

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



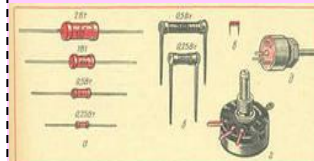
Электрический
двигатель



Преобразует
электрическую
энергию
в
механическую



Резистор



Расходуется
электрическая
энергия
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

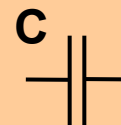
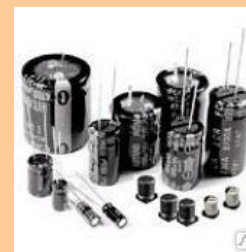


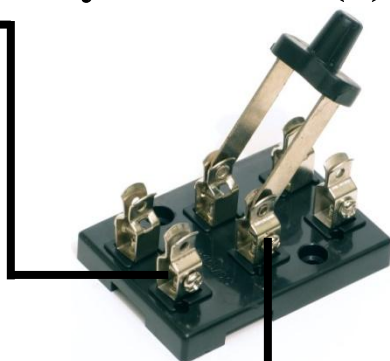
Схема электрической цепи – это ее графическое изображение

Эскизное изображение электрической цепи

Аккумулятор (1)



Рубильник (2)



Электрическая лампа (3)



Амперметр (4)



Вольтметр (5)

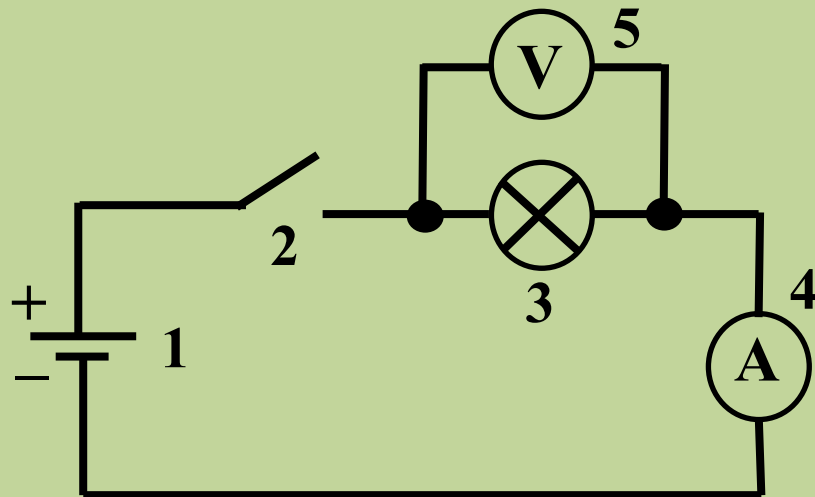


При замыкании рубильника к аккумулятору подключается электрическая лампа.

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

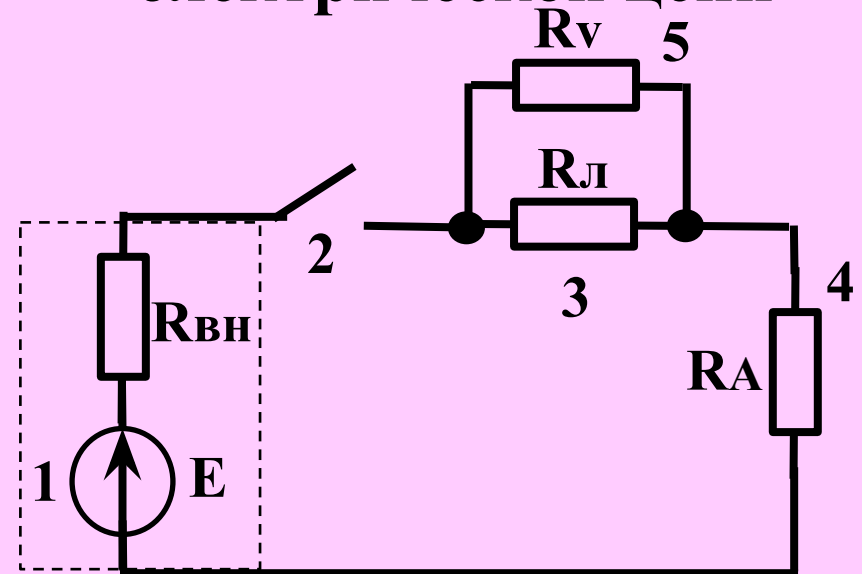
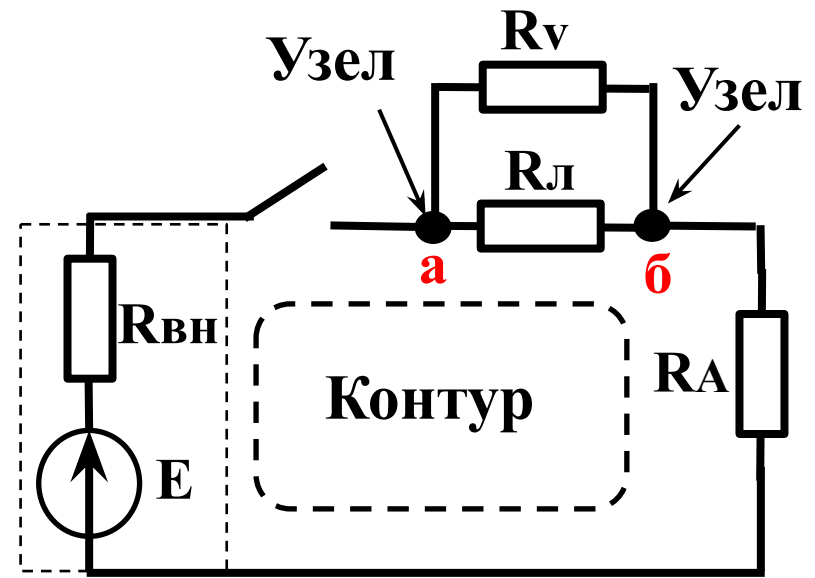


Схема замещения состоит из идеализированных элементов:
 $R_{\text{л}}$ – сопротивление лампы,
 $R_{\text{в}}$ – сопротивление вольтметра,
 $R_{\text{а}}$ – сопротивление амперметра,
 $R_{\text{вн}}$ – сопротивление аккумулятора,
 E – ЭДС аккумулятора.

Топологические понятия в электрической цепи

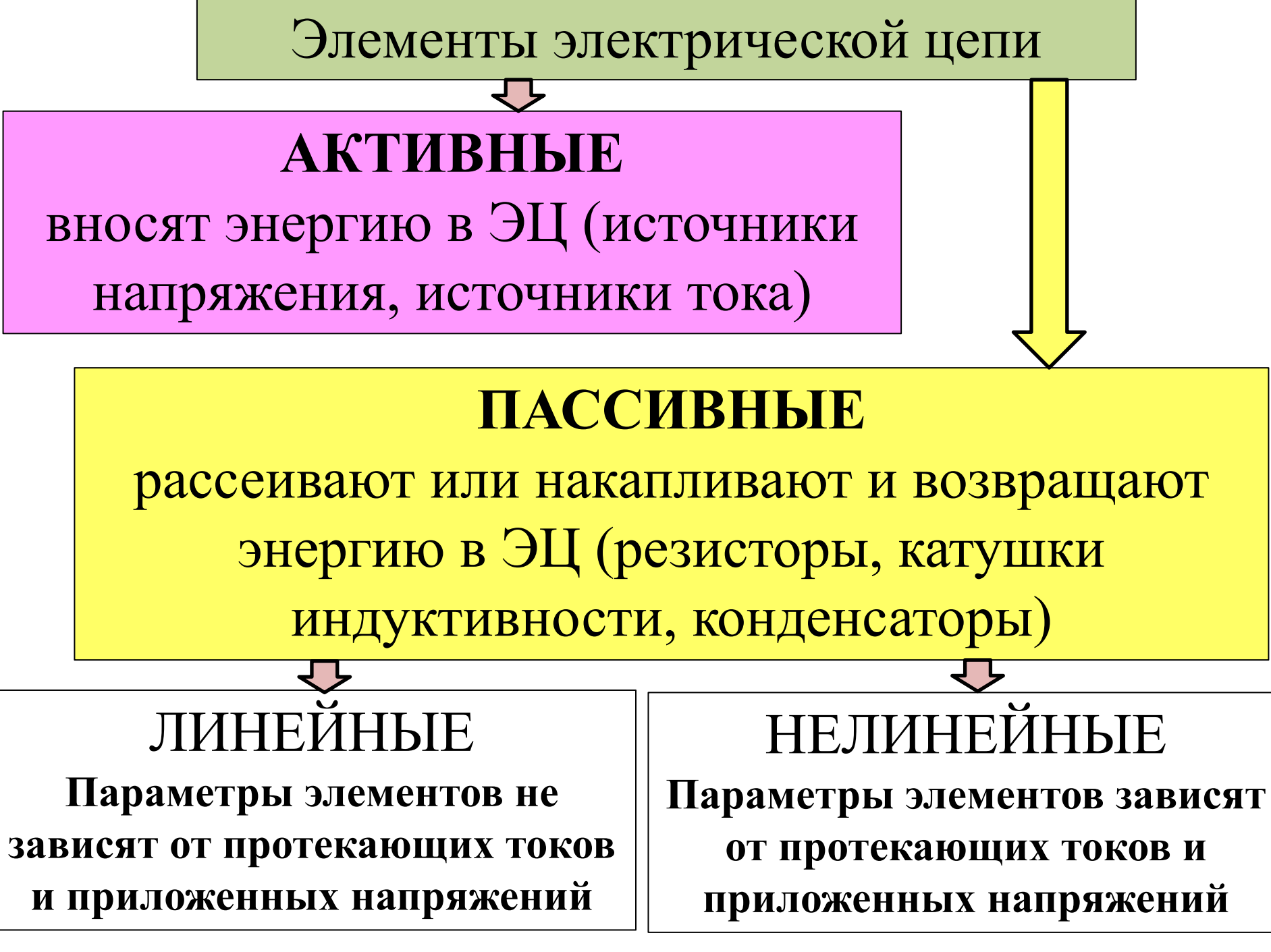
ВЕТВЬ – один или несколько последовательно соединенных элементов, имеющих два вывода (начало и конец). В схеме – три ветви, включающие: R_V ; R_L ; $R_A - E - R_{ВН}$.

