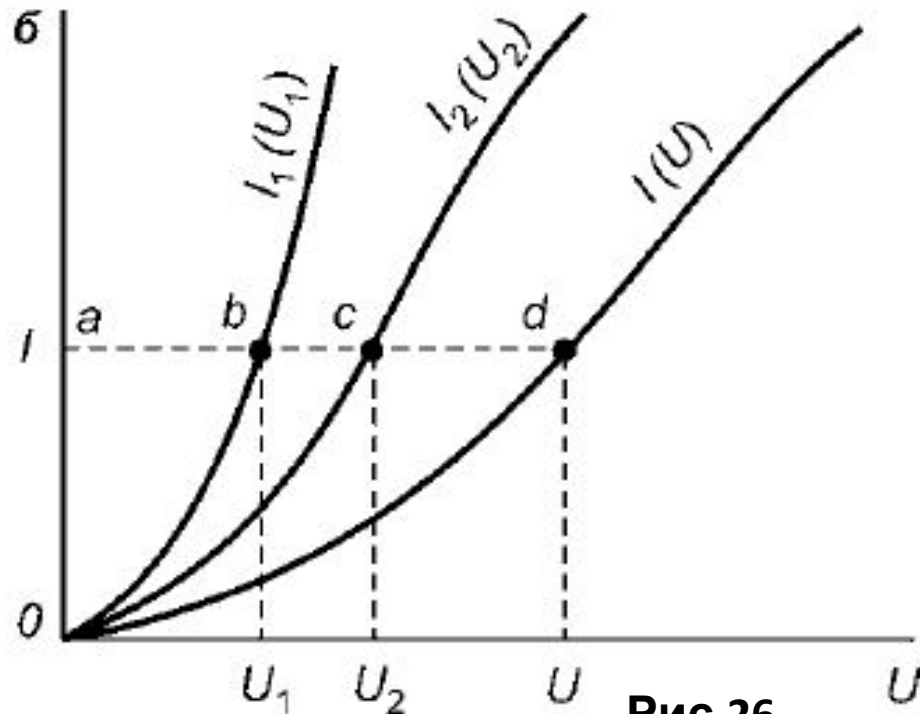


Рис.26.

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.

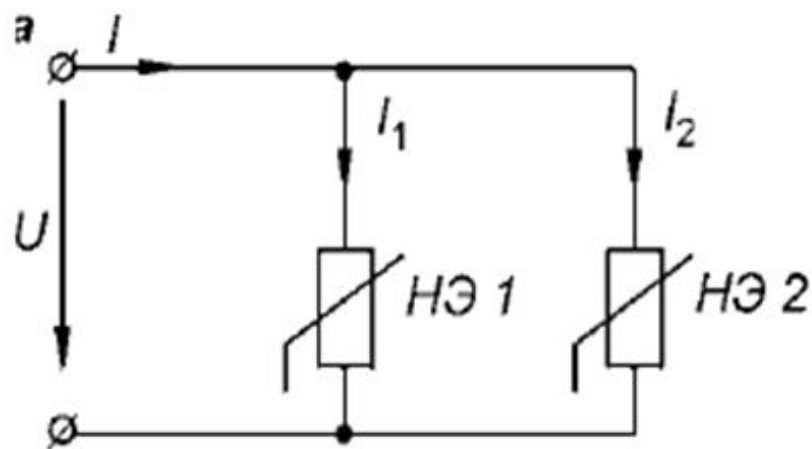


Рис.27.

