

**Основные понятия  
и законы  
электрических  
и магнитных цепей**

# Электрическая цепь (ЭЦ)

**ЭЦ** – это совокупность устройств, предназначенных для взаимного преобразования, передачи и распределения электрической и других видов энергии и информации (в виде электрических сигналов), если процессы в устройствах можно описать при помощи понятий о токе, напряжении электродвижущей силе (ЭДС) [**ГОСТ Р 52002-2003**].

## Электрическая цепь включает:

Источники электрической энергии (источники питания) [ИЭЭ].

Приемники электрической энергии (потребители) [ПЭЭ].

Устройства передачи электрической энергии от ИЭЭ к ПЭЭ (провода, линии передач)

Коммутационная аппаратура (рубильники, выключатели и др.), аппаратура защиты (реле, предохранители и др), измерительные приборы.

# ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ (ЭЭЦ)

**ИЭЭ** осуществляют преобразование в электрическую энергию других видов энергии (химические процессы в гальванических элементах и аккумуляторах, механическую энергию в электромашинных генераторах, солнечную энергию в солнечных элементах ...).

**ПЭЭ** преобразуют электрическую энергию в механическую (электродвигатели), тепловую (электрические печи), химическую (электролизные ванны).

**Устройства передачи ЭЭ от ИЭЭ к ПЭЭ, коммутационная аппаратура и измерительные приборы** обеспечивают **передачу ЭЭ** от источников, **распределения** ее между приемниками и **контроля режима работы** всех электротехнических устройств.

# ПРИЕМНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

## Резистивные элементы

Лампочка  
накаливания



Преобразует  
электрическую  
энергию  
в световую

**Условные графические изображения резистивных элементов**



Нагревательный  
элемент



Преобразует  
электрическую  
энергию  
в тепловую



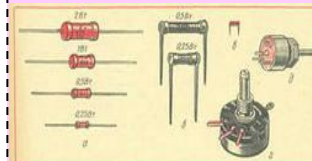
Электрический  
двигатель



Преобразует  
электрическую  
энергию  
в  
механическую



Резистор



Расходует  
электрическую  
энергию  
в виде тепла



Электролизные  
ванны



Преобразует  
электрическую  
энергию  
в химическую  
для получения  
новых  
материалов

Катушка индуктивности



Реактивные элементы

*Накапливают электрическую  
энергию в магнитном (L) или  
электрическом (C) поле и  
возвращают ее.*

Конденсатор

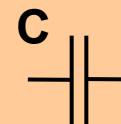


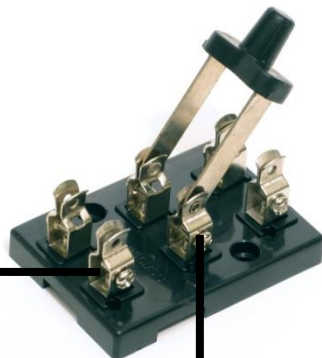
Схема электрической цепи – это ее графическое изображение

## Эскизное изображение электрической цепи

Аккумулятор (1)



Рубильник (2)



Электрическая лампа (3)



Амперметр (4)



Вольтметр (5)

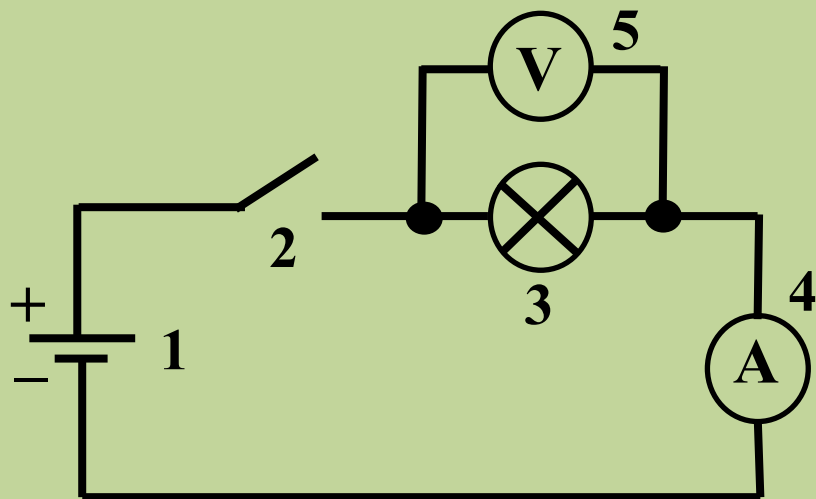


При замыкании рубильника к аккумулятору подключается электрическая лампа.

Амперметр и вольтметр контролируют режим работы.

# Схемы электрической цепи

## Принципиальная схема электрической цепи



В схеме использованы условные обозначения элементов, установленные ГОСТами.

Неудобна при расчетах.

## Схема замещения электрической цепи

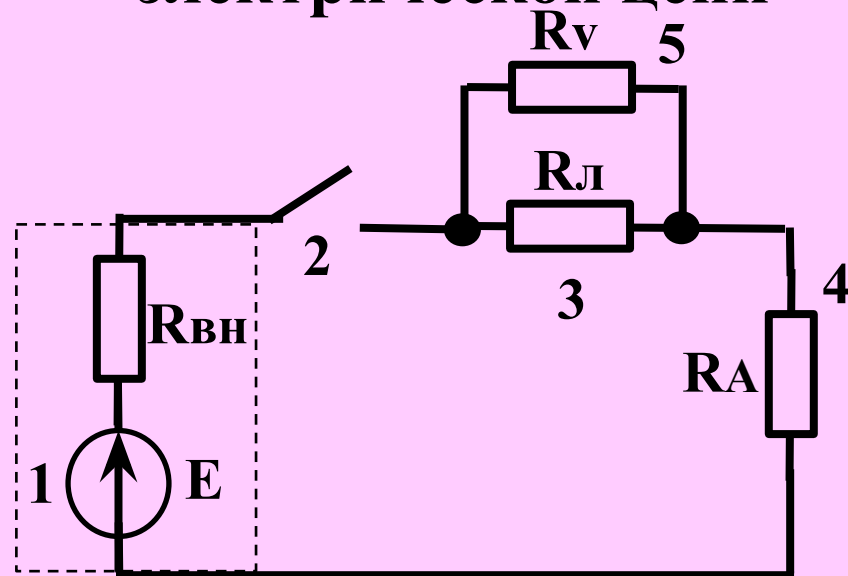
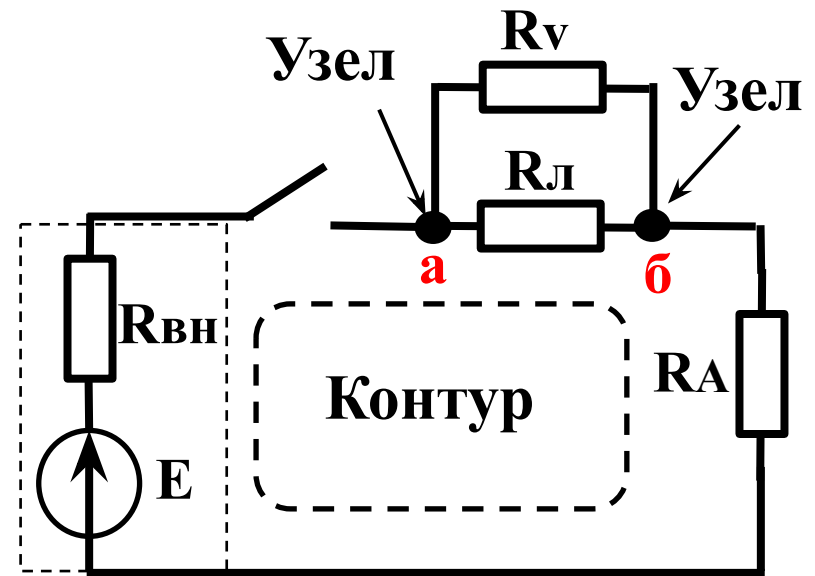


Схема замещения состоит из идеализированных элементов:  $R_{л}$  – сопротивление лампы,  $R_{в}$  – сопротивление вольтметра,  $R_{а}$  – сопротивление амперметра,  $R_{вн}$  – сопротивление аккумулятора,  $E$  – ЭДС аккумулятора.

# Топологические понятия в электрической цепи

**ВЕТВЬ** – один или несколько последовательно соединенных элементов, имеющих два вывода (начало и конец). В схеме – три ветви, включающие:  $R_V$ ;  $R_L$ ;  $R_A - E - R_{ВН}$ .

**УЗЕЛ** электрической цепи – место соединения трех и более ветвей (узлы **а** и **б**)



**КОНТУР** – замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям так, что не одна ветвь и не один узел не встречаются больше одного раза. (Контуров - 2!).

# Элементы электрической цепи



```
graph TD; A[Элементы электрической цепи] --> B[АКТИВНЫЕ  
вносят энергию в ЭЦ (источники напряжения, источники тока)]; A --> C[ПАССИВНЫЕ  
рассеивают или накапливают и возвращают энергию в ЭЦ (резисторы, катушки индуктивности, конденсаторы)]; B --> D[ЛИНЕЙНЫЕ  
Параметры элементов не зависят от протекающих токов и приложенных напряжений]; C --> D; C --> E[НЕЛИНЕЙНЫЕ  
Параметры элементов зависят от протекающих токов и приложенных напряжений];
```

## АКТИВНЫЕ

вносят энергию в ЭЦ (источники напряжения, источники тока)

## ПАССИВНЫЕ

рассеивают или накапливают и возвращают энергию в ЭЦ (резисторы, катушки индуктивности, конденсаторы)

## ЛИНЕЙНЫЕ

Параметры элементов не зависят от протекающих токов и приложенных напряжений

## НЕЛИНЕЙНЫЕ

Параметры элементов зависят от протекающих токов и приложенных напряжений



# Элементы электрической цепи - РЕЗИСТОРЫ

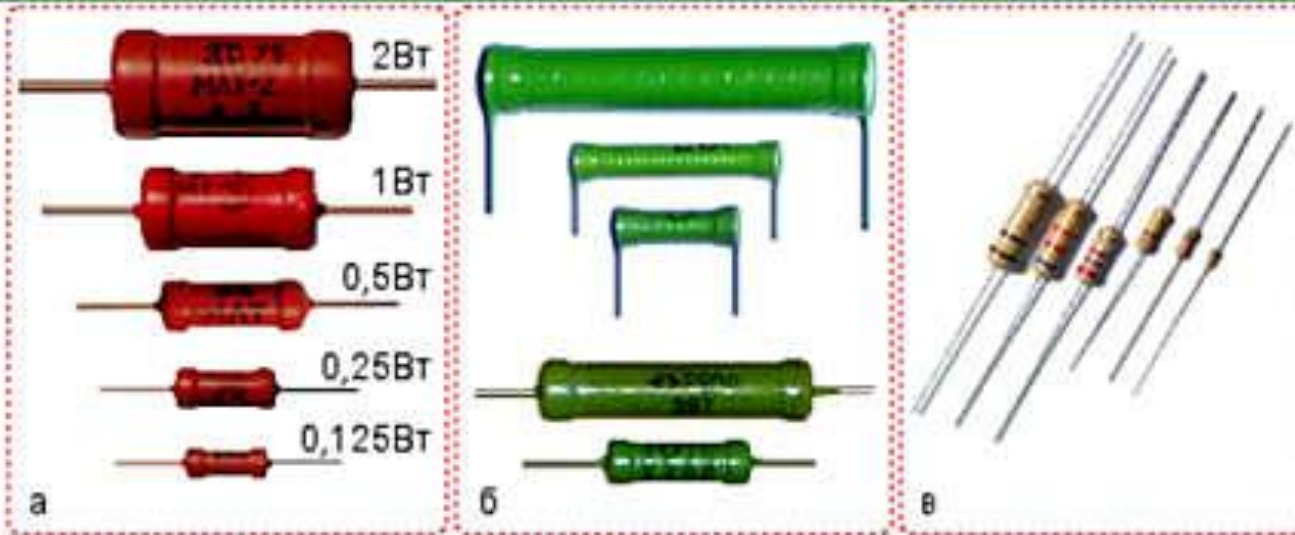


Рис.1. Внешний вид некоторых постоянных резисторов импортного и отечественного производства, обозначения на принципиальной схеме: а – отечественные МЛТ; б – отечественные, устаревшие; в – с цветной маркировкой; г – ЧИП-резисторы; д – мощные, проволочные.

# Элементы электрических цепей

## РЕЗИСТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ( R )

- это идеализированная модель резисторов и других электротехнических устройств, оказывающих сопротивление постоянному току. *Рассеивают подводимую к нему энергию.*

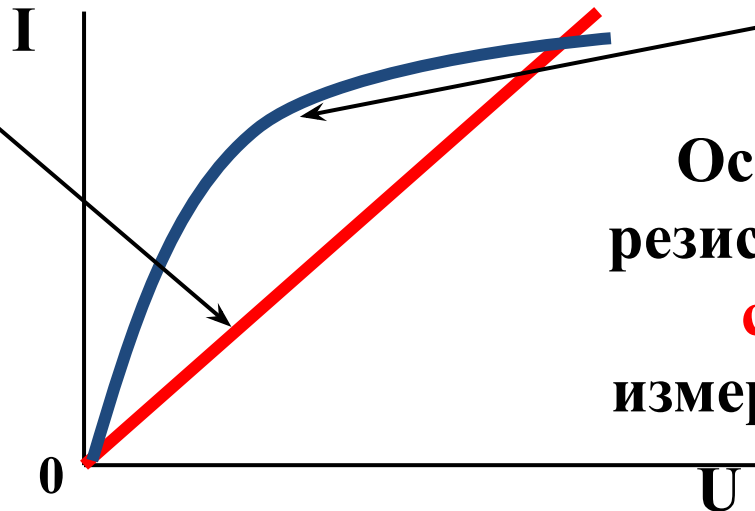
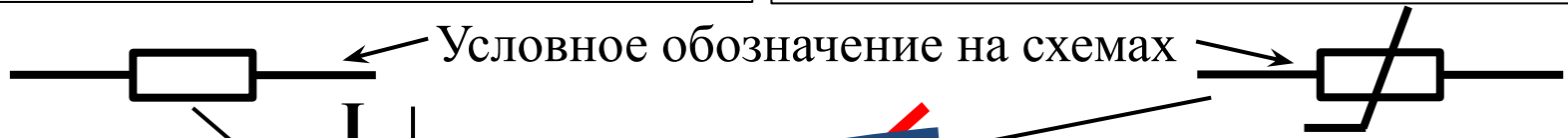
### РЕЗИСТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

#### ЛИНЕЙНЫЙ РЕЗИСТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

$$I = U / R \quad (R = \text{const})$$

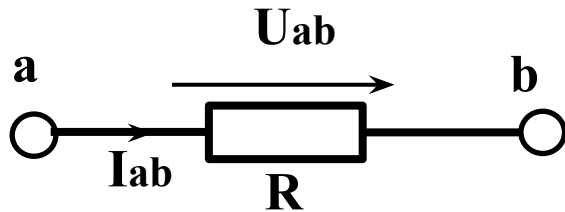
#### НЕЛИНЕЙНЫЙ РЕЗИСТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Связь между  $I$  и  $U$  нелинейная



Основной параметр  
резистивного элемента –  
**сопротивление,**  
измеряемое в **омах (Ом).**

# РЕЗИСТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ



$$U_{ab} = R \cdot I_{ab} \text{ или } U = R \cdot I$$

$G = 1/R$  – **проводимость** единица измерения – **сименс** (См).