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)]; C --> D[ЛИНЕЙНЫЕ  
Параметры элементов не  
зависят от протекающих токов  
и приложенных напряжений]; 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

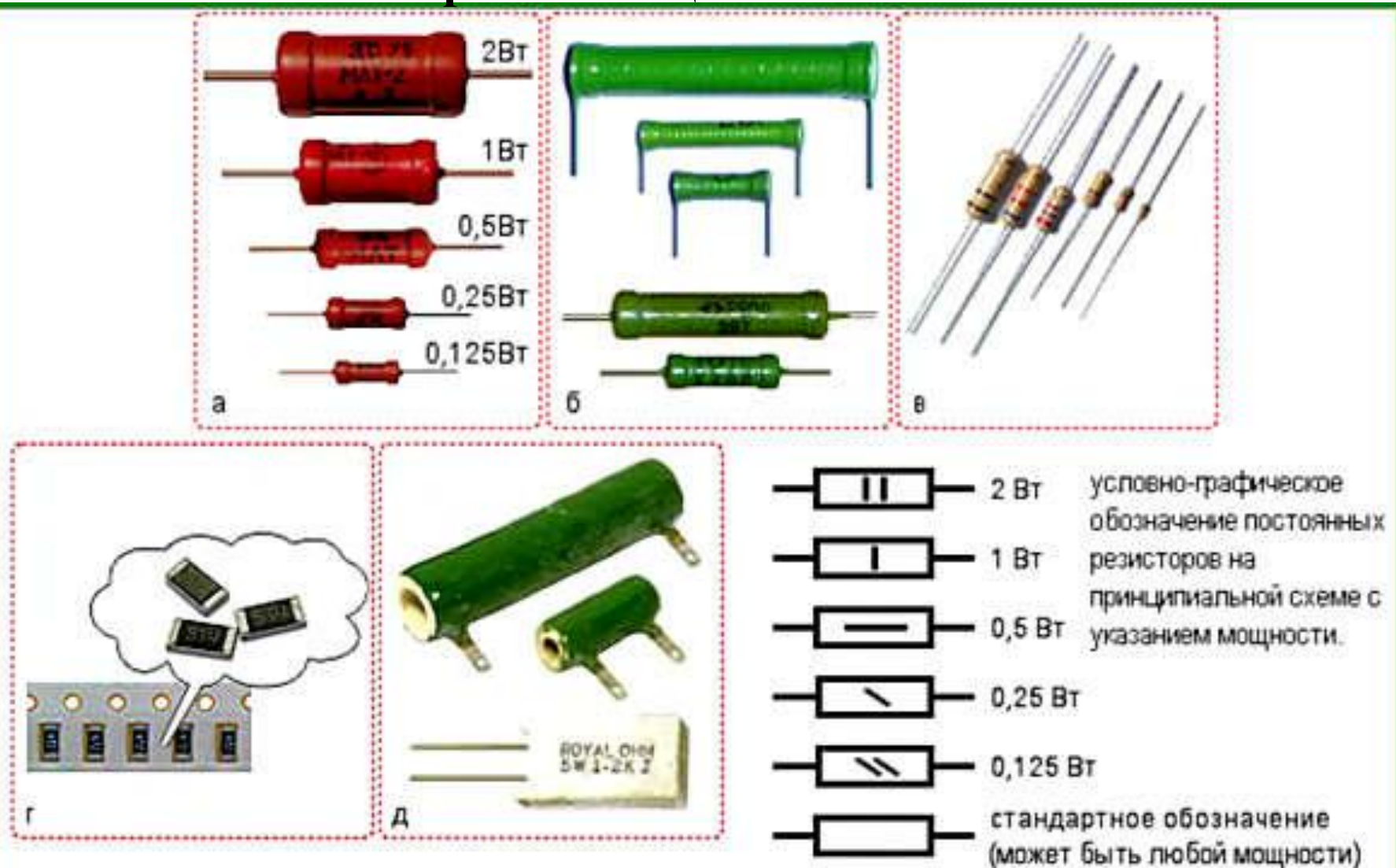


Рис.1. Внешний вид некоторых постоянных резисторов импортного и отечественного производства, обозначения на принципиальной схеме: а – отечественные МЛТ; б – отечественные, устаревшие; в – с цветной маркировкой; г – ЧИП-резисторы; д – мощные, проволочные.

Элементы электрических цепей

РЕЗИСТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ (R)

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

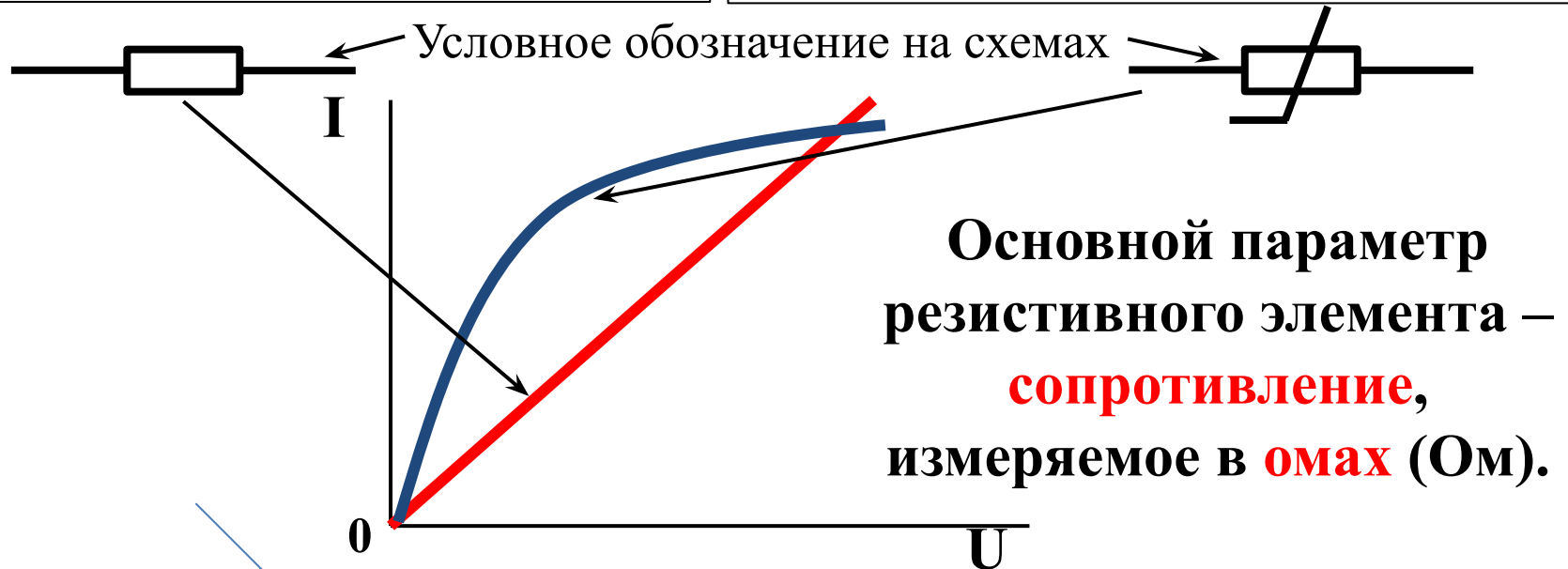
РЕЗИСТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

ЛИНЕЙНЫЙ РЕЗИСТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

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

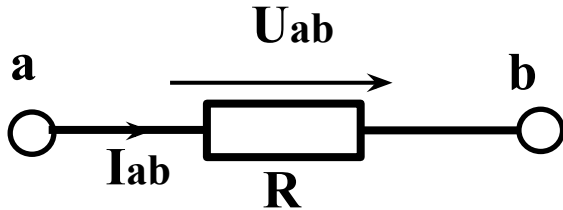
НЕЛИНЕЙНЫЙ РЕЗИСТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Связь между I и U нелинейная



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.

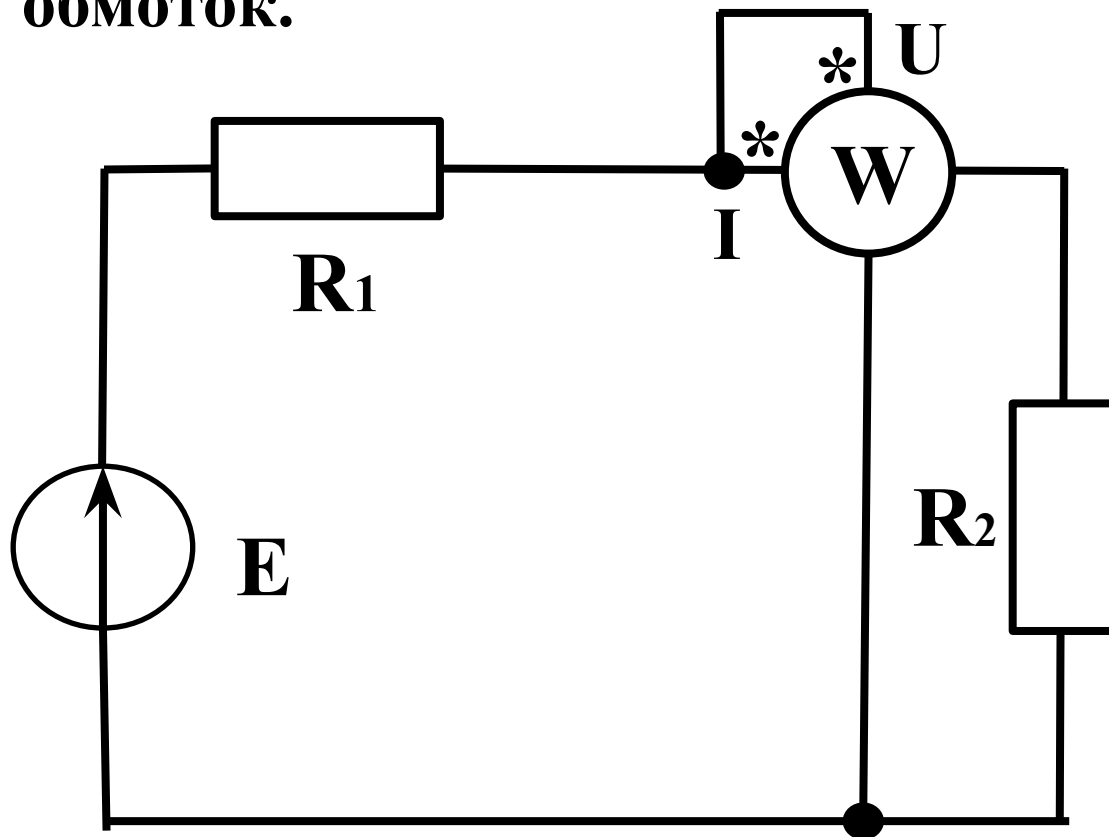


Схема измерения
активной
мощности,
потребляемой
резистивным
элементом R_2 .