<sup>1</sup>  
Параллельное соединение  
нелинейных элементов

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

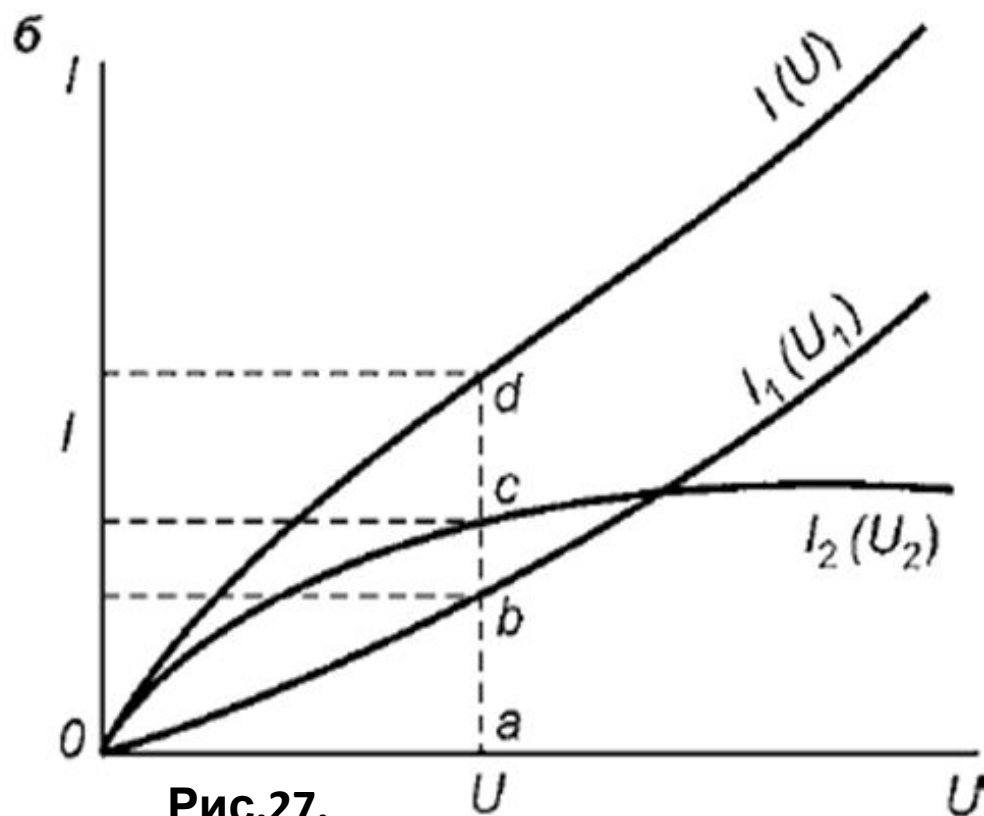
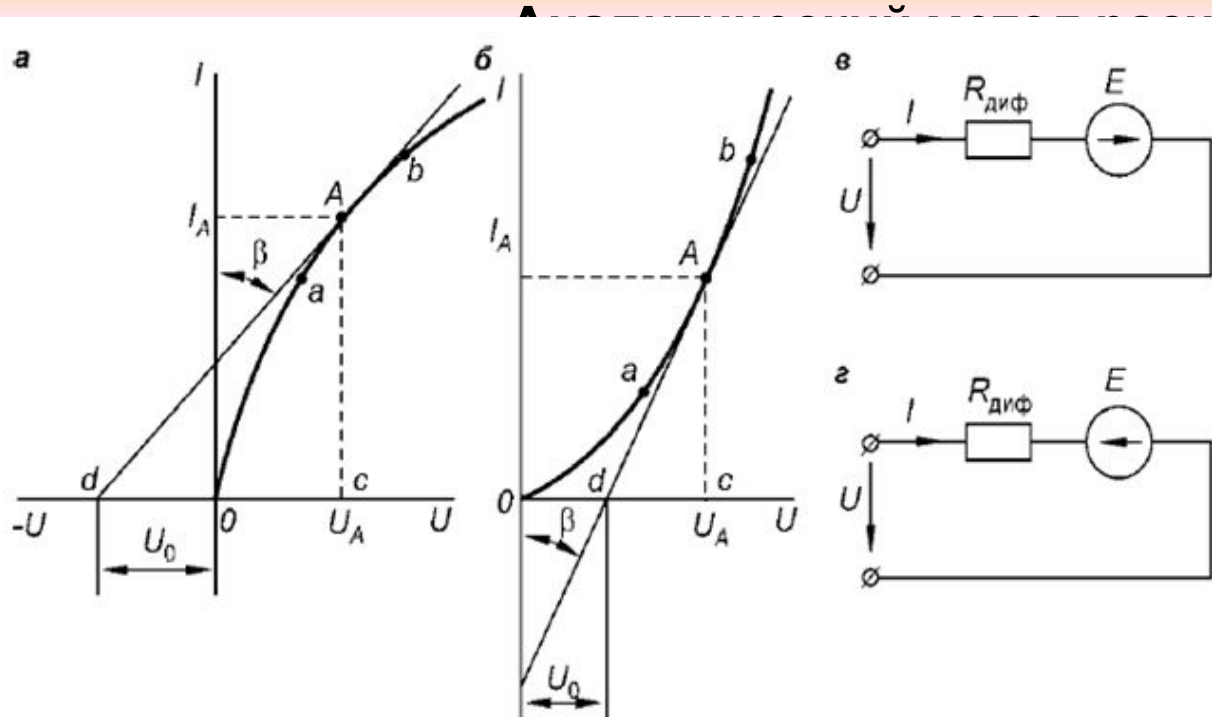