Потребляемая (активная) мощность:

$$P_R = U \cdot I = R \cdot I^2 = G \cdot U^2$$

Единица измерения **МОЩНОСТИ** – **ватт** (Вт).

[1 Вт – это мощность, при которой в каждую секунду (1с) 1 джоуль (Дж) электрической энергии преобразуется в другой вид энергии (на резистивном элементе – в тепловую)].

**Электрическая энергия:**  $W = P \cdot t$ .

Единица измерения энергии – **ватт·час**.

1 ватт·час = 3600 джоулей (Дж).

# Измерение потребляемой (активной) мощности ваттметром (W)

Ваттметр имеет две обмотки: токовая обмотка и обмотка напряжения. Токовая обмотка включается последовательно с измеряемым элементом, а обмотка напряжения – параллельно. Звездочками указаны начала обмоток.

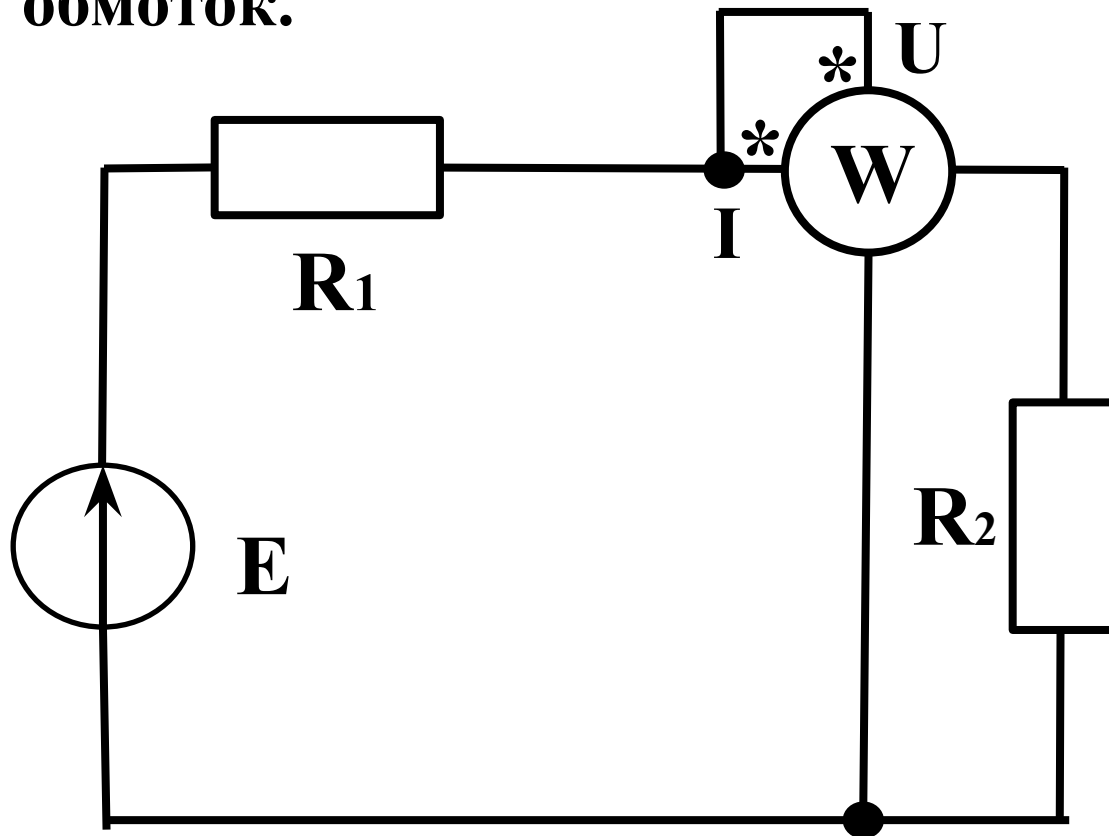


Схема измерения  
активной  
мощности,  
потребляемой  
резистивным  
элементом  $R_2$ .

# Элементы электрической цепи

## КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ



# Элементы электрических цепей

## ИНДУКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ (L)

- это идеализированная модель катушки индуктивности, которая аккумулирует энергию в магнитном поле.

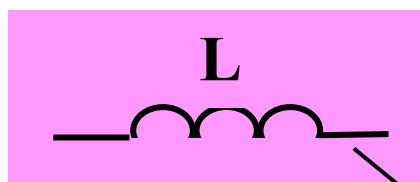
### ИНДУКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

ЛИНЕЙНЫЙ  
ИНДУКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

$$u_L = L \cdot di_L/dt \quad (L = \text{const})$$

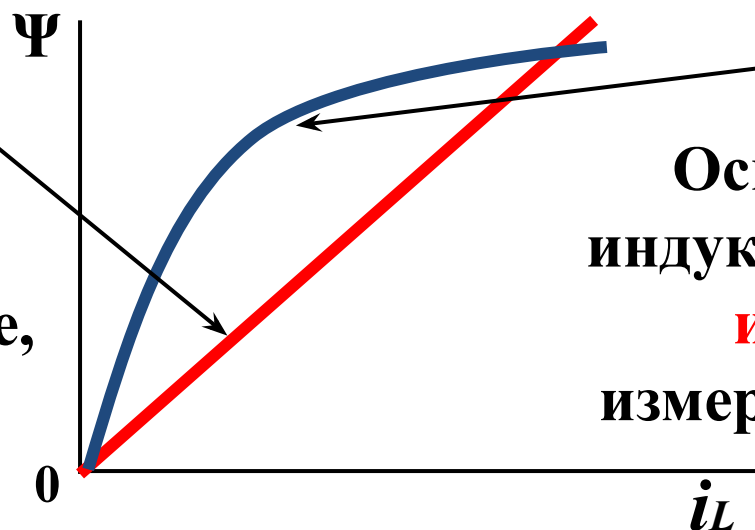
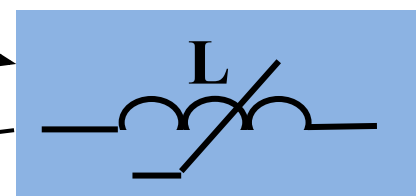
НЕЛИНЕЙНЫЙ  
ИНДУКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Связь между  $i_L$  и  $\Psi$  нелинейная



$\Psi = L \cdot i_L$  –  
потокосцепление,  
измеряется в  
веберах (Вб).

← Условное обозначение на схемах →



Основной параметр  
индуктивного элемента –  
**ИНДУКТИВНОСТЬ**,  
измеряемая в генри (Гн).

# Элементы электрической цепи КОНДЕНСАТОРЫ



# Элементы электрических цепей

## ЕМКОСТНОЙ ЭЛЕМЕНТ ( C )

- это идеализированная модель конденсатора, который аккумулирует энергию в электрическом поле.

### ЕМКОСТНОЙ ЭЛЕМЕНТ

#### ЛИНЕЙНЫЙ ЕМКОСТНОЙ ЭЛЕМЕНТ

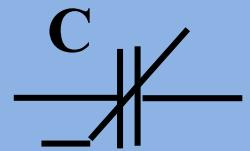
$$i_c = C \cdot dU_c / dt \quad (C = \text{const})$$

#### НЕЛИНЕЙНЫЙ ЕМКОСТНОЙ ЭЛЕМЕНТ

Связь между  $i_c$  и  $U_c$  нелинейная

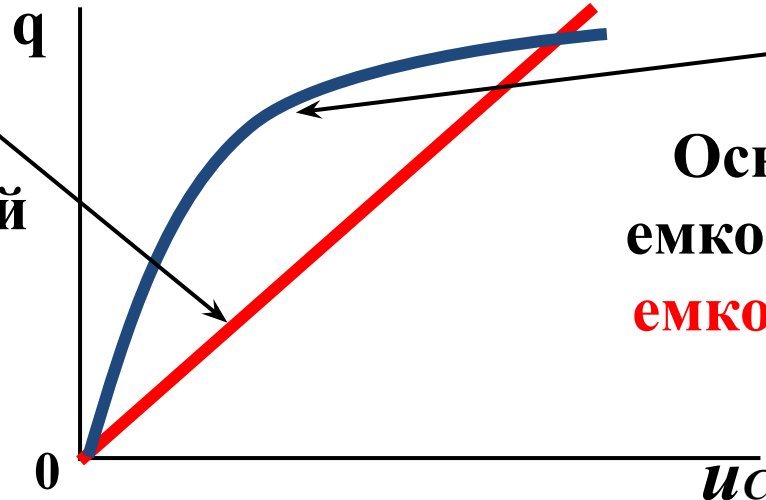


← Условное обозначение на схемах →



$q$  – накопленный заряд/  
заряд/

$$q = C \cdot U_c$$

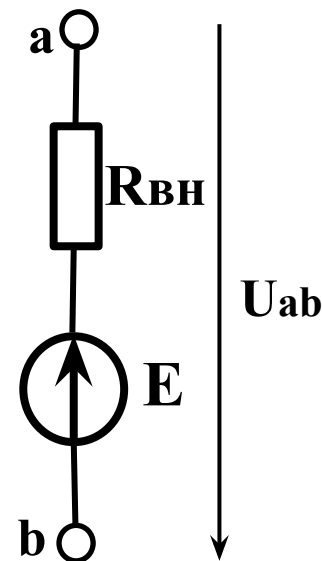
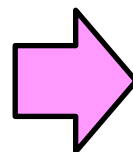
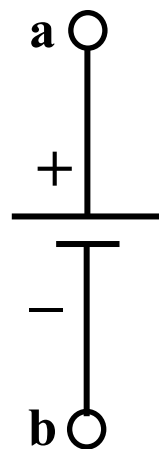
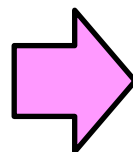
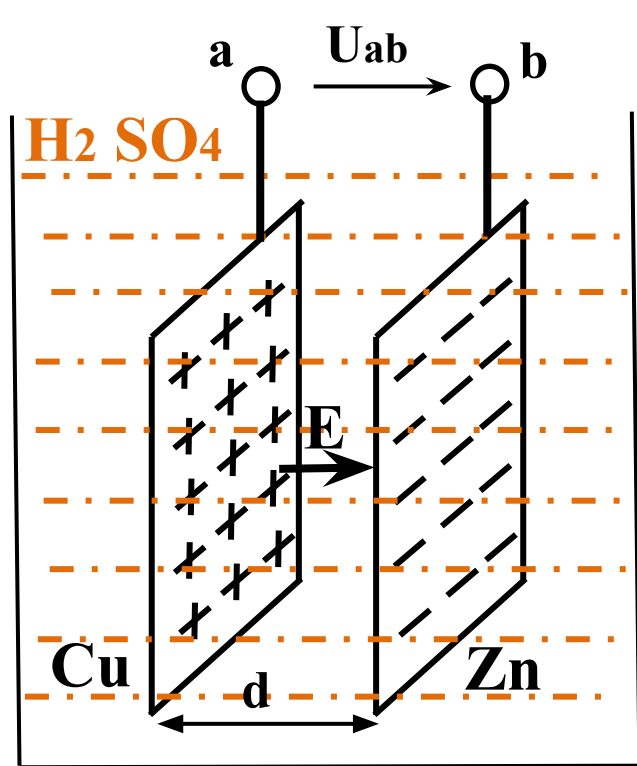


Основной параметр емкостного элемента – **емкость**, измеряемая в фарадах (Ф).



# Источники электрической энергии постоянного тока

## Гальванический элемент



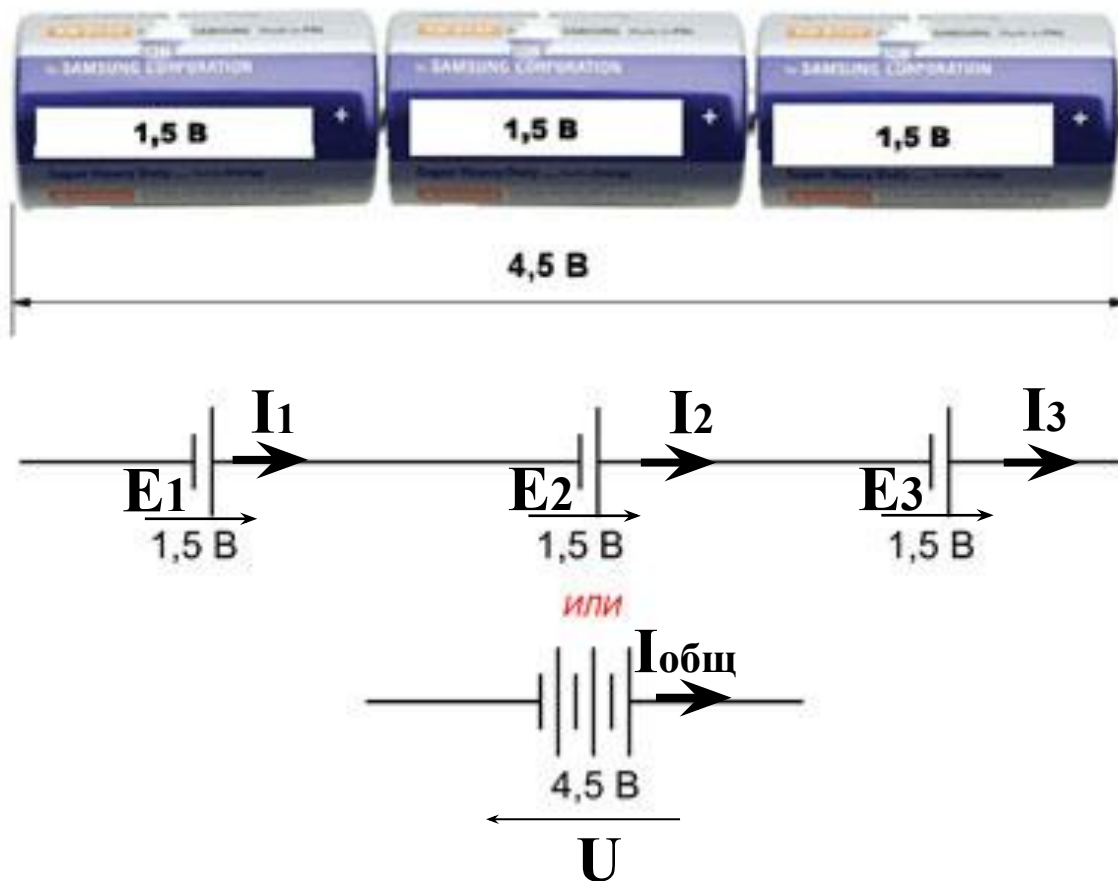
Стрелка ЭДС внутри источника показывает направления движения положительных зарядов внутри источника под действием сторонних сил. Стрелка напряжения  $U_{ab}$  показывает направление движения положительных зарядов в приемнике, если его подключить.