Элементы электрической цепи

КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ



Элементы электрических цепей

ИНДУКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ (L)

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

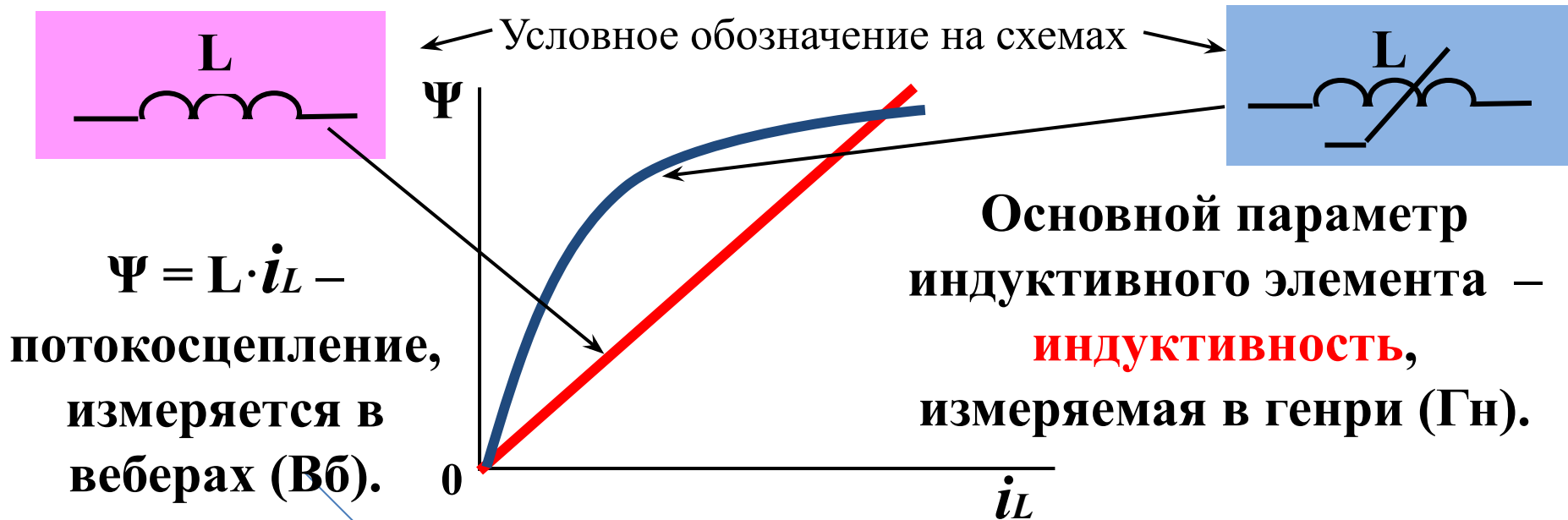
ИНДУКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

ЛИНЕЙНЫЙ ИНДУКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

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

НЕЛИНЕЙНЫЙ ИНДУКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Связь между i_L и Ψ нелинейная



Элементы электрической цепи

КОНДЕНСАТОРЫ



Элементы электрических цепей

ЕМКОСТНОЙ ЭЛЕМЕНТ (C)

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

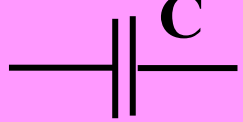
ЕМКОСТНОЙ ЭЛЕМЕНТ

ЛИНЕЙНЫЙ ЕМКОСТНОЙ ЭЛЕМЕНТ

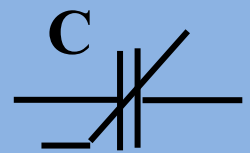
$$i_c = C \cdot d u_c / dt \quad (C = \text{const})$$

НЕЛИНЕЙНЫЙ ЕМКОСТНОЙ ЭЛЕМЕНТ

Связь между i_c и u_c нелинейная

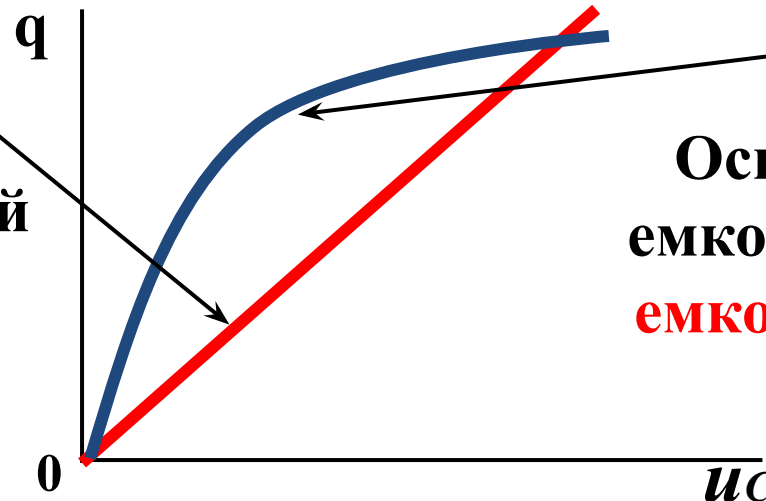


← Условное обозначение на схемах →



q – накопленный заряд/

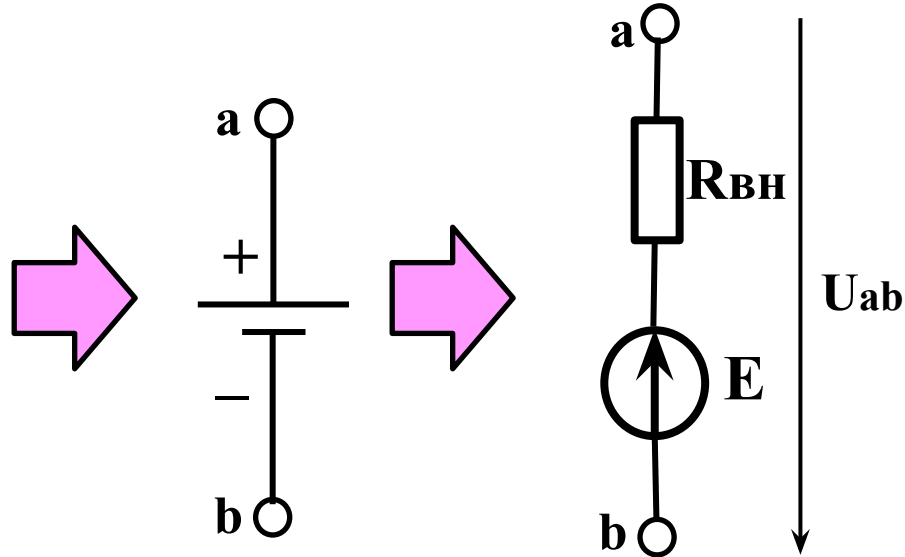
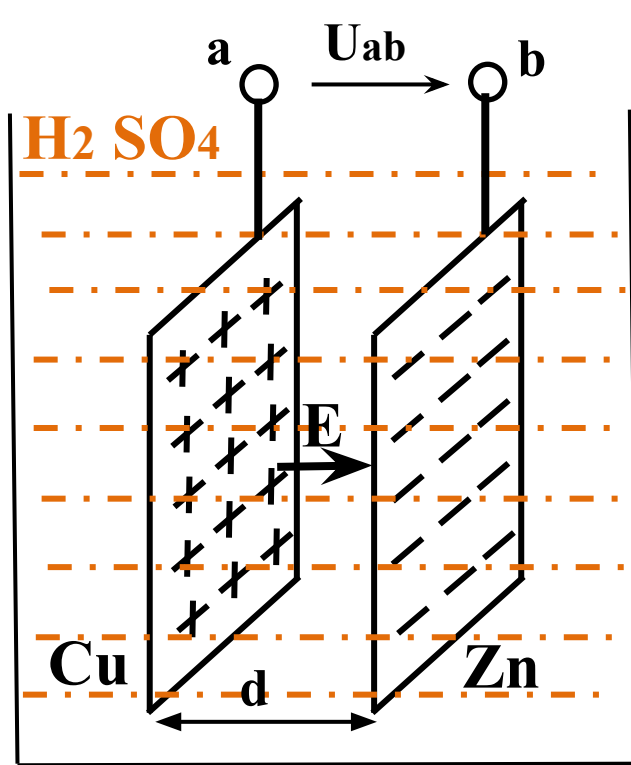
$$q = C \cdot u_c$$



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

Источники электрической энергии постоянного тока

Гальванический элемент



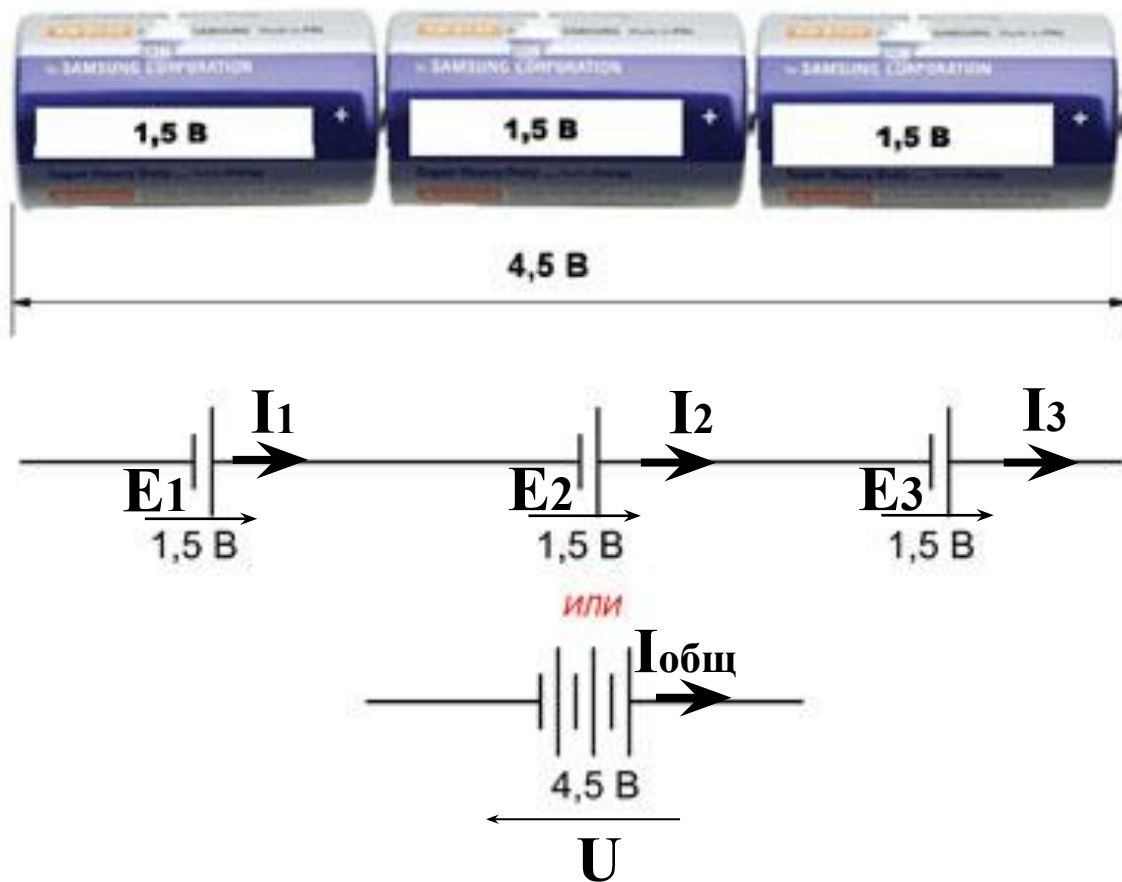
Стрелка ЭДС внутри источника показывает направления движения положительных зарядов внутри источника под действием сторонних сил. Стрелка напряжения U_{ab} показывает направление движения положительных зарядов в приемнике, если его подключить.