Рис.27.

# МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ



эта

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

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

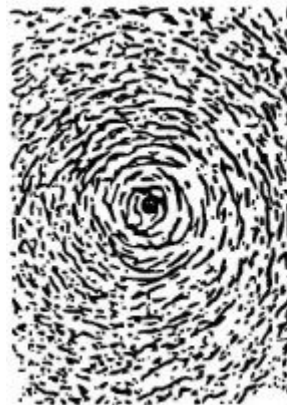
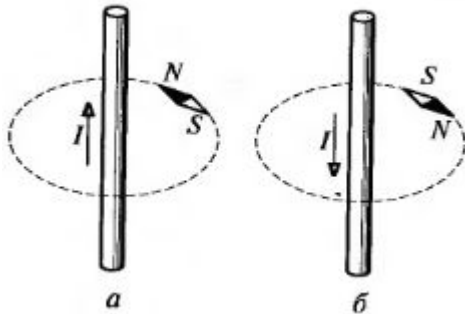
*Примеры использования вольт-амперных характеристик для аналитического расчета нелинейной цепи и построения схем замещения нелинейного элемента*

*а, в — с выпуклой характеристикой; б, г — с вогнутой характеристикой.*

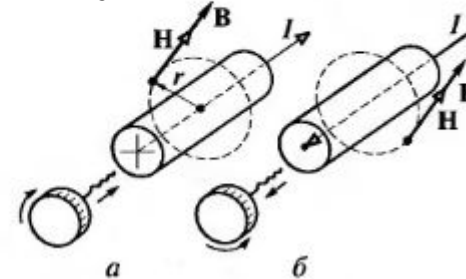
$$U_A = -U_0 + m_u \frac{I_A}{m_i} \operatorname{tg} \beta = -U_0 + m_R I_A \operatorname{tg} \beta \quad (28.1)$$

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

# 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  $\Phi$ .

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** —  $\mu < 1$ .  $\mu_{\text{ВИСМУТА}} = 0,9998$  (СВИНЕЦ, ЦИНК, АЗОТ И ДР.).