**Принцип работы гальванического элемента:**

Вследствие химических процессов, происходящих в растворе серной кислоты, на медной пластине накапливаются положительные заряды, а на цинковой – отрицательные. При некотором значении напряженности поля  $E = E_0$  накопление зарядов прекращается. Напряжение, при котором прекращается накопление зарядов, служит мерой сторонней силы, стремящейся к накоплению заряда. Количественная мера сторонних сил – электродвижущая сила (ЭДС)  $E = E_0 d = U_{ab}$ .  $U_{ab} - 1,2 \text{ В}$ , либо  $1,5 \text{ В}$ .

## Последовательное соединение источников ЭДС

При последовательном соединении схеме положительный вывод первого источника ЭДС соединяется с отрицательным выводом второго источника ЭДС; положительный вывод второго источника ЭДС соединяется с отрицательным выводом третьего источника ЭДС и т.д.



При таком соединении источников ЭДС через все элементы будет течь одинаковый ток:

$I_{\text{общ}} = I_1 = I_2 = I_3$ ,  
а общее напряжение равно сумме ЭДС

отдельных элементов:

$$U = E_1 + E_2 + E_3.$$

# Параллельное соединение источников ЭДС

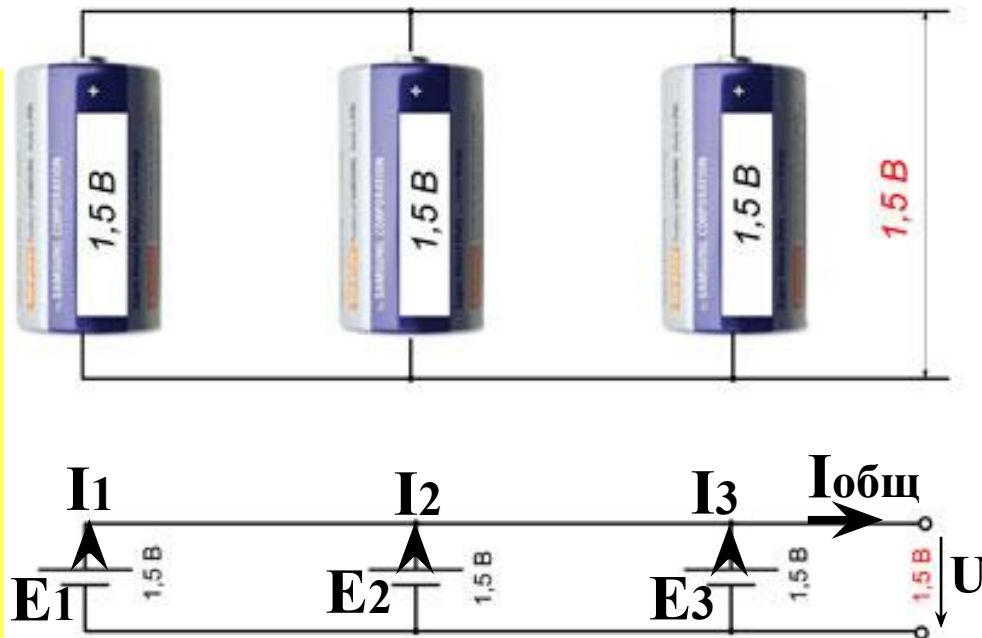
При параллельном соединении источников ЭДС, их одноименные выводы соединяются вместе, то есть плюс к плюсу, минус к минусу

При таком соединении общий ток будет равен сумме токов каждого элемента:

$$I_{\text{общ}} = I_1 + I_2 + I_3,$$

а общее напряжение равно ЭДС каждого отдельного источника

$$U = E_1 = E_2 = E_3.$$



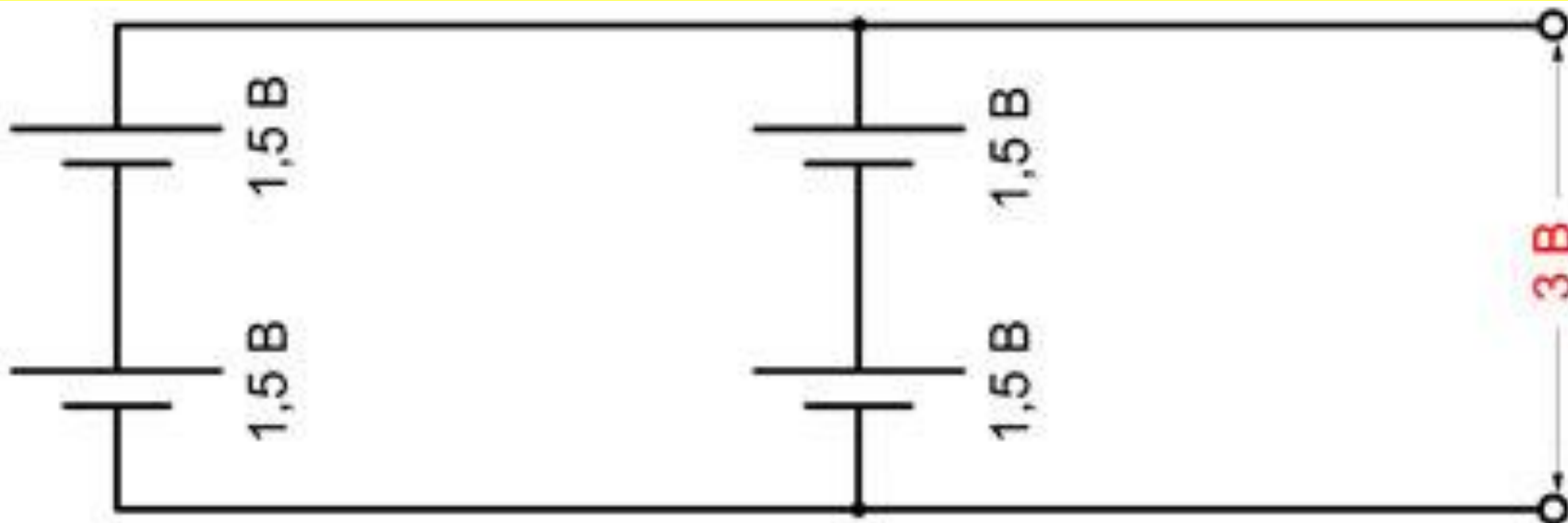
При параллельном соединении источников ЭДС важно, чтобы они имели одинаковое напряжение. Если один из элементов имеет меньшее напряжение, то остальные будут частично разряжаться через него, сокращая срок службы соединенных элементов в целом.

# Последовательно-параллельное соединение источников ЭДС

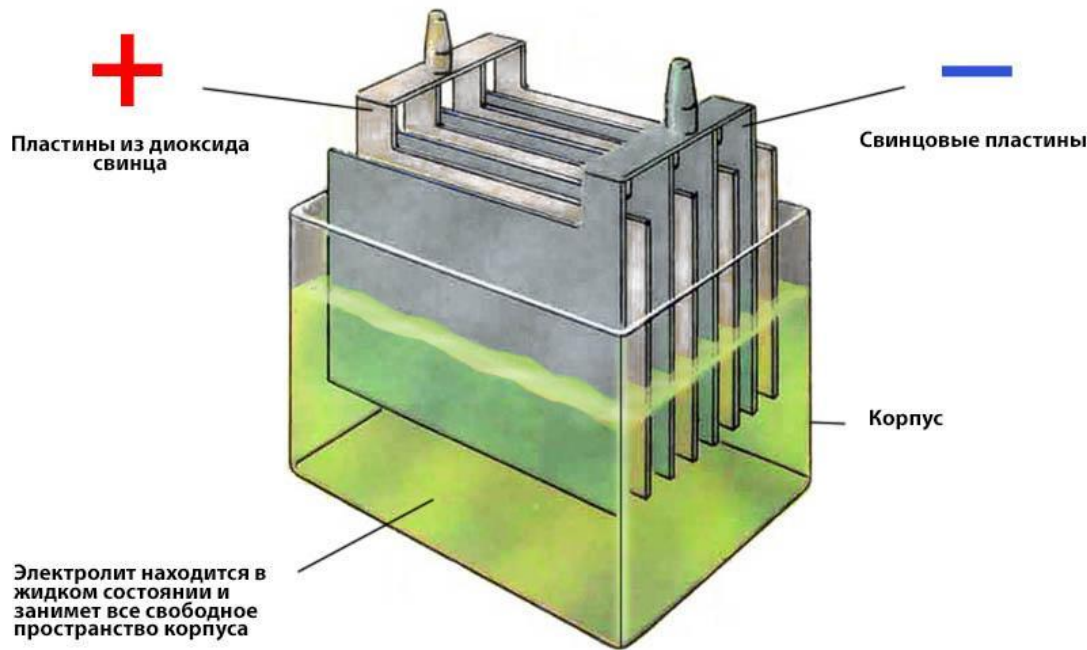
Источники ЭДС включают по последовательно-параллельной схеме для увеличения, как тока, так и напряжения.

Параллельное включение увеличивает силу тока, а последовательное увеличивает общее напряжение.

Пример последовательно-параллельной схемы включения источников ЭДС:



# Источники электрической энергии постоянного тока



## АККУМУЛЯТОРНАЯ БАТАРЕЯ (АКБ).

АКБ обычно состоит из нескольких элементов, каждый из которых вырабатывает напряжение 2 В.

1. В процессе зарядки электрическая энергия преобразуется в химическую.

2. При разряде химическая энергия преобразуется в электрическую.

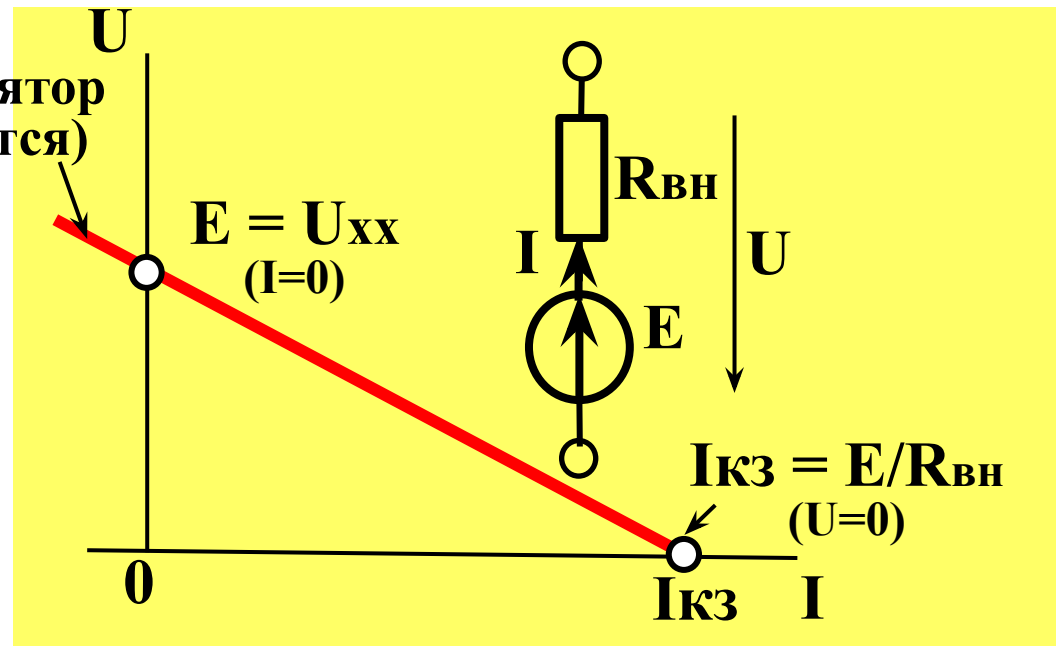
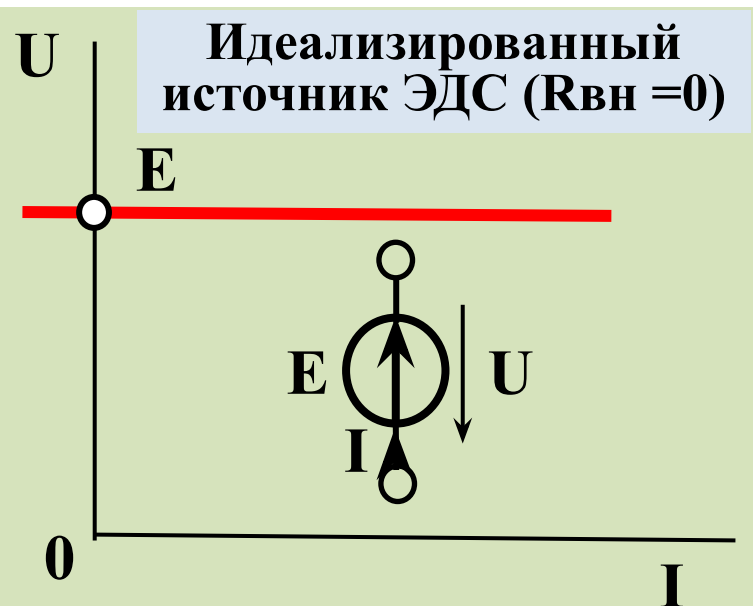
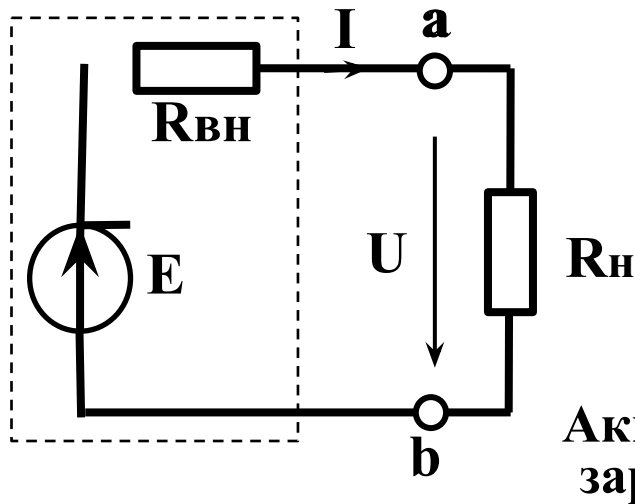
Работает АКБ циклично по принципу регулярного заряда и разряда. При подключении нагрузки АКБ разряжается. При этом положительные электроды (диоксид свинца) и отрицательные (свинец губчатого типа) вступают в химическую реакцию с электролитом.