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

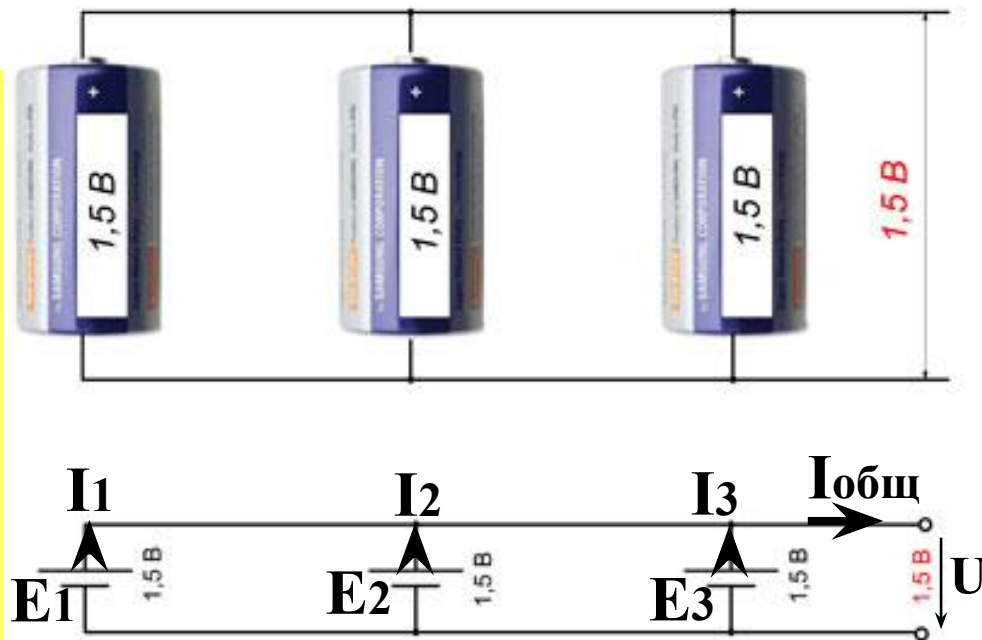
При параллельном соединении источников ЭДС, их одноименные выводы соединяются вместе, то есть плюс к плюсу, минус к минусу

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

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



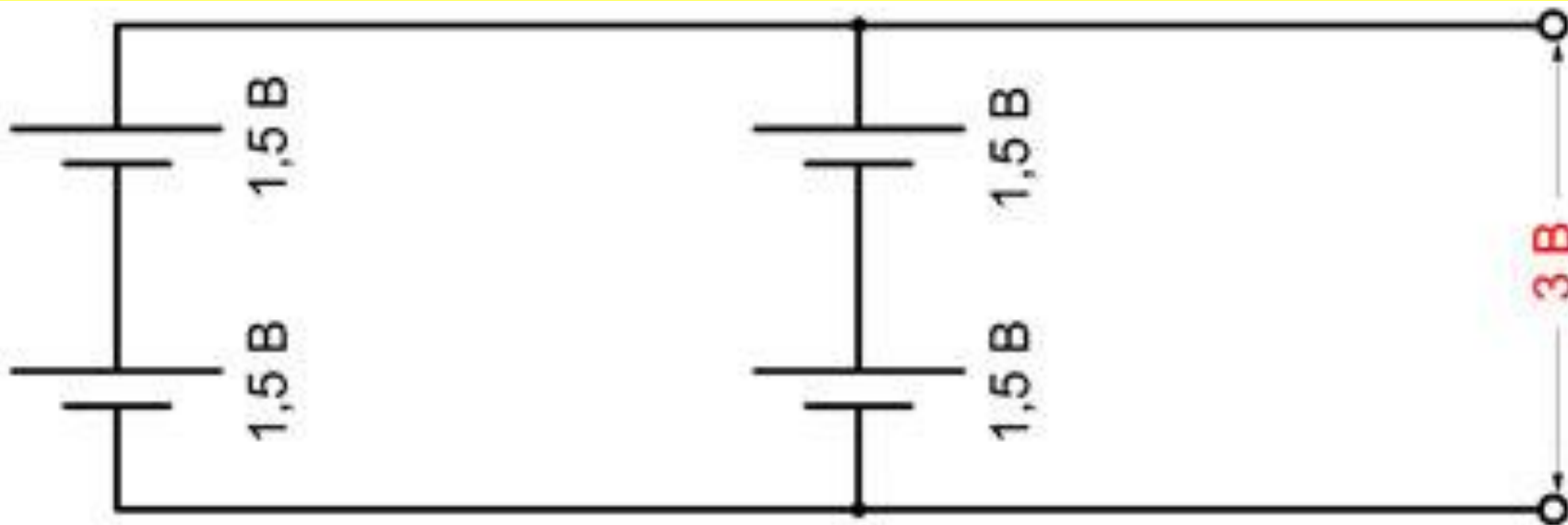
При параллельном соединении источников ЭДС важно, чтобы они имели одинаковое напряжение. Если один из элементов имеет меньшее напряжение, то остальные будут частично разряжаться через него, сокращая срок службы соединенных элементов в целом.

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.

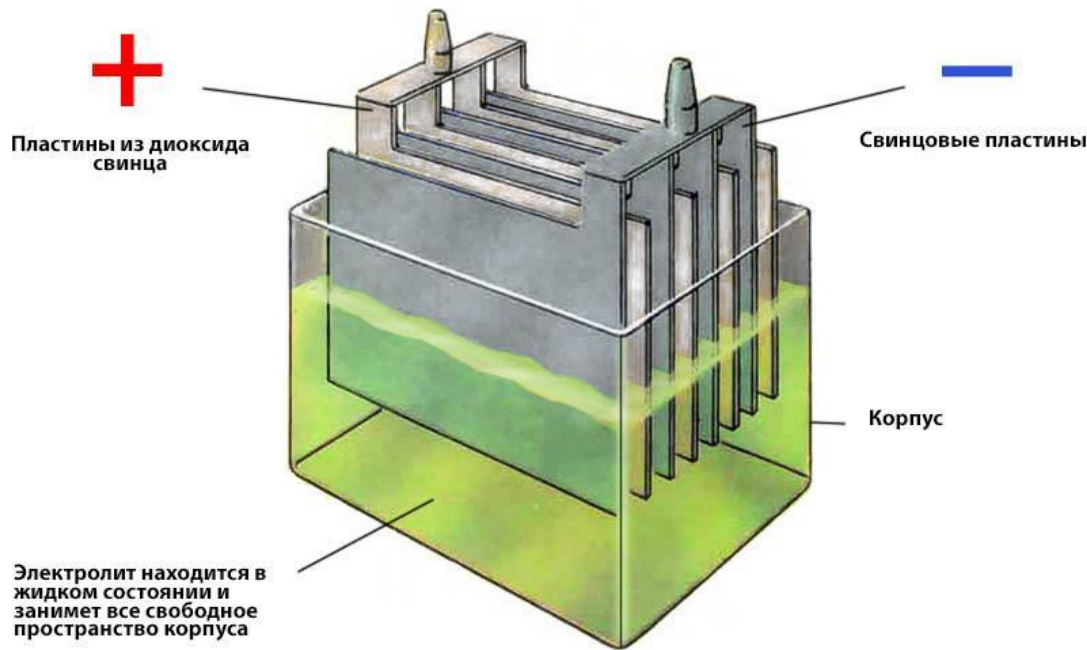
Пример последовательно-параллельной схемы включения источников ЭДС:



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 энергии преобразуется в электрическую.

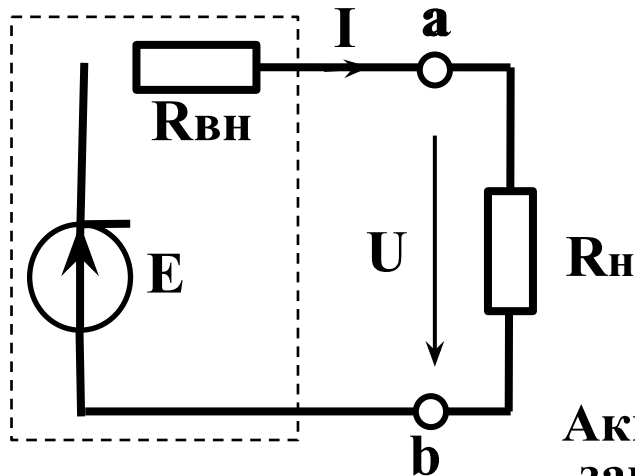
Работает АКБ циклично по принципу регулярного заряда и разряда. При подключении нагрузки АКБ разряжается. При этом положительные электроды (диоксид свинца) и отрицательные (свинец губчатого типа) вступают в химическую реакцию с электролитом.