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

*ДЛЯ ПАРА-*

*И ДИАМАГНЕТИКОВ НАМАГНИЧЕННОСТЬ  $\mu$  ПРЯМО ПРОПОРЦИОНАЛЬНА ИНДУКЦИИ  $B_0$  МАГНИТНОГО ПОЛЯ*

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

**Свойства ферромагнетиков**

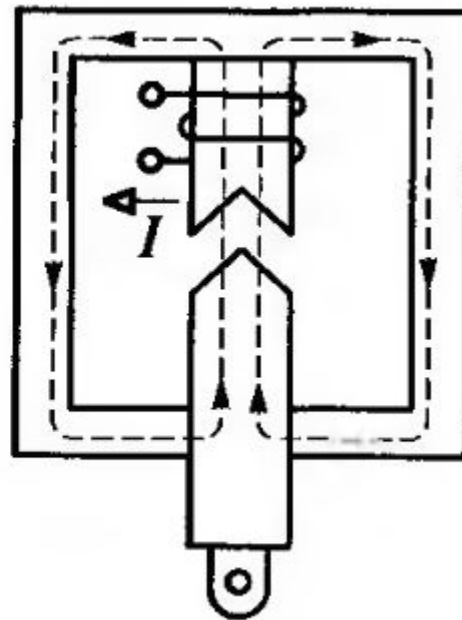
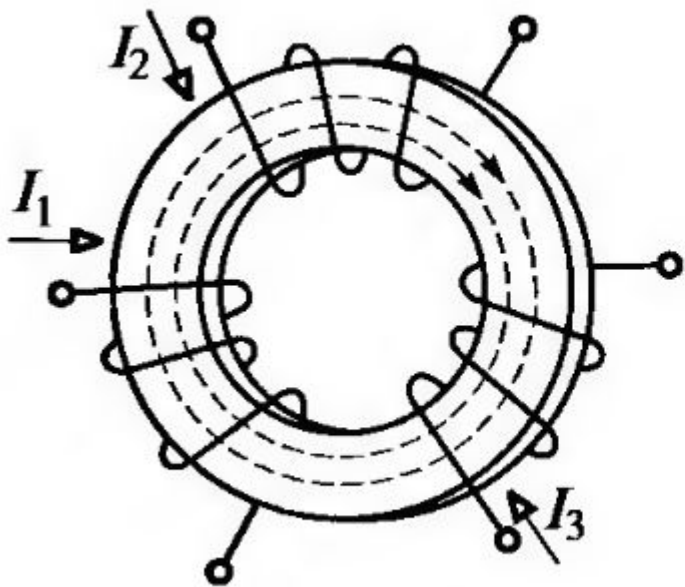
Обладают остаточным магнетизмом.

$\mu$  зависит от индукции внешнего магнитного поля.

Температура, при которой исчезают ферромагнитные свойства, называется точкой Кюри (вещество становится парамагнетиком; точка Кюри для железа равна  $770^\circ\text{C}$ , для никеля  $360^\circ\text{C}$ ).

# 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 —

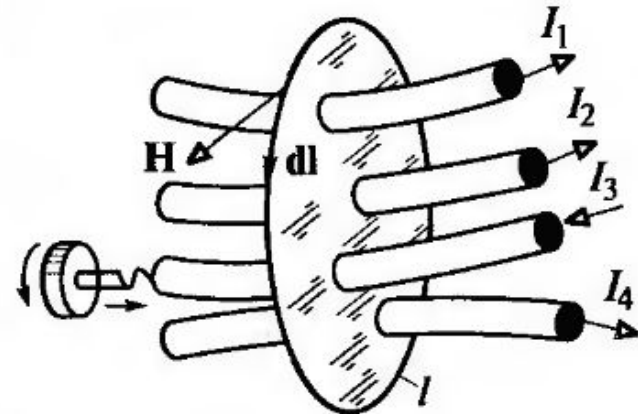
$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum I = F, \quad (1.32)$$