# Источник ЭДС

Вольтамперная (внешняя)  
характеристика источника ЭДС – это  
зависимость напряжения между его  
выводами от тока.  $U = F(I)$

$$U = E - I \cdot R_{вн} = U_{ХХ} - I \cdot R_{вн}$$

Реальный источник ЭДС



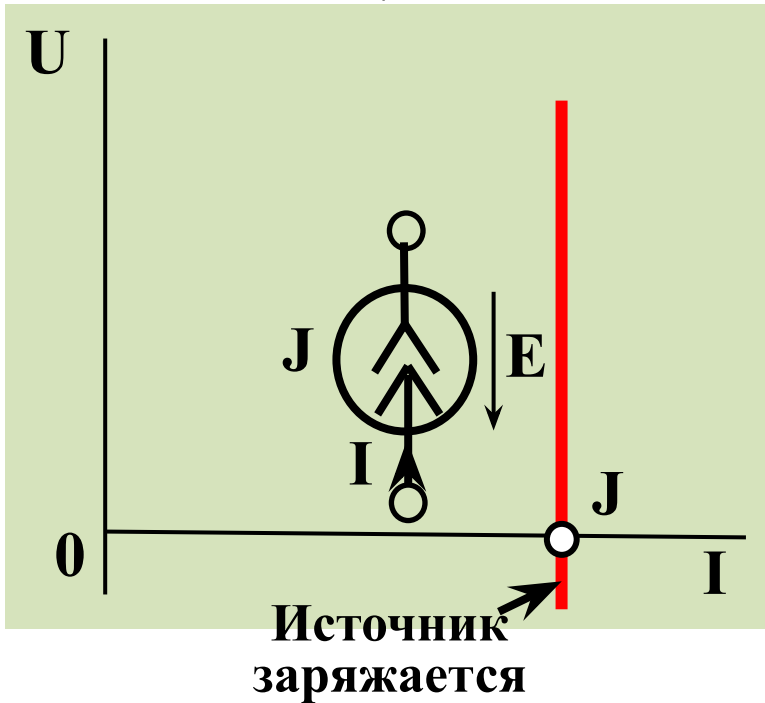
КЗ - короткое замыкание

ХХ – холостой ход

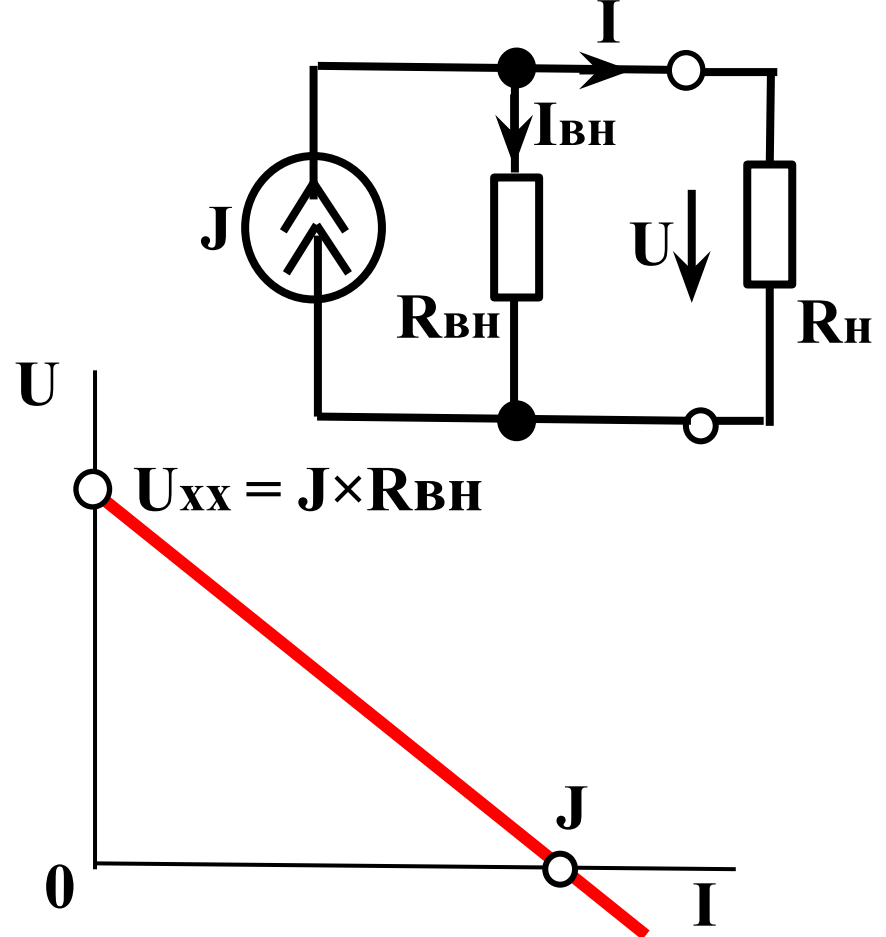
# Источник тока

При  $R_{вн} \gg R_{н}$  ток источника практически равен току короткого замыкания ( $I \approx E/R_{вн} = I_{кз} = J = \text{const}$ ).

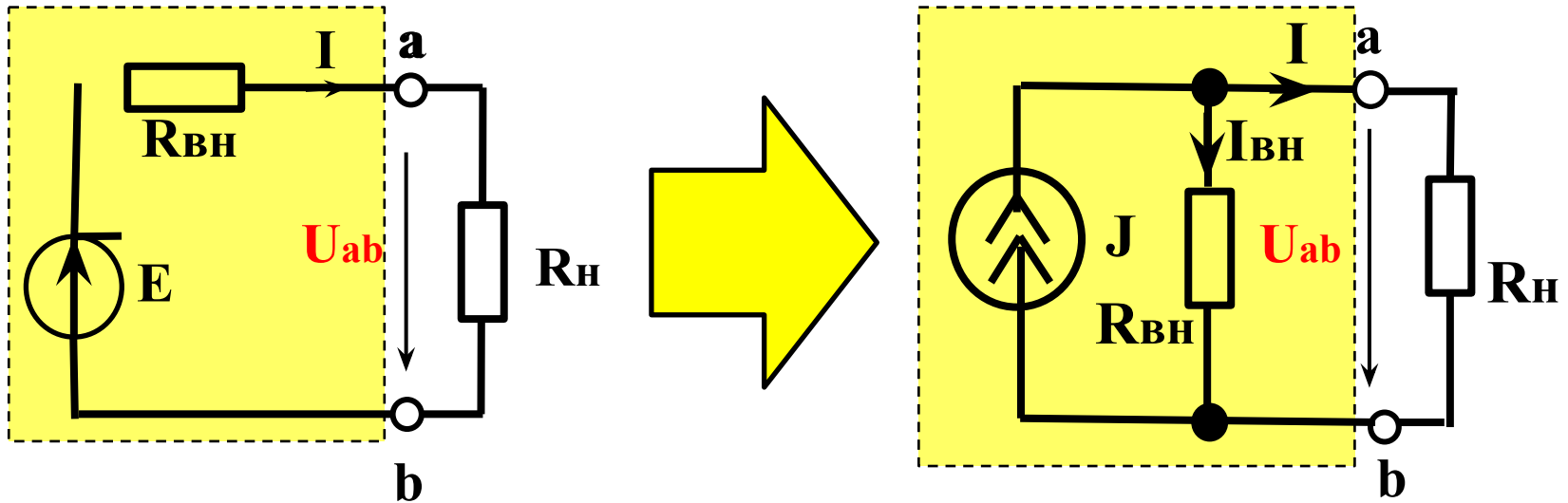
Источник с такими параметрами называют идеальным источником тока.



## Реальный источник тока

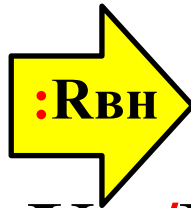


# Эквивалентное преобразование источников ЭДС и тока



Условие перехода от схемы с источником ЭДС к схеме с источником тока:  $U_{ab}$  в схемах должны быть одинаковы!

$$U_{ab} = E - I \cdot R_{вн}$$



$$U_{ab}/R_{вн} = E/R_{вн} - I$$

$$E/R_{вн} = J = U_{ab}/R_{вн} + I = I_{вн} + I$$

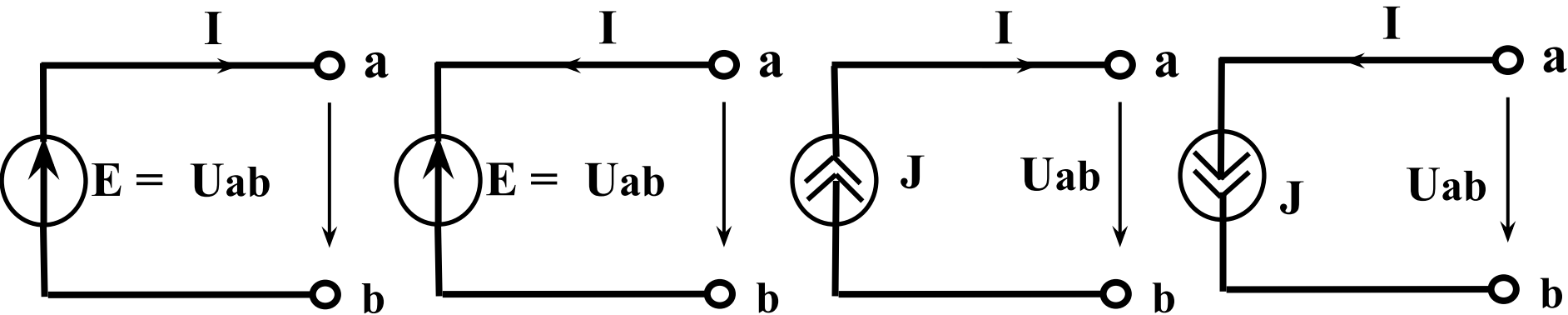
Однако:  $P_E \neq P_J$ .  $P_E = E \cdot I = E \cdot E / (R_{вн} + R_{н}) = E^2 / (R_{вн} + R_{н})$

$$P_J = J \cdot U_{ab} = (E/R_{вн}) \cdot (E \cdot R_{вн} \cdot R_{н} / (R_{вн}(R_{вн} + R_{н}))) = E^2 R_{н} / (R_{вн}(R_{вн} + R_{н}))$$

Мощности, развиваемые источниками ЭДС и тока, и мощности потерь ( $R_{вн} \cdot I^2 \neq R_{вн} \cdot I_{вн}^2$ ) различны.



# Энергетический баланс



$$P_E = U_{ab} \cdot I = E \cdot I$$

$$P_E = -U_{ab} I = -E \cdot I$$

$$P_J = U_{ab} J = U_{ab} J$$

$$P_J = -U_{ab} J = -U_{ab} J$$

Если направление ЭДС источника напряжения совпадает с направлением тока ( $P > 0$ ), то источник отдает энергию во внешнюю цепь.

Если направления ЭДС источника напряжения и тока в цепи противоположны ( $P < 0$ ), то источник потребляет энергию (например АКБ заряжается). Аналогично для источников тока.

**Баланс мощностей:** Алгебраическая сумма мощностей всех источников энергии равна арифметической сумме мощностей всех приемников энергии:

$$\sum U_{\text{ист}} I_{\text{ист}} = \sum R I^2 \text{ или } \sum P_{\text{ист}} = \sum P_{\text{р.}}$$

# Законы Кирхгофа

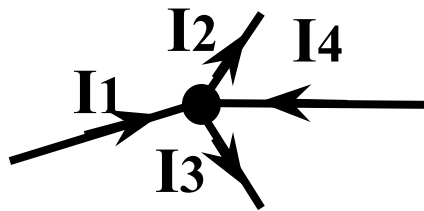
## Первый закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма

токов в любом узле  
электрической цепи равна  
нулю

$$\sum_k^n I_k = 0.$$

Со знаком + записываются  
токи с положительным  
направлением от узла, со  
знаком - -с положительным  
направлением к узлу, или  
наоборот.