Источник ЭДС

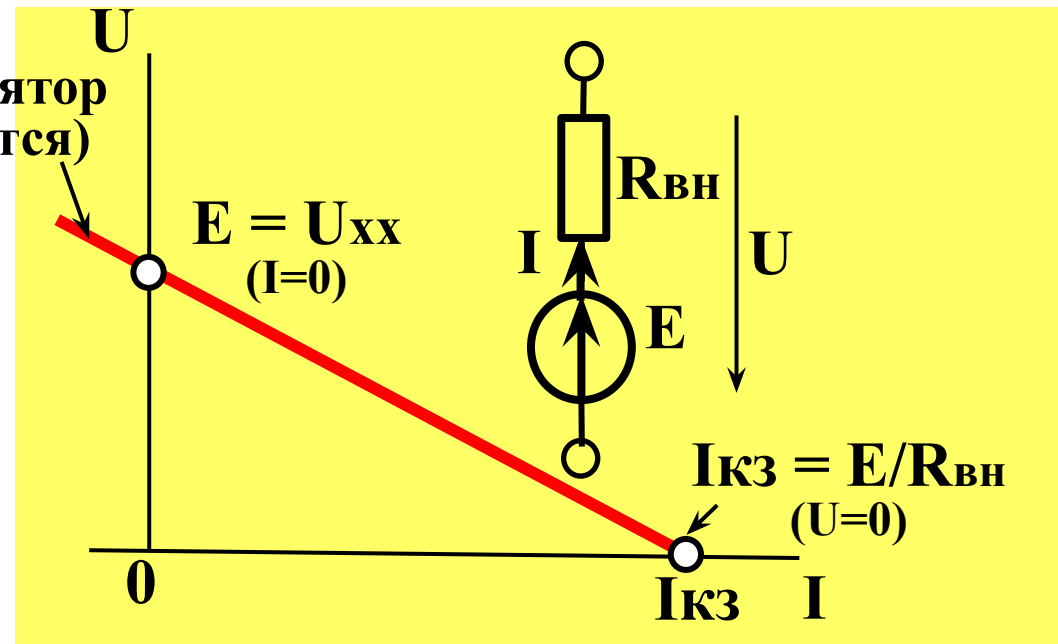
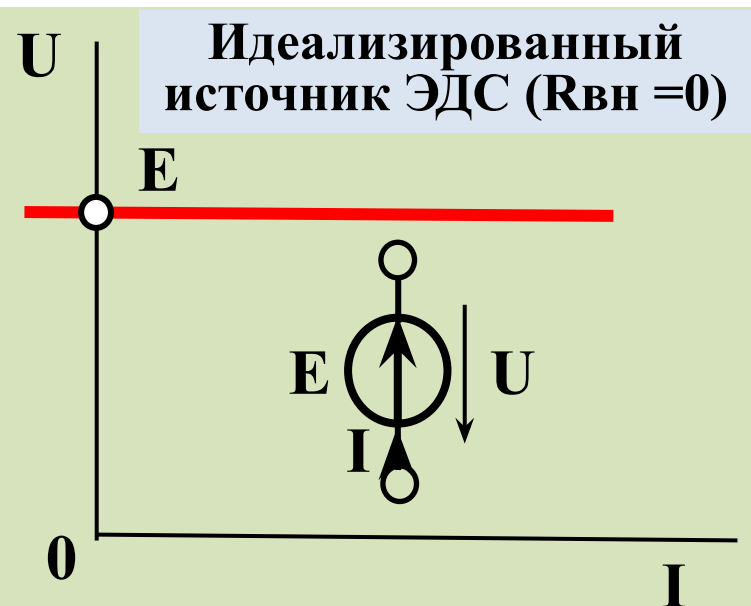
Вольтамперная (внешняя)
характеристика источника ЭДС – это
зависимость напряжения между его
выводами от тока. $U = F(I)$

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

Реальный источник ЭДС



Аккумулятор
заряжается)



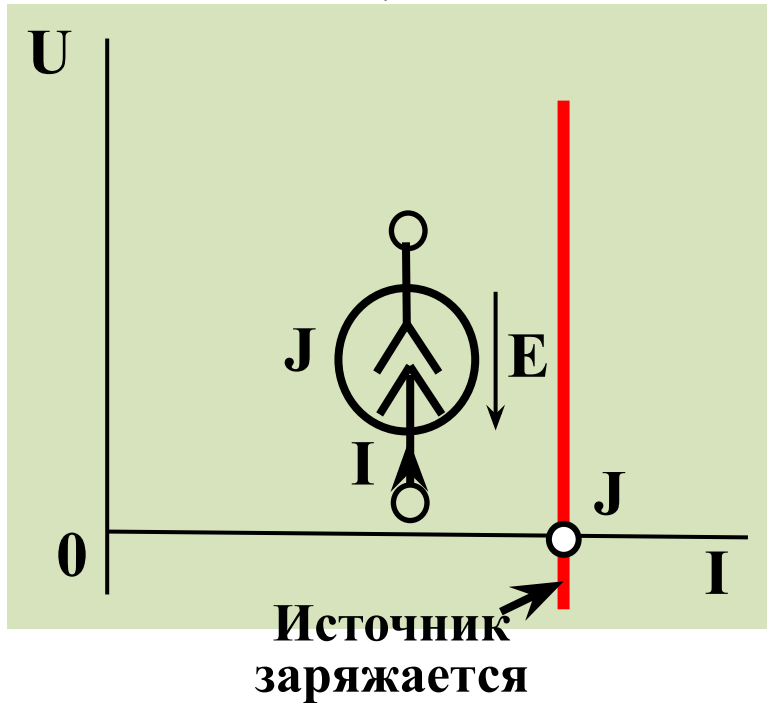
КЗ - короткое
замыкание

ХХ – холостой ход

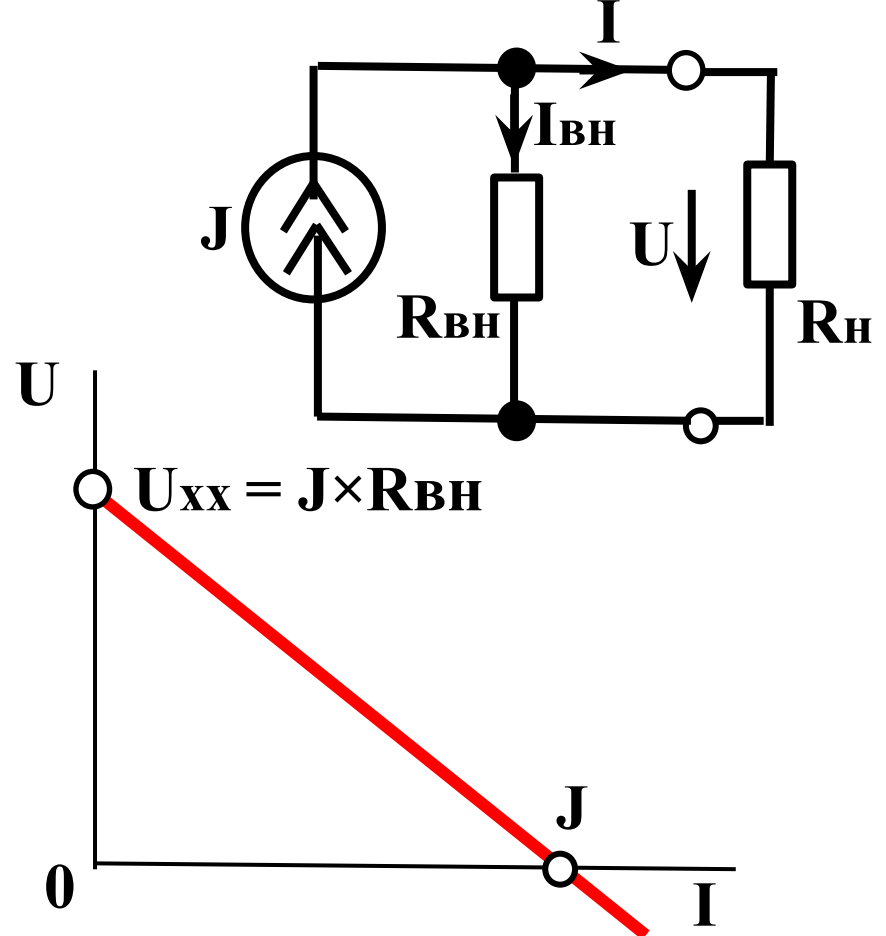
Источник тока

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

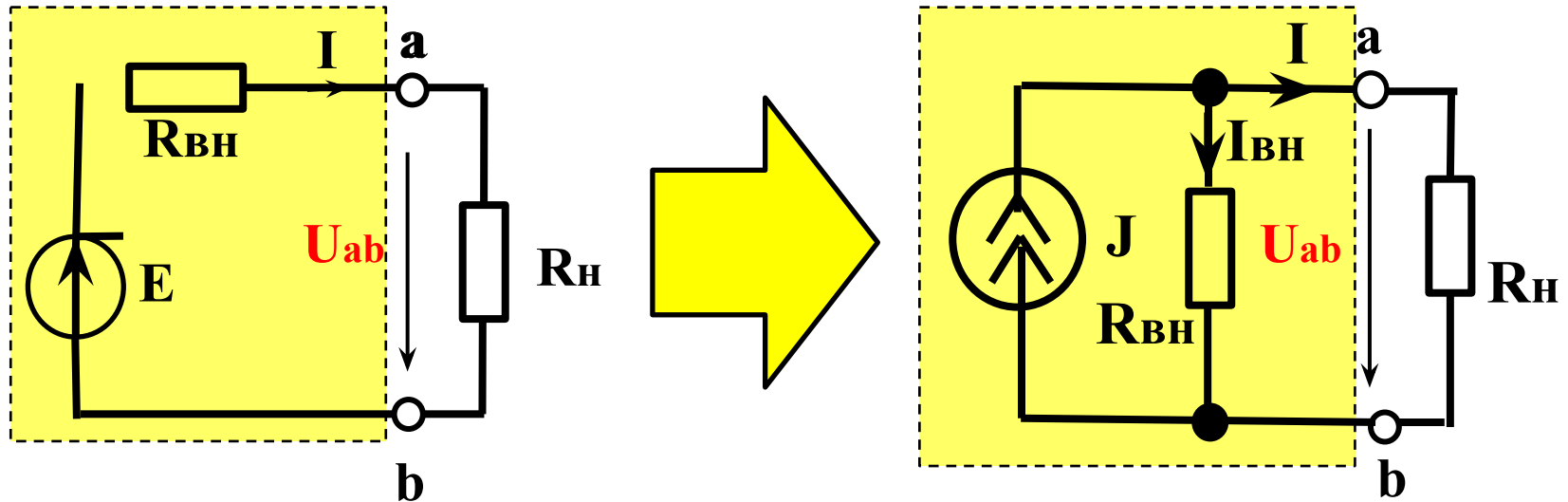
Источник с такими параметрами называют идеальным источником тока.