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

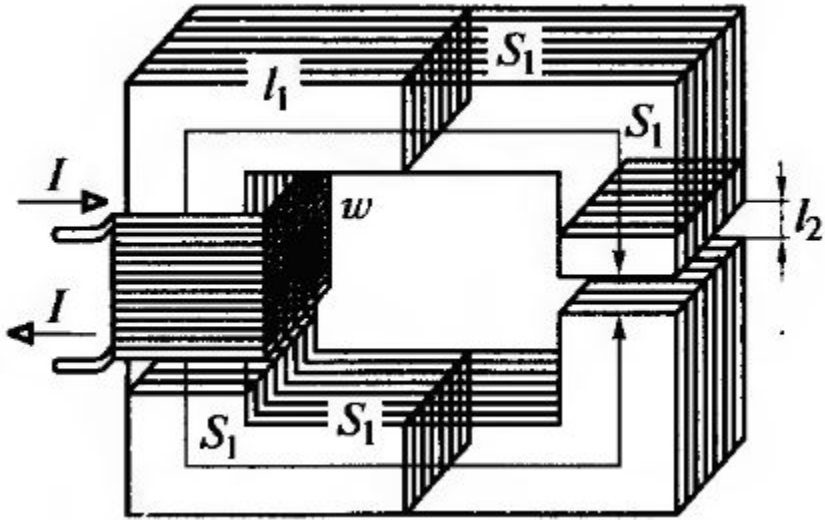
Величина  $\sum I = F$

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

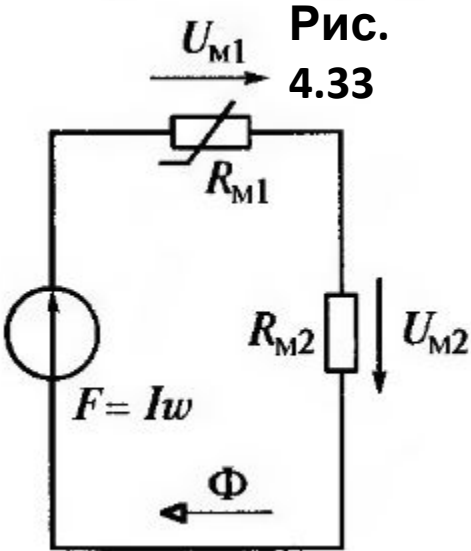


Рис.

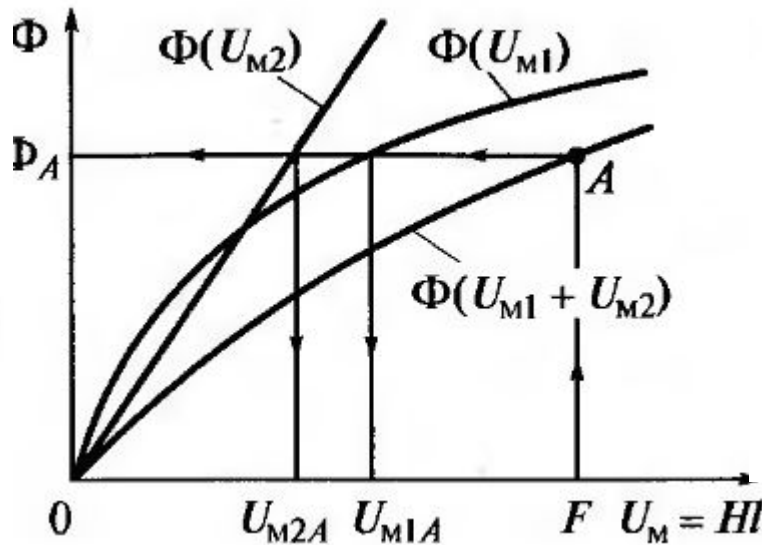


Рис.

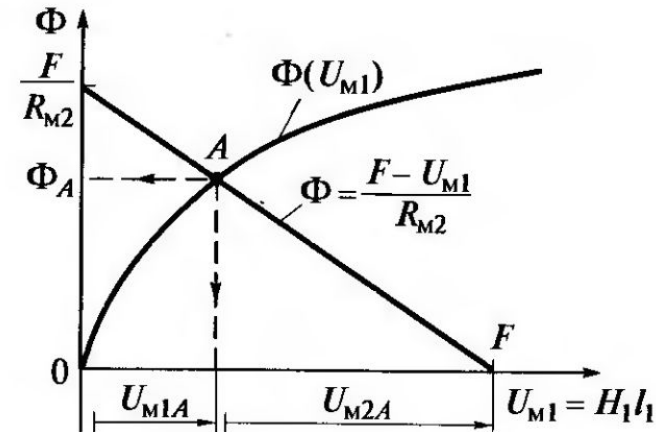


Рис. 3.33