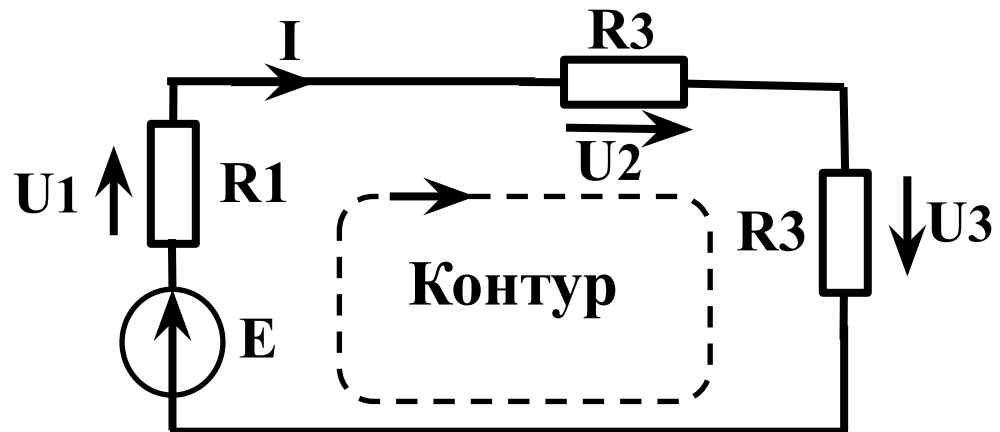
$$-I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0$$

## Второй закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма  
напряжений участков любого  
контура электрической цепи  
равна нулю

$$\sum_k^n U_k = 0.$$

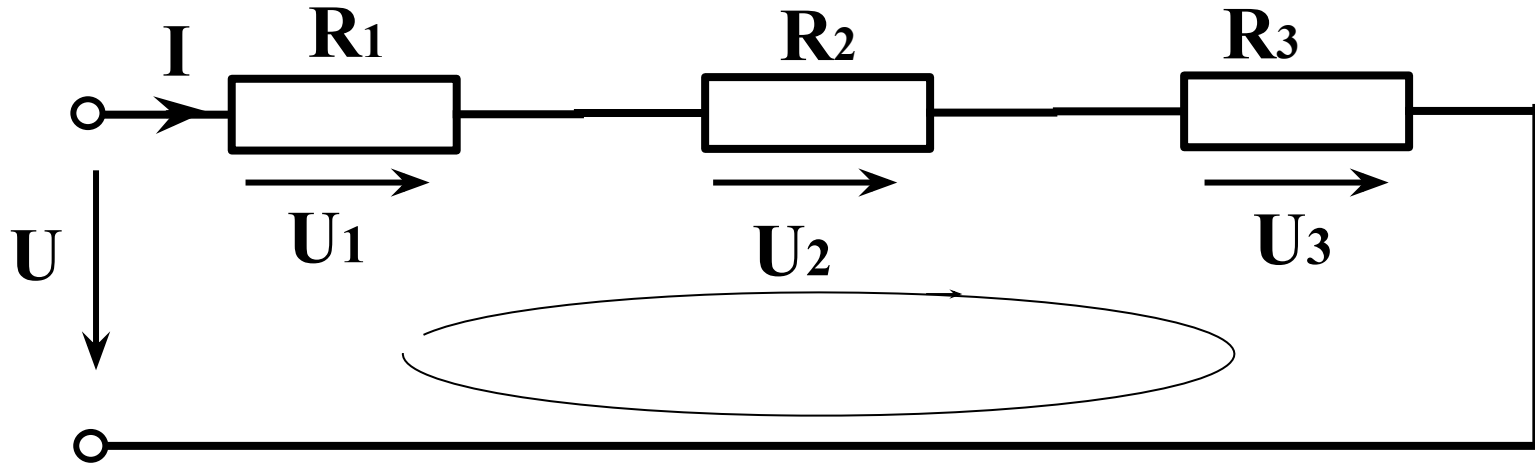
Со знаком + записываются  
напряжение, положительные  
направлением которых  
совпадают с направлением  
обхода контура, или наоборот.



$$-E_1 + U_1 + U_2 + U_3 = 0$$

# Соединение резистивных элементов

## Последовательное



**По 2-му закону Кирхгофа:**

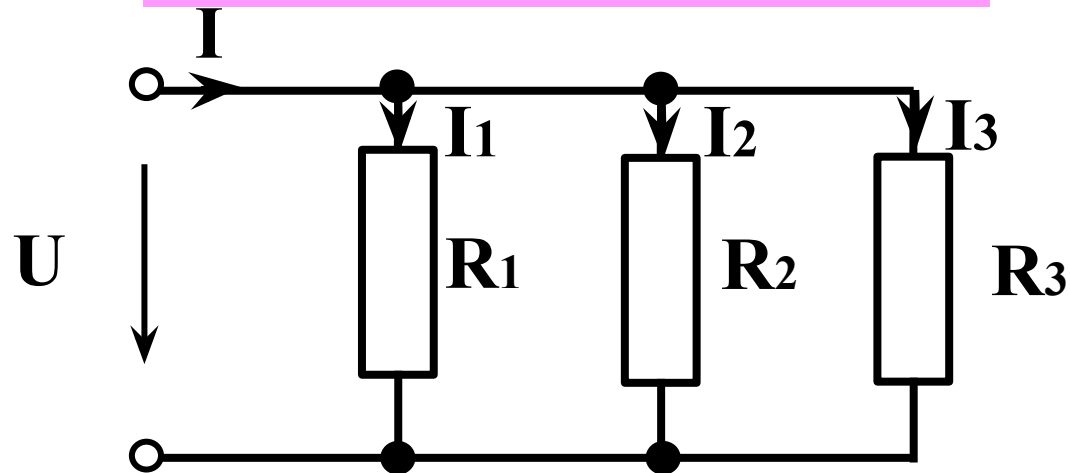
$$U = U_1 + U_2 + U_3 = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

$$R_{\text{ЭКВ}} = U/I = R_1 + R_2 + R_3$$

1. При последовательном соединении элементов через все элементы протекает один и то же ток.
2. Эквивалентное сопротивление равно сумме сопротивлений.

# Соединение резистивных элементов

## Параллельное



По 1-му закону Кирхгофа:

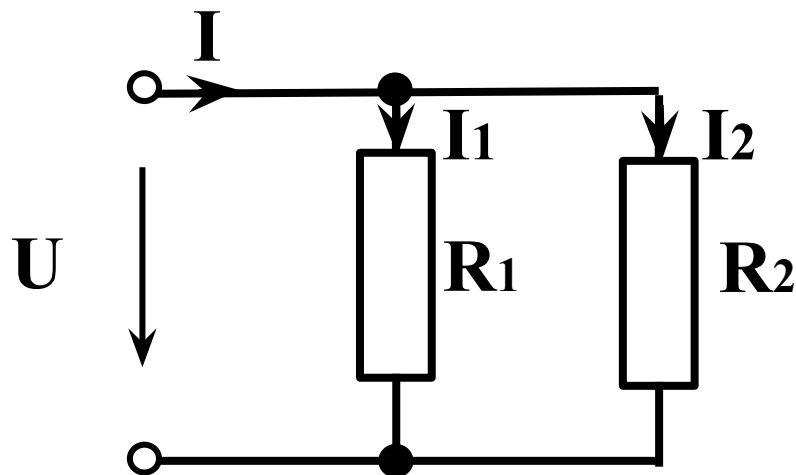
$$I = I_1 + I_2 + I_3 = U/R_1 + U/R_2 + U/R_3 = U(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3)$$

$$G_{\text{ЭКВ}} = I/U = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$$

$$R_{\text{ЭКВ}} = U/I = 1/G_{\text{ЭКВ}}$$

1. При параллельном соединении все элементы находятся под одинаковым напряжением.
2. При параллельном соединении складываются проводимости

# Правило деления токов в электрической цепи с двумя элементами

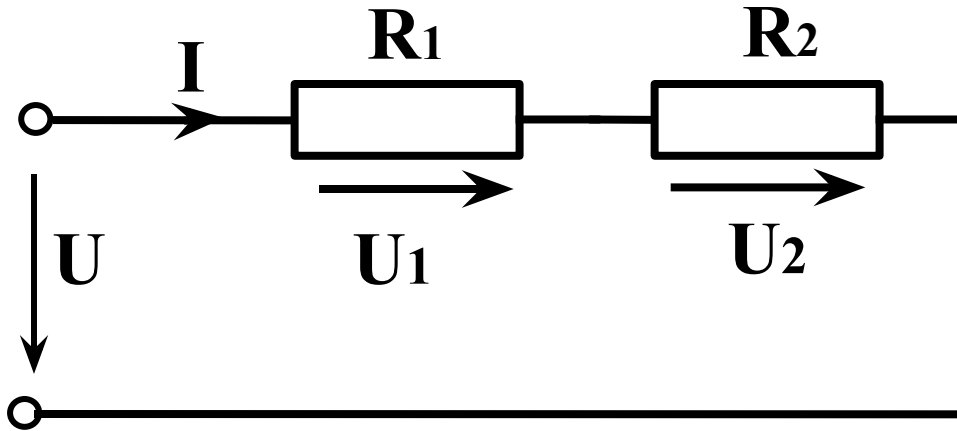


$$I_1 = (IR_2)/(R_1 + R_2).$$

$$I_2 = (IR_1)/(R_1 + R_2).$$

Для определения тока через элемент в параллельной цепи необходимо общий ток умножить на сопротивление соседней ветви и полученное произведение разделить на сумму сопротивлений.

# Правило деления напряжений в электрической цепи с двумя элементами



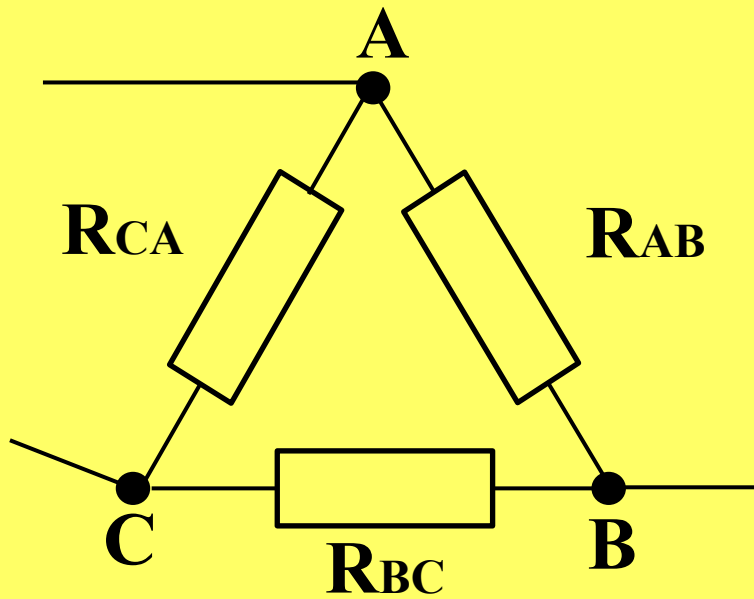
$$U_1 = (UR_1)/(R_1 + R_2).$$

$$U_2 = (UR_2)/(R_1 + R_2).$$

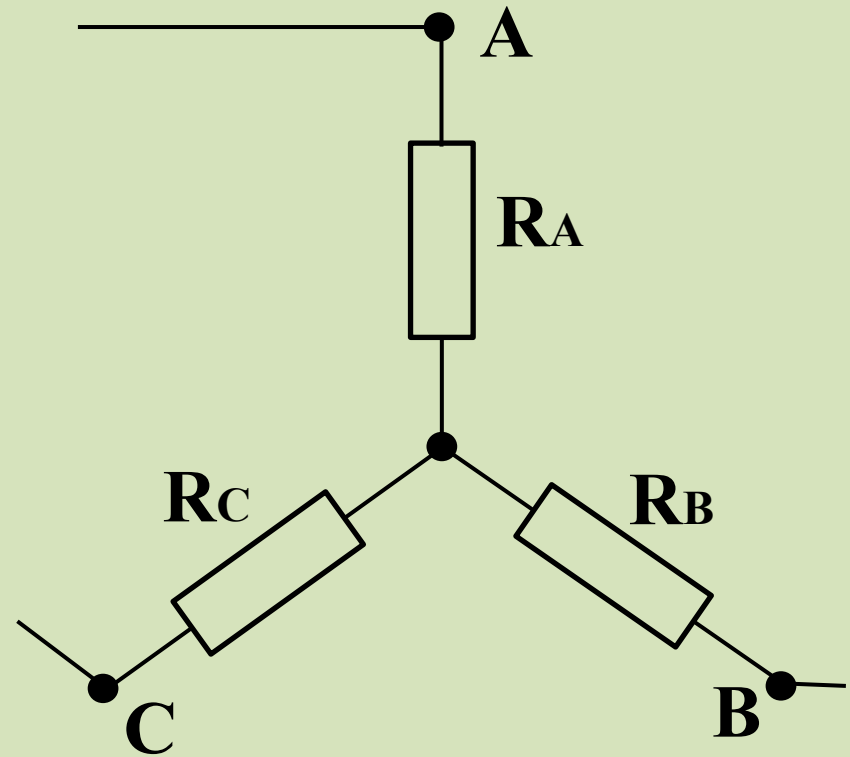
Для определения напряжения на элементе в последовательной цепи необходимо общее напряжение разделить на эквивалентное сопротивление цепи и полученный результат умножить на сопротивление этого элемента.

# Схемы соединения резистивных элементов

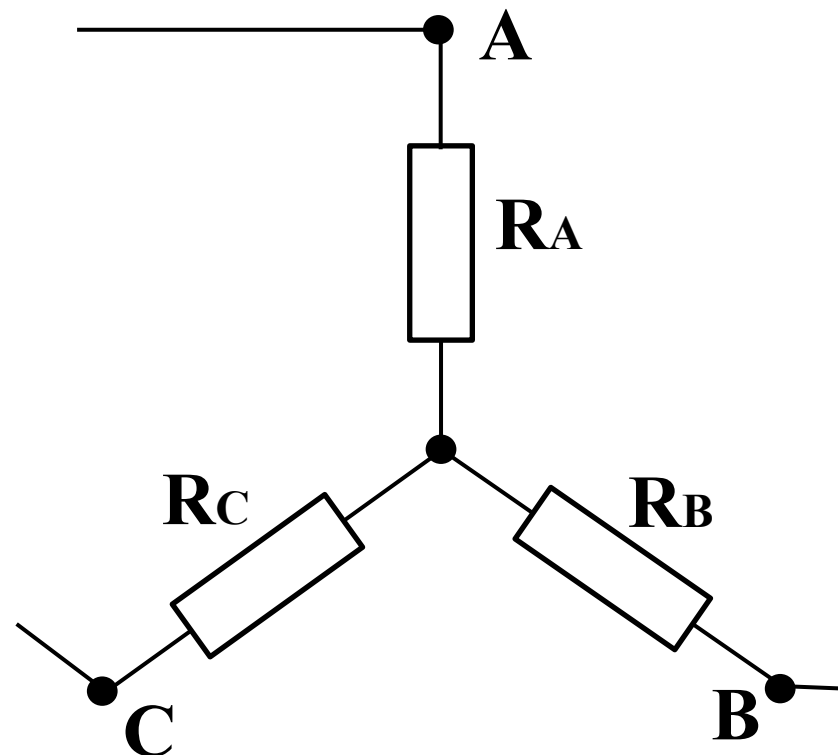
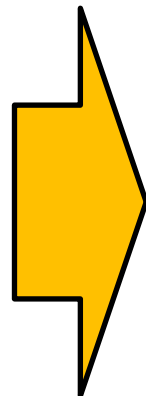
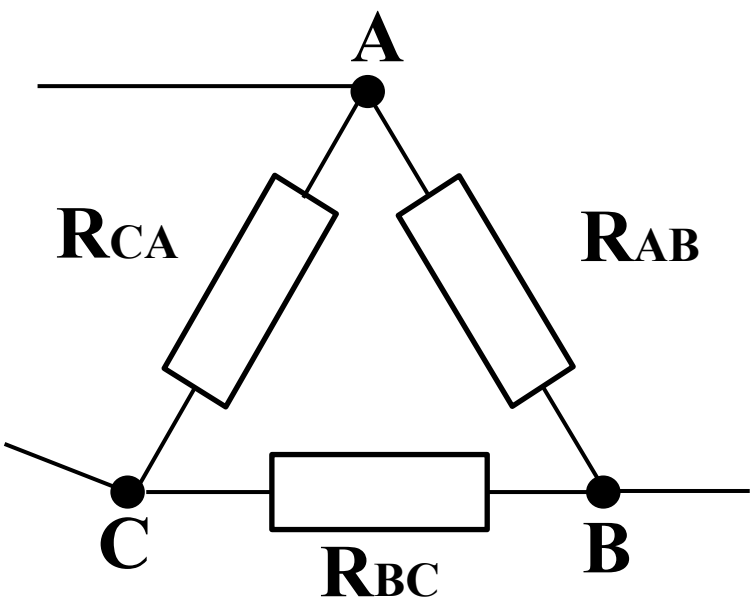
«Треугольник»