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!

$$U_{ab} = E - I \cdot R_{вн} \quad \xrightarrow{:R_{вн}} \quad U_{ab}/R_{вн} = E/R_{вн} - I$$

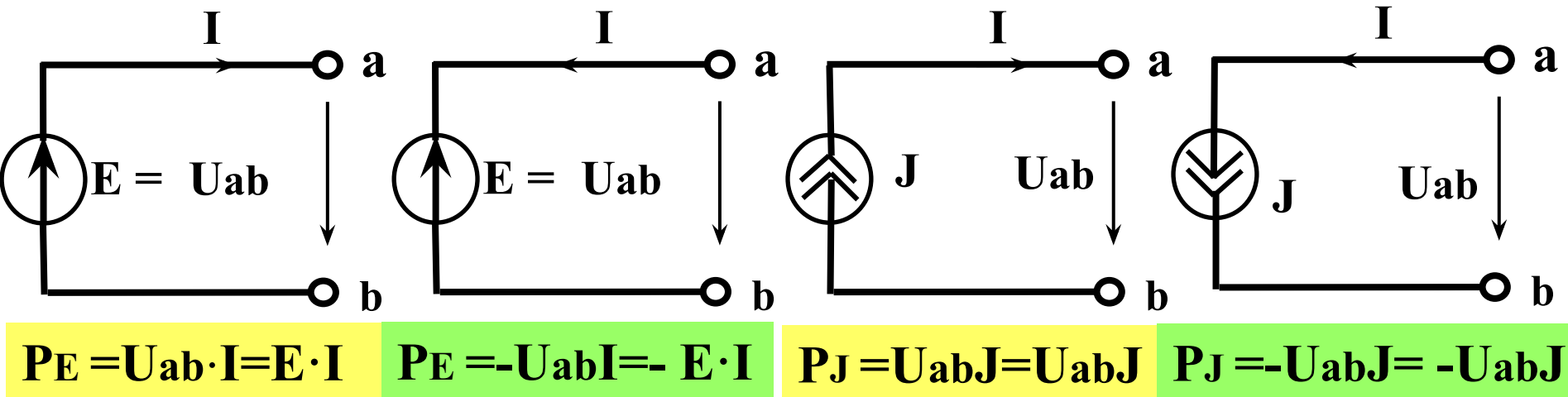
$$E/R_{вн} = J = U_{ab}/R_{вн} + I = I_{вн} + I$$

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



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

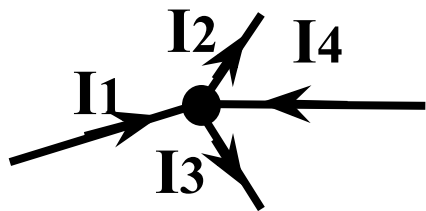
Первый закон Кирхгофа

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.



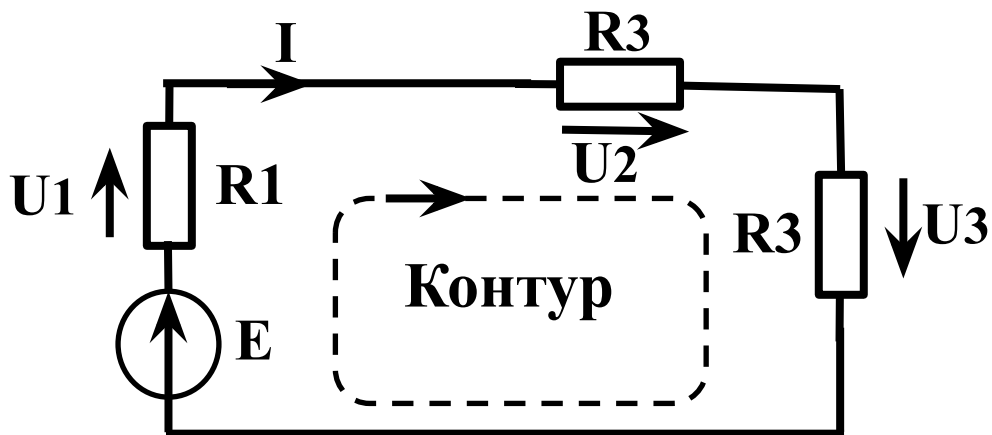
$$-I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0$$

Второй закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма
напряжений участков любого
контура электрической цепи
равна нулю

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

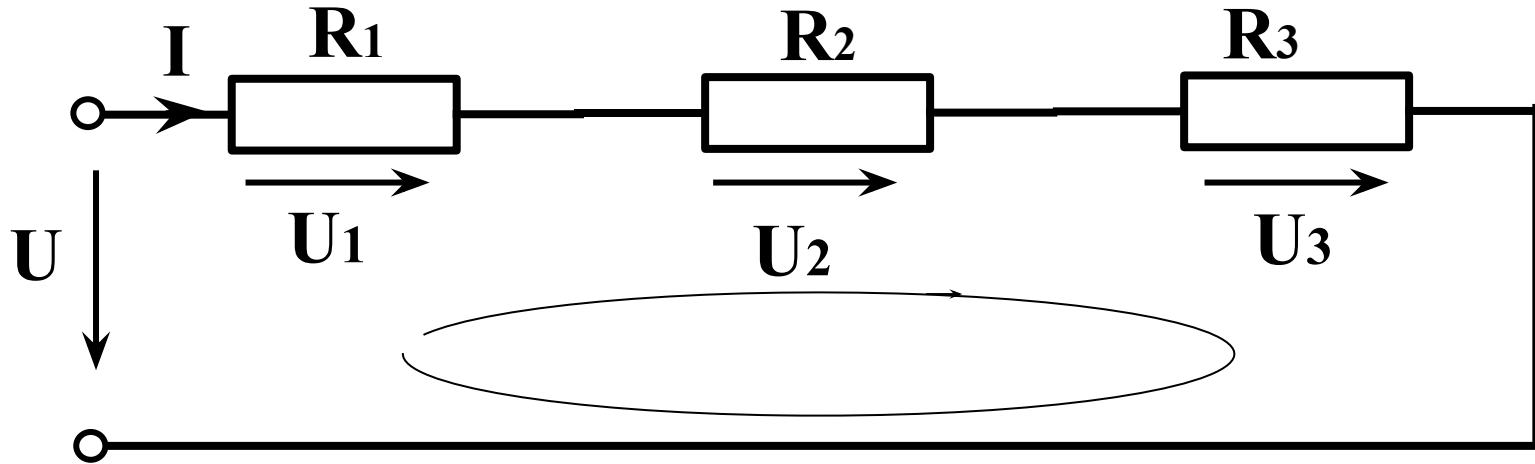
Со знаком + записываются
напряжение, положительные
направлением которых
совпадают с направлением
обхода контура, или наоборот.



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

Соединение резистивных элементов

Последовательное



По 2-му закону Кирхгофа:

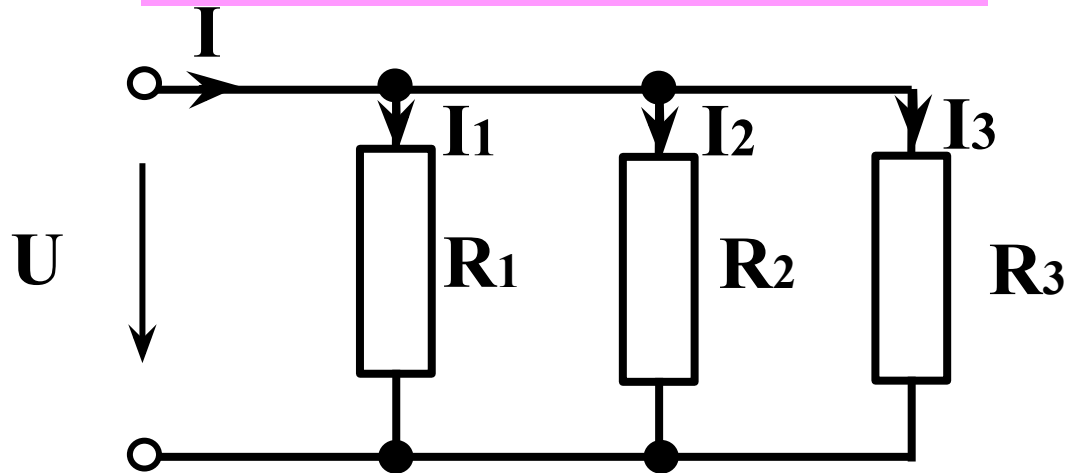
$$U = U_1 + U_2 + U_3 = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

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

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:

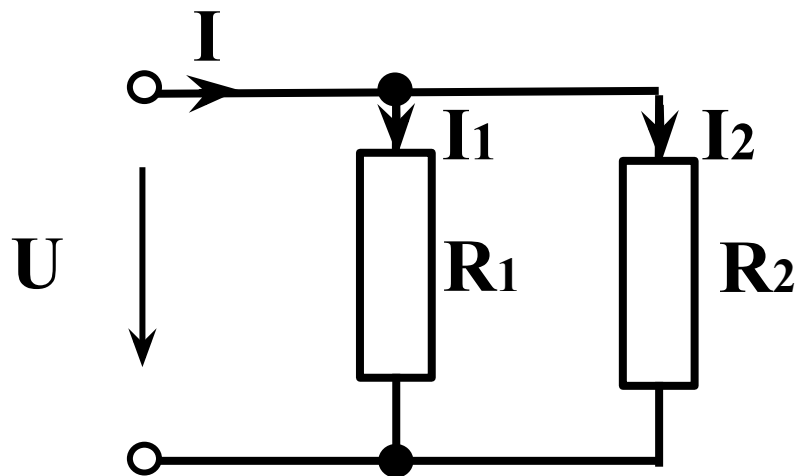
$$I = I_1 + I_2 + I_3 = U/R_1 + U/R_2 + U/R_3 = U(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3)$$

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

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

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

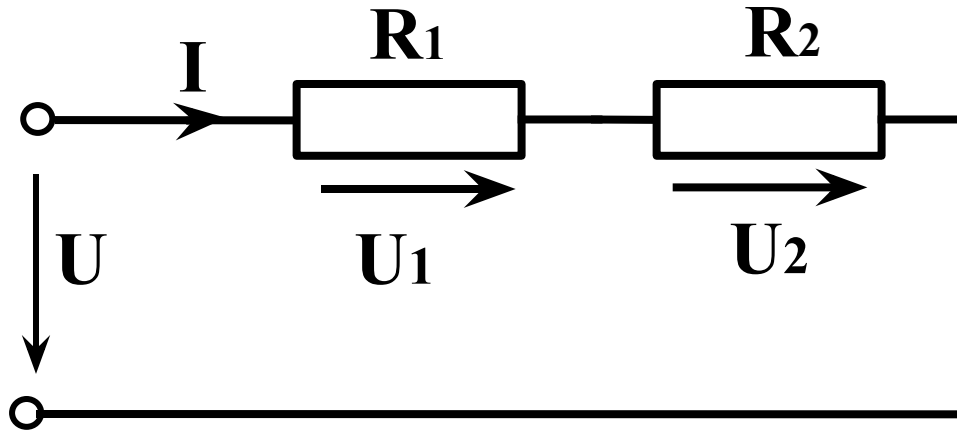


$$I_1 = (IR_2)/(R_1 + R_2).$$

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

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



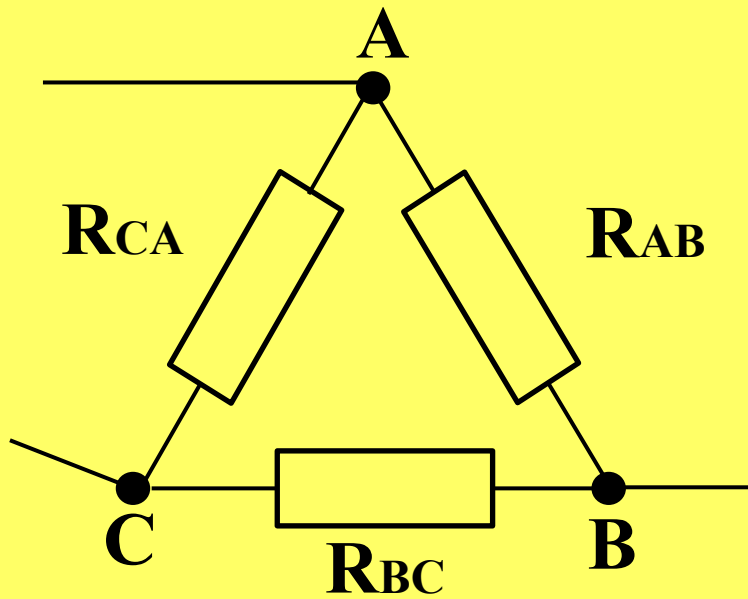
$$U_1 = (UR_1)/(R_1 + R_2).$$

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

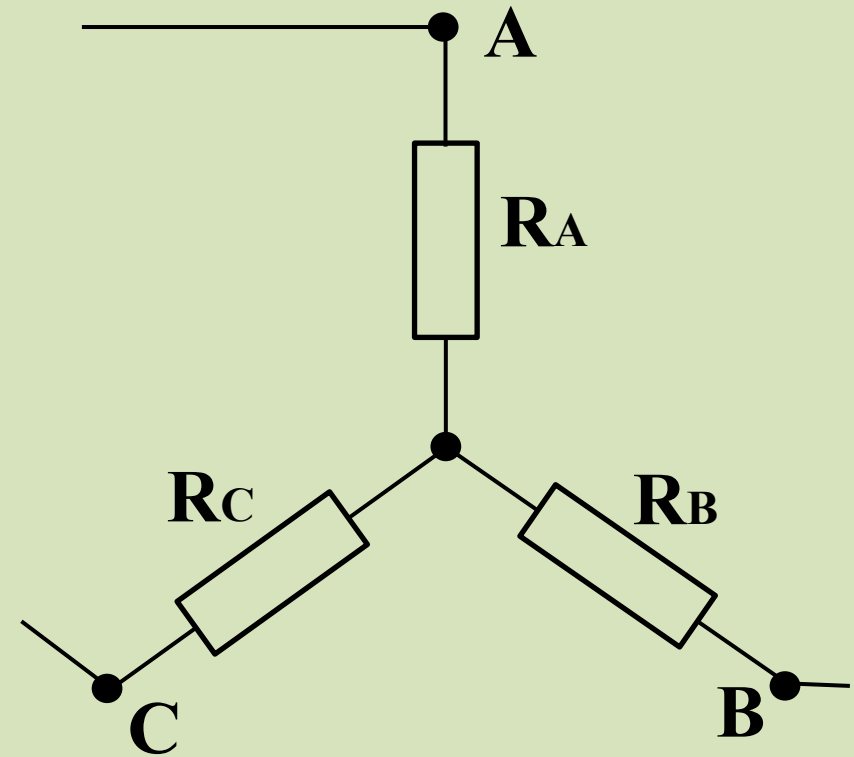
Для определения напряжения на элементе в последовательной цепи необходимо общее напряжение разделить на эквивалентное сопротивление цепи и полученный результат умножить на сопротивление этого элемента.

Схемы соединения резистивных элементов

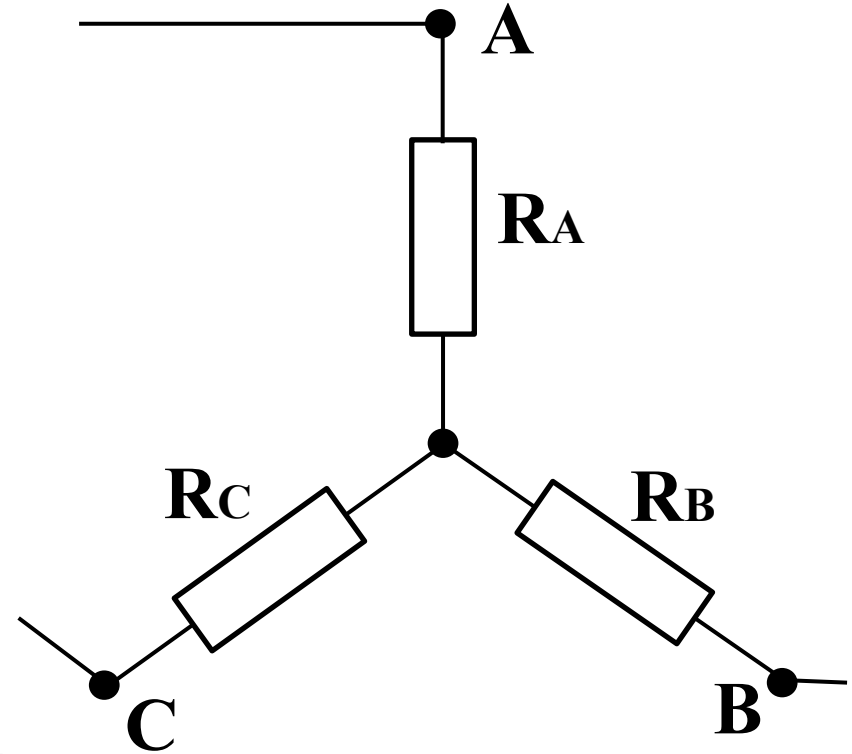
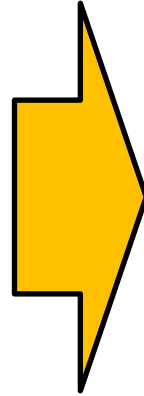
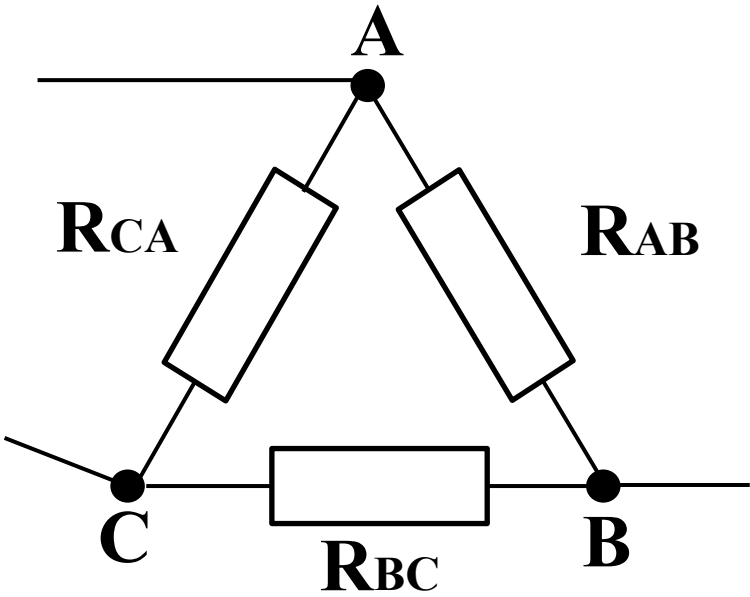
«Треугольник»



«Звезда»



Переход от схемы «треугольник» к схеме «звезда»

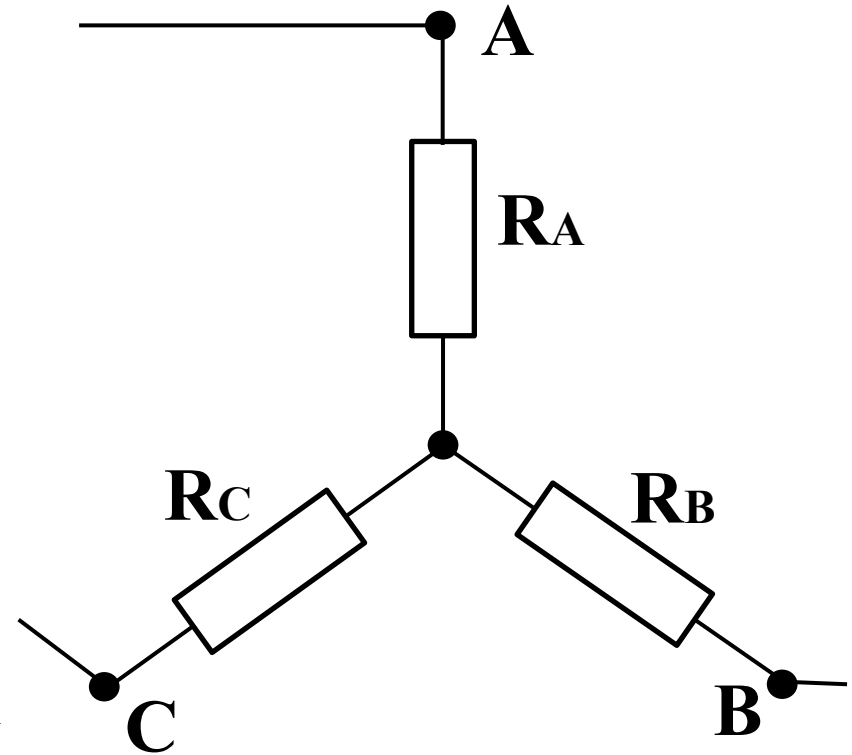
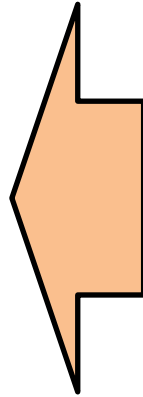
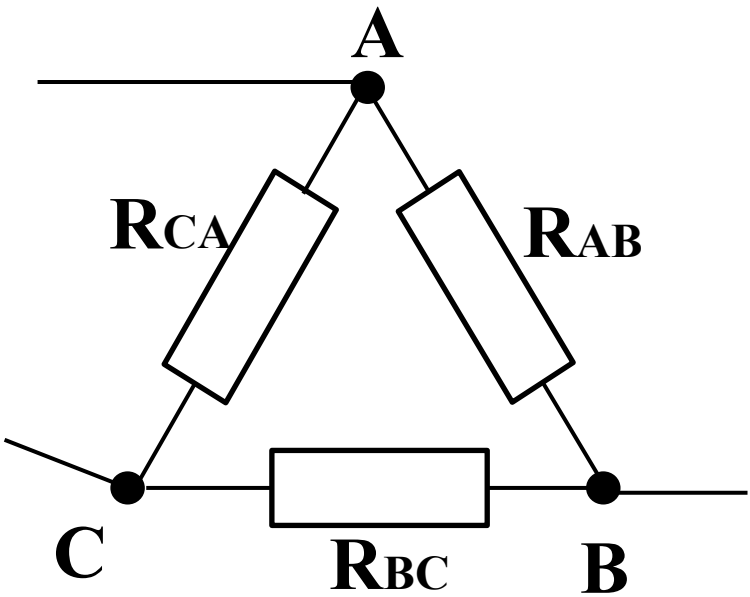


$$R_A = \frac{R_{AB} R_{CA}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}$$