«Звезда»



# Переход от схемы «треугольник» к схеме «звезда»



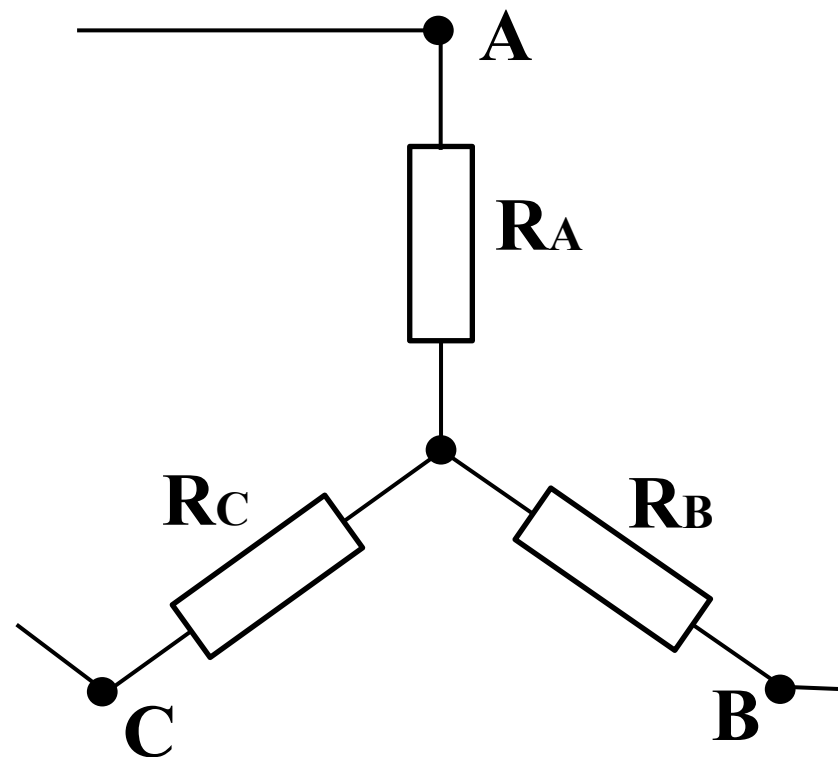
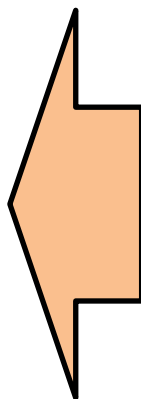
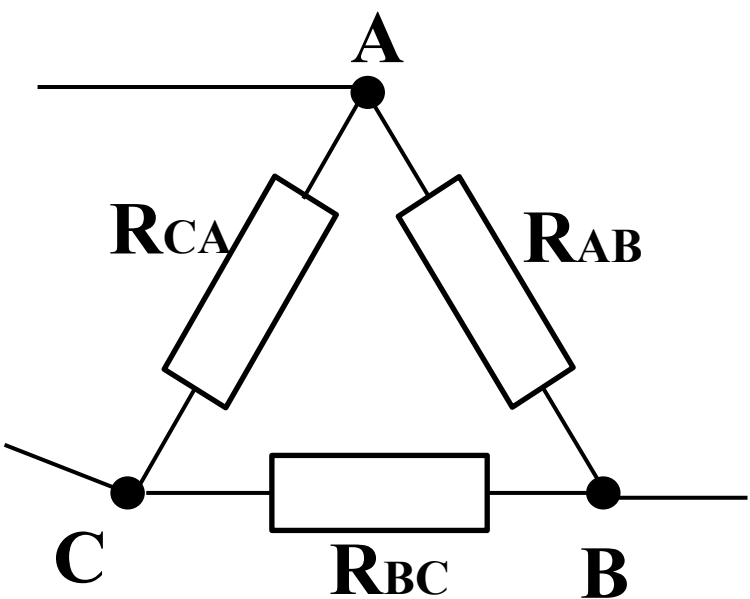
$$R_A = \frac{R_{AB} R_{CA}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}$$

$$R_B = \frac{R_{AB} R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}$$

$$R_C = \frac{R_{BC} R_{CA}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}$$



# Переход от схемы «звезда» к схеме «треугольник»



$$R_{AB} = R_A + R_B + \frac{R_A R_B}{R_C}$$

$$R_{BC} = R_B + R_C + \frac{R_B R_C}{R_A}$$

$$R_{CA} = R_C + R_A + \frac{R_C R_A}{R_B}$$

# **Понятие о магнитных цепях**

**Магнитная цепь - это совокупность устройств, содержащих ферромагнитные вещества (материалы) и образующих замкнутую цепь, вдоль которой замыкаются линии магнитной индукции ( $B$ ).**

## Вещества по магнитным свойствам:

**Ферромагнитные**

$(\mu \gg 1)$

**Неферромагнитные**

$(\mu \approx 1)$

**Магнитная проницаемость вещества ( $\mu_v$ )** - это способность вещества поддерживать распространение магнитного поля в нем. Измеряется в генри/метр [Гн/м].

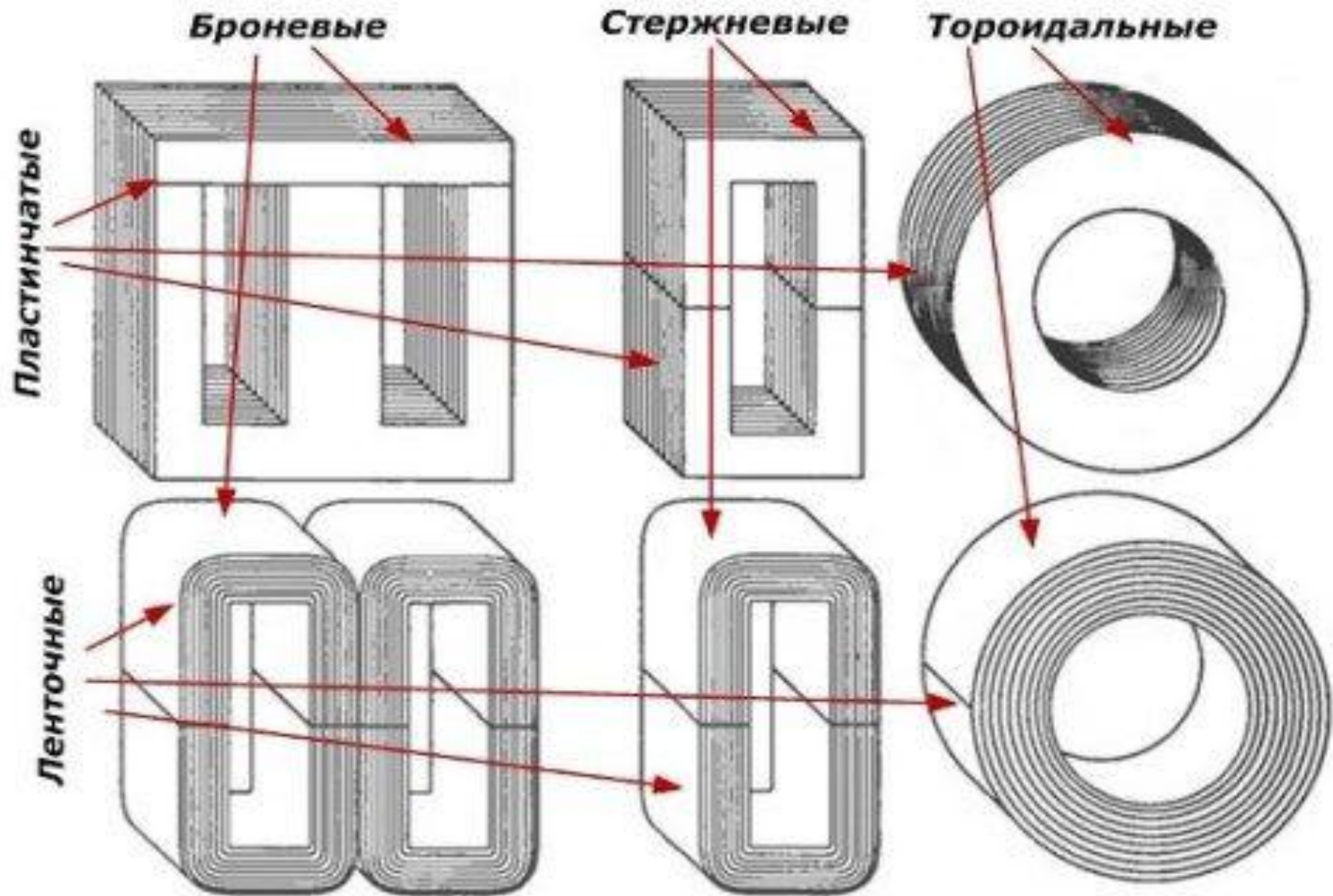
**Относительная магнитная проницаемость ( $\mu$ )** - это отношение магнитной проницаемости вещества ( $\mu_v$ ) к магнитной проницаемости вакуума  $\mu_0$  ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м).

Для концентрации магнитного поля и придания ему желаемой конфигурации отдельные **части** электротехнических устройств выполняются из **ферромагнитных** веществ. Эти **части** называют **магнитопроводами** или **сердечниками**.

# Примеры магнитопроводов (сердечников)

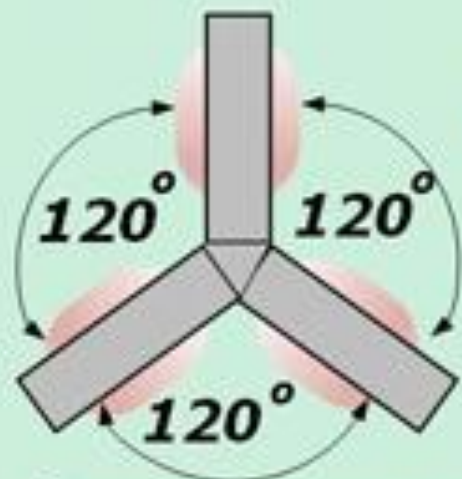


# Виды магнитопроводов у трансформаторов



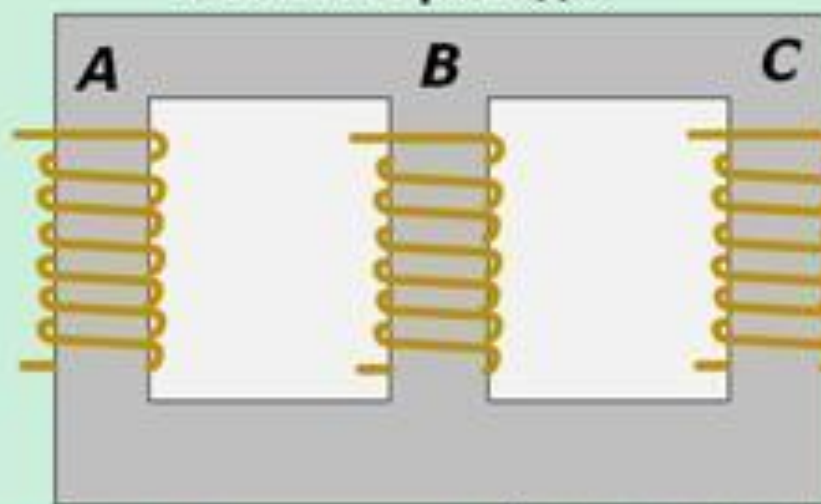
# Виды трехфазных магнитопроводов

Три однофазных трансформатора

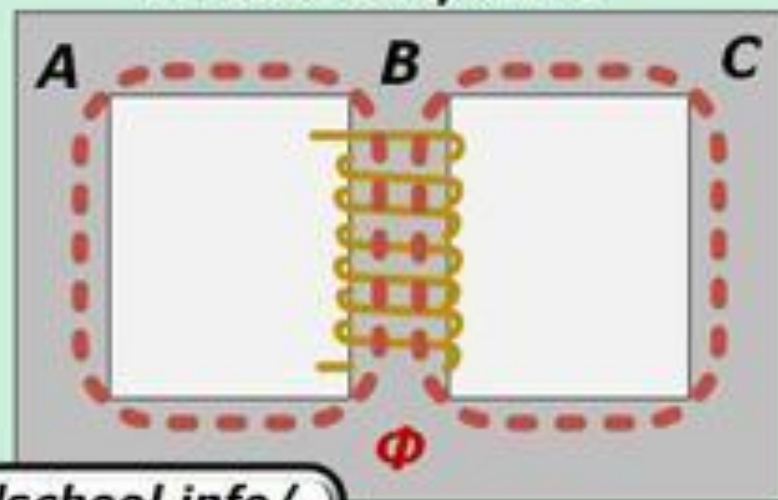
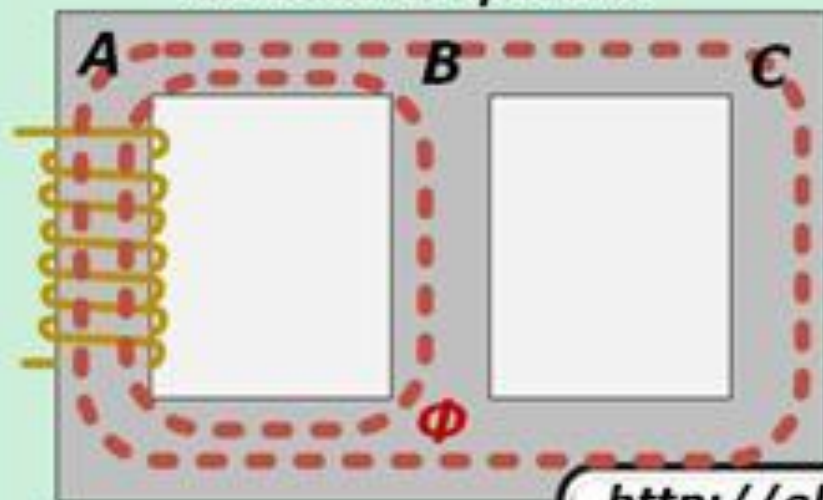


Распределение магнитных потоков от фазы А

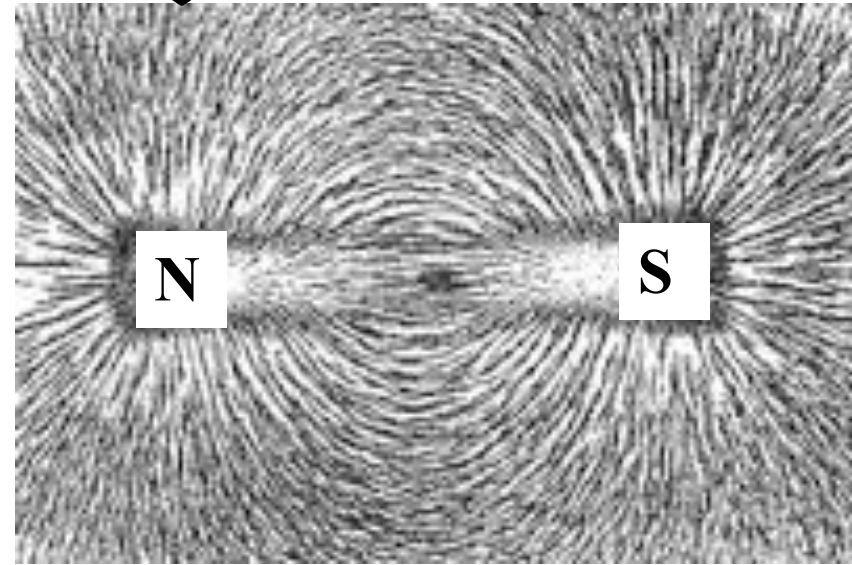
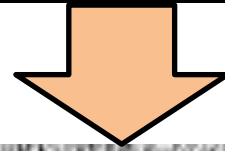
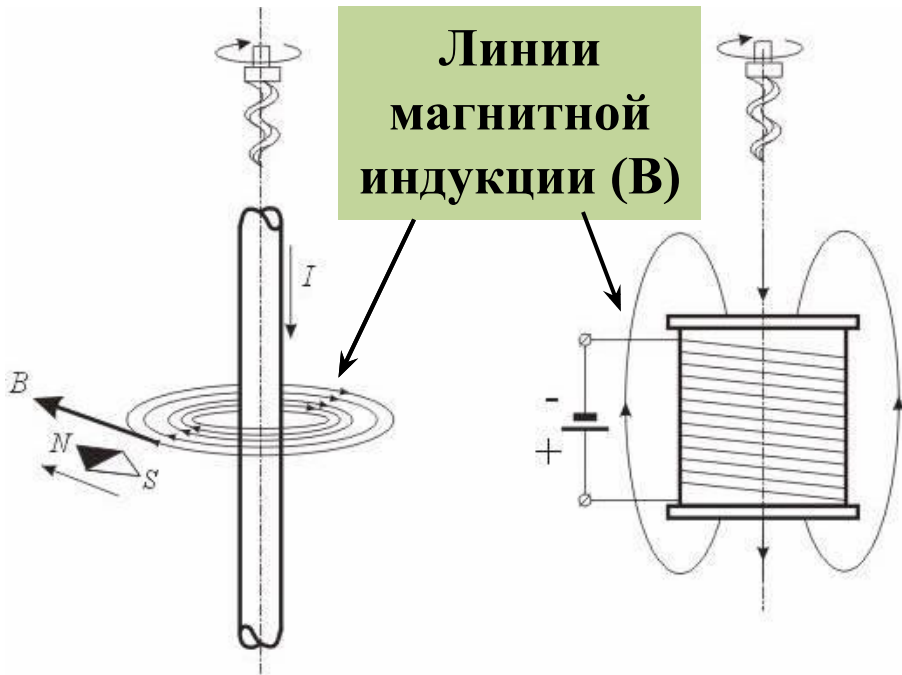
Три обмотки на общем магнитопроводе



Распределение магнитных потоков от фазы В

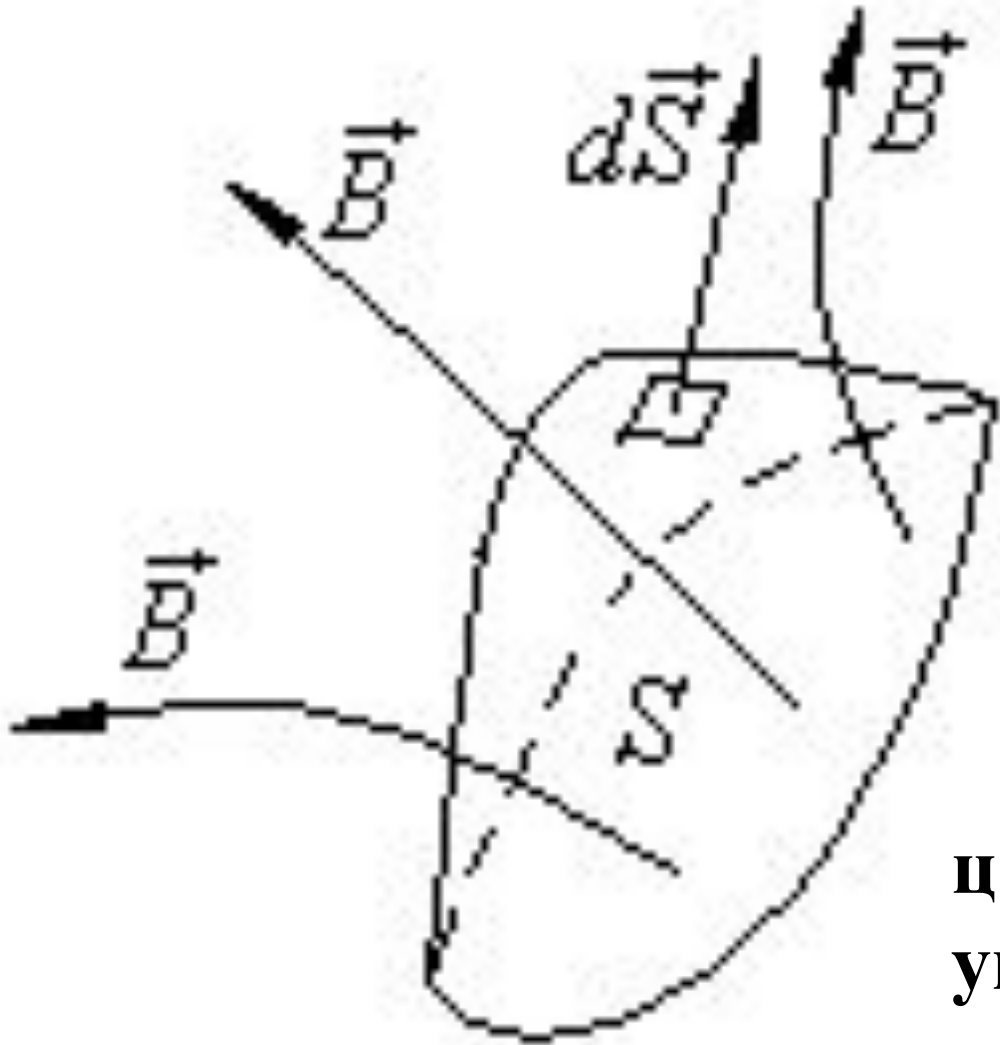


**Магнитный поток** создается токами, протекающими по обмоткам электротехнических устройств или постоянными магнитами.



**Процессы в магнитной цепи** описываются при помощи понятий магнитодвижущей силы (МДС), магнитного потока  $\Phi$  и разности магнитных потенциалов.

**Магнитный поток  $\Phi$  – это поток вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  через поверхность  $S$ .**



$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} \, ds$$

**Единица измерения магнитного потока вебер (Вб).**

**На схемах магнитных цепей магнитный поток указывается в виде стрелки.**



В теории магнитных цепей магнитное поле в пределах отдельных участков обычно считается однородным, при этом

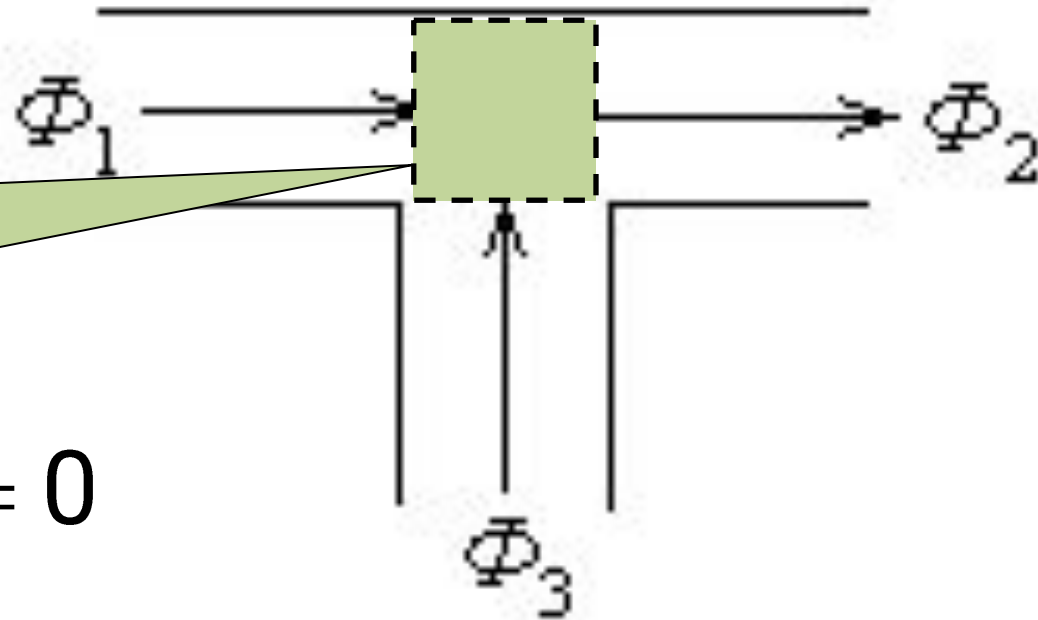
$$\Phi = BS$$

**S** – поперечное сечение участка магнитопровода. Индукция магнитного поля **B** и магнитный поток **Φ** положительны, если направление вектора  $\vec{B}$  совпадает с направлением стрелки магнитного потока, иначе они отрицательны.



# ПЕРВЫЙ ЗАКОН КИРХГОФА ДЛЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Узел магнитной цепи



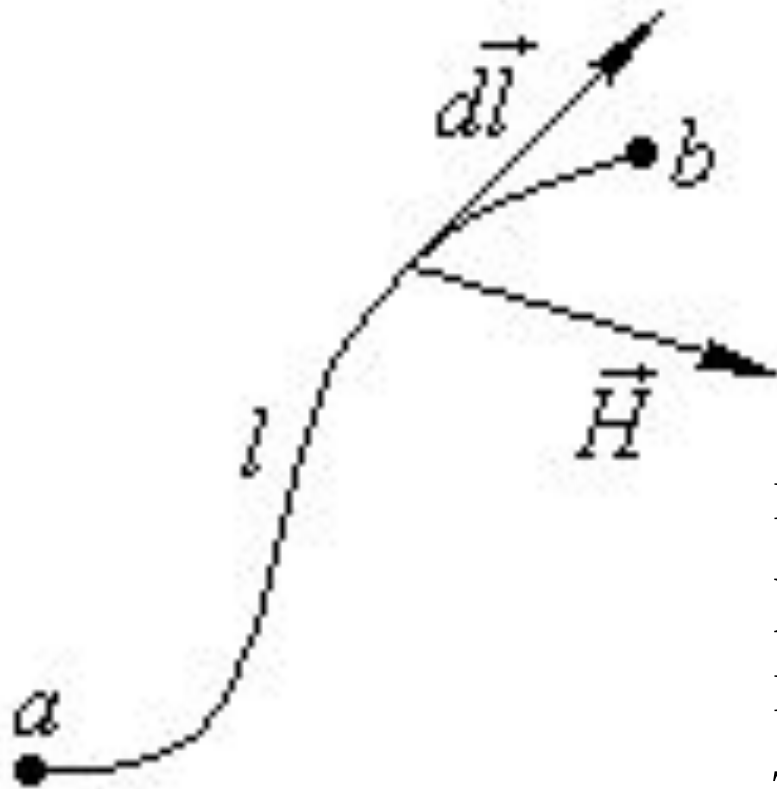
$$\sum_{k=1}^N \pm \Phi_k = 0$$

Сумма магнитных потоков, сходящихся в узле магнитной цепи, равна нулю.

Для представленного магнитопровода

$$-\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0$$

# Магнитное напряжение ( $U_M$ )



$$U_{M ab} = \int_a^b H dl$$

Магнитное напряжение между точками  $a$  и  $b$  – это работа напряженности магнитного поля по пути  $l$  от точки  $a$  до точки  $b$ , вычисленным по пути  $l$ .

Магнитное напряжение в этой области можно представить как разность магнитных потенциалов.  
Магнитное напряжение измеряется в амперах.