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

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

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
($\mu \approx 1$)

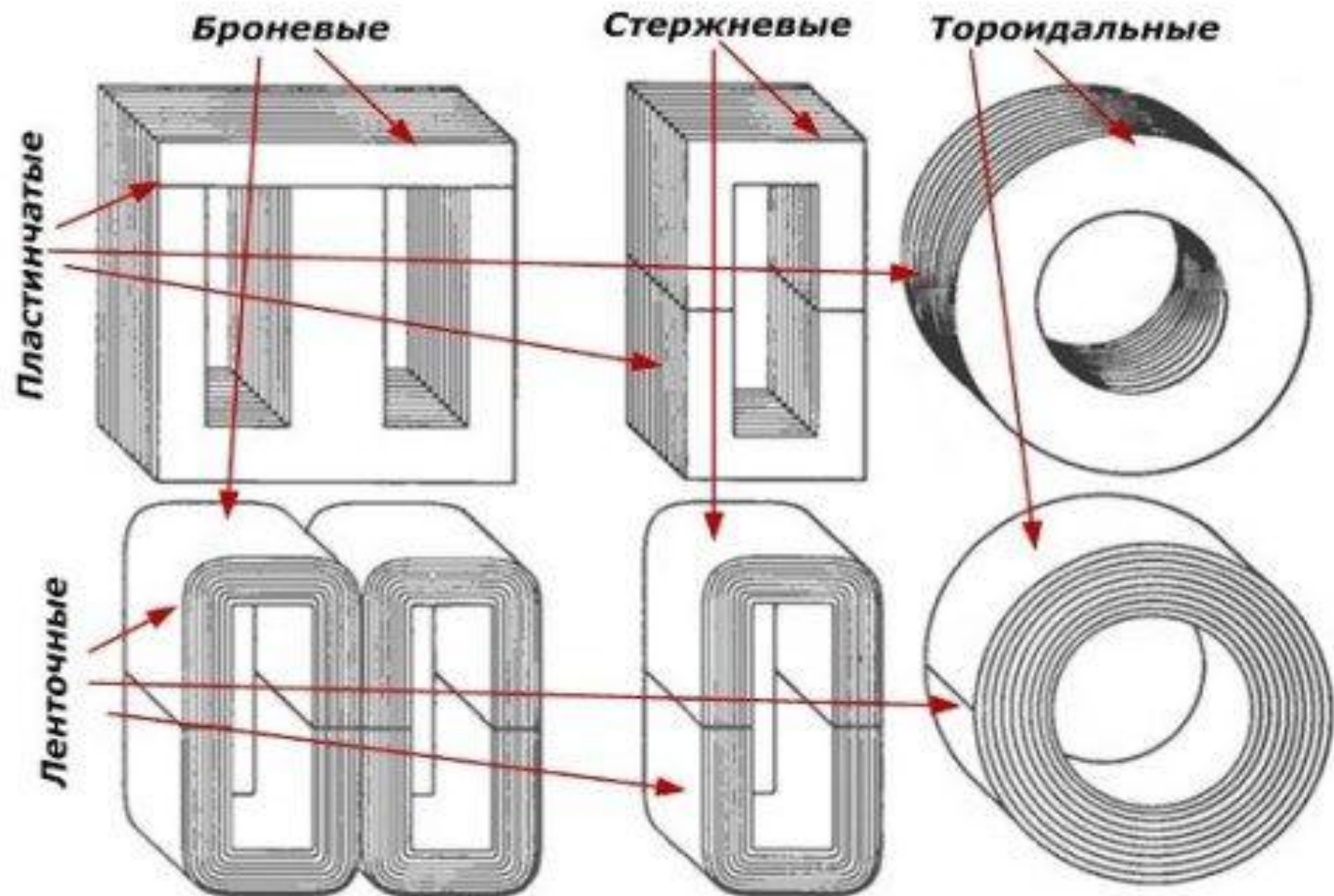
Магнитная проницаемость вещества (μ_v) - это способность вещества поддерживать распространение магнитного поля в нем. Измеряется в генри/метр [Гн/м].

Относительная магнитная проницаемость (μ) - это отношение магнитной проницаемости вещества (μ_v) к магнитной проницаемости вакуума μ_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**.

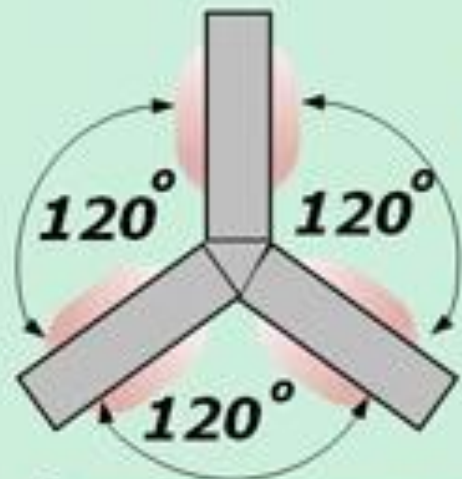
[illegible]

Виды магнитопроводов у трансформаторов

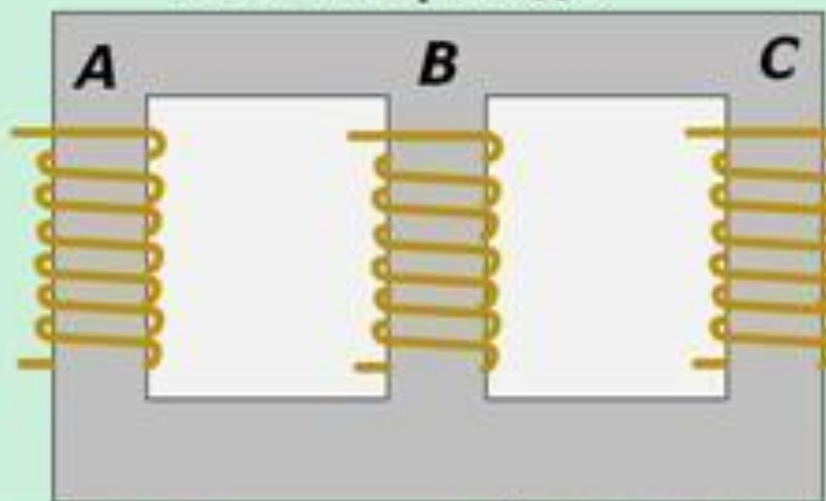


Виды трехфазных магнитопроводов

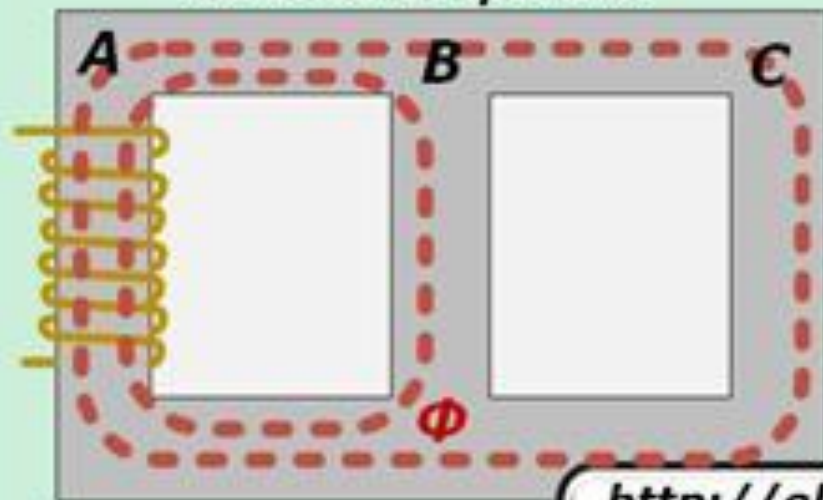
Три однофазных трансформатора



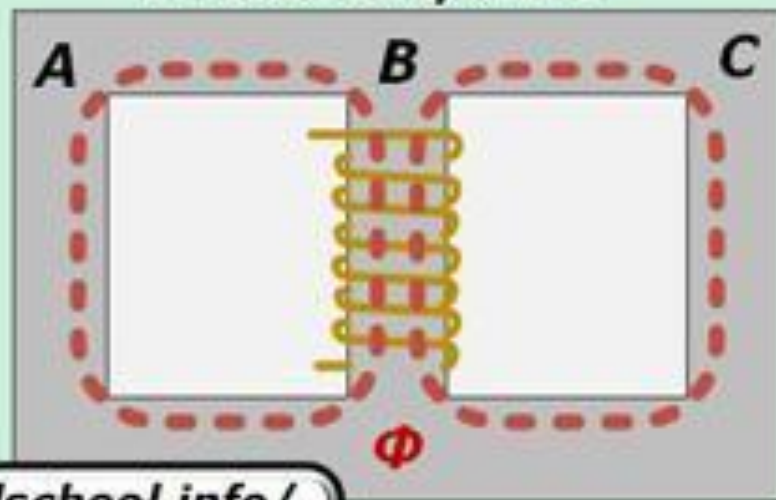
Три обмотки на общем магнитопроводе