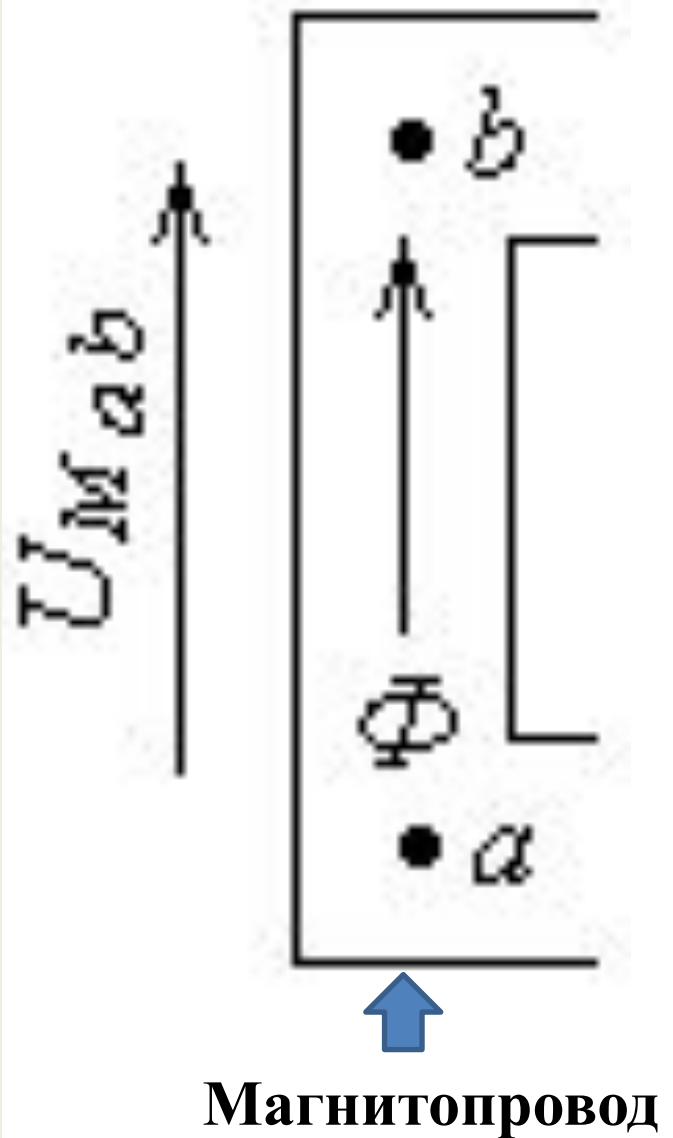
# Магнитное напряжение

На схемах магнитных цепей ориентация пути интегрирования  $l$  указывается в виде стрелки магнитного напряжения ( $U_{M ab}$ ).

Магнитное напряжение обычно отсчитывается в том же направлении, что и магнитный поток  $\Phi$ .

В пределах участка магнитной цепи, в котором магнитное поле считается однородным,  $U_{M ab} = Hl$

Напряженность  $H$  и магнитное напряжение  $U_M$  положительны, если направление вектора  $H$  совпадает с направлением стрелки магнитного напряжения, иначе они отрицательны.



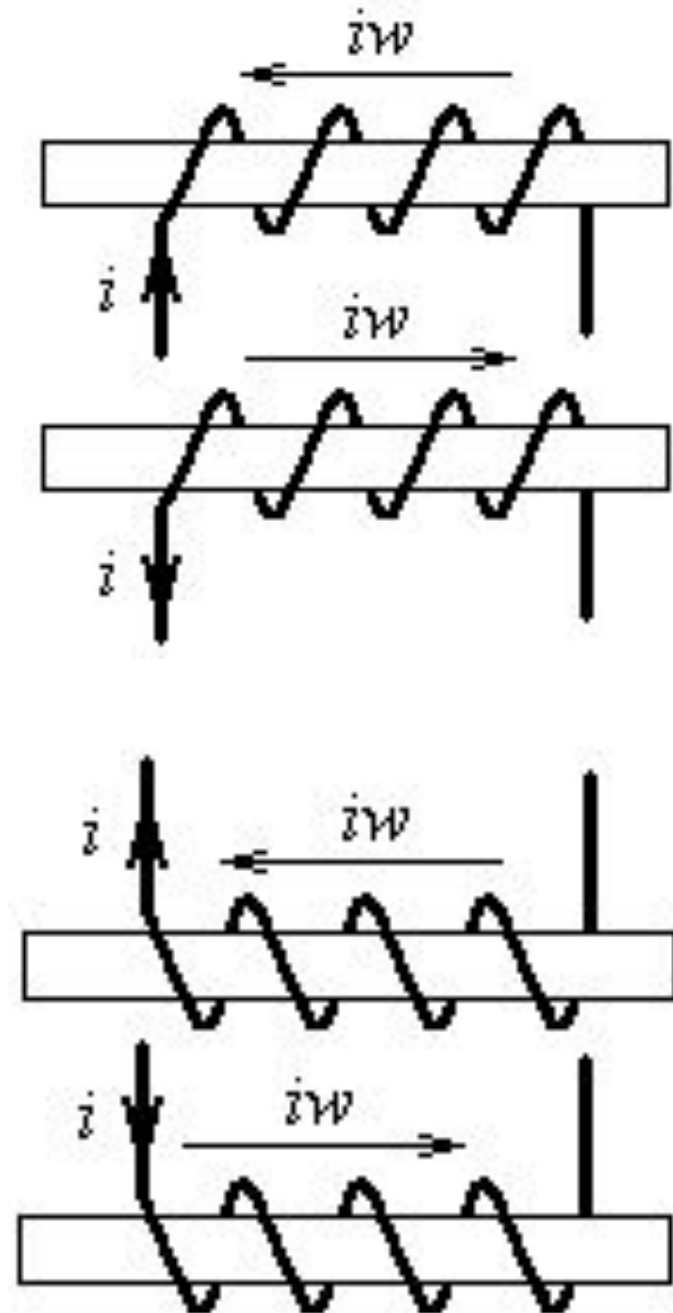
# Магнитодвижущая сила обмотки

Магнитодвижущая сила  $F$  (м. д.с.) обмотки - это произведение тока обмотки  $i$  на число витков  $w$ :

$$F = i \cdot w.$$

М.д.с. имеет направление, которое определяется **правилом правого винта** в зависимости от направления стрелки тока и направления намотки провода.

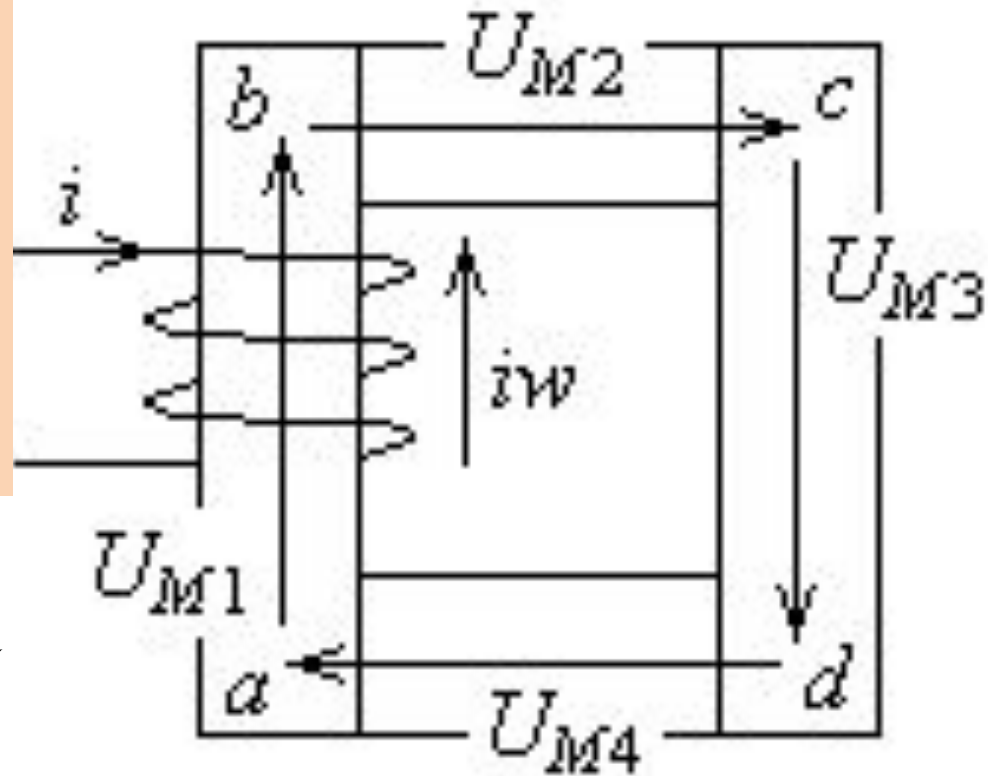
М.д.с. называют также **намагничивающей силой**.



# Второй закон Кирхгофа для магнитных цепей

Сумма магнитных напряжений в любом контуре магнитной цепи равна сумме м.д.с. этого контура.

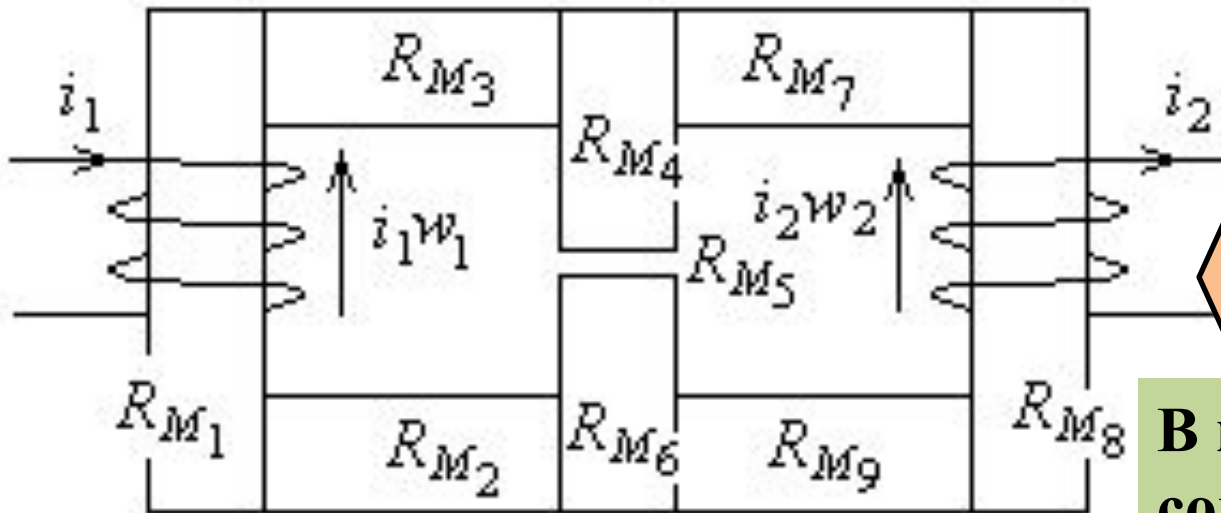
$$\sum_{k=1}^N \pm U_{Mk} = \sum_{k=1}^M \pm i_k w_k$$



Для приведенной магнитной цепи второй закон Кирхгофа:

$$U_{M1} + U_{M2} + U_{M3} + U_{M4} = iw$$

# Схемы магнитных цепей

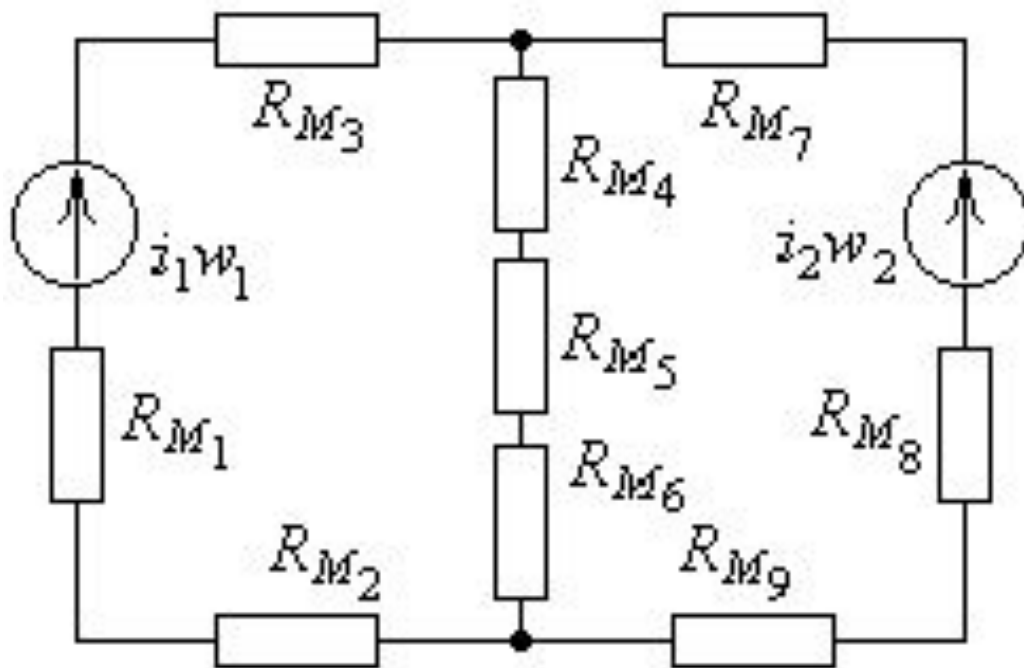


Магнитная цепь в виде рисунка

В качестве магнитных сопротивлений рассматриваем участки магнитопровода

$R_{M1} \dots R_{M4}, R_{M6} \dots R_{M9}$

и воздушный зазор  $R_{M5}$



Магнитная цепь в виде схемы

# Аналогия величин и законов для электрических и магнитных цепей

Электрическая цепь	Магнитная цепь
Ток $I$ , А	Поток $\Phi$ , Вб
ЭДС $E$ , В	МДС (НС) $F$ , А
Электрическое сопротивление $R$ , Ом	Магнитное сопротивление $R_M$ , 1/Гн
Электрическое напряжение $U$ , В	Магнитное напряжение $U_M$ , А
Первый закон Кирхгофа: $\sum I = 0$	Первый закон Кирхгофа: $\sum \Phi = 0$
Второй закон Кирхгофа: $\sum E = \sum U$	Второй закон Кирхгофа: $\sum F = \sum U_M$
Закон Ома: $U = I \cdot R$	Закон Ома: $U_M = F \cdot R_M$



**При расчете магнитных цепей (определении  $F$ ,  $U_M$ ,  $R_M$ ) пользуются по аналогии с электрическими цепями законами Ома для участка цепи и двумя законами Кирхгофа для магнитных цепей.**

**Однако подобие формул для электрической и магнитной цепей только внешнее. Никаких физических аналогий явлений в электрической и магнитной цепях не существует.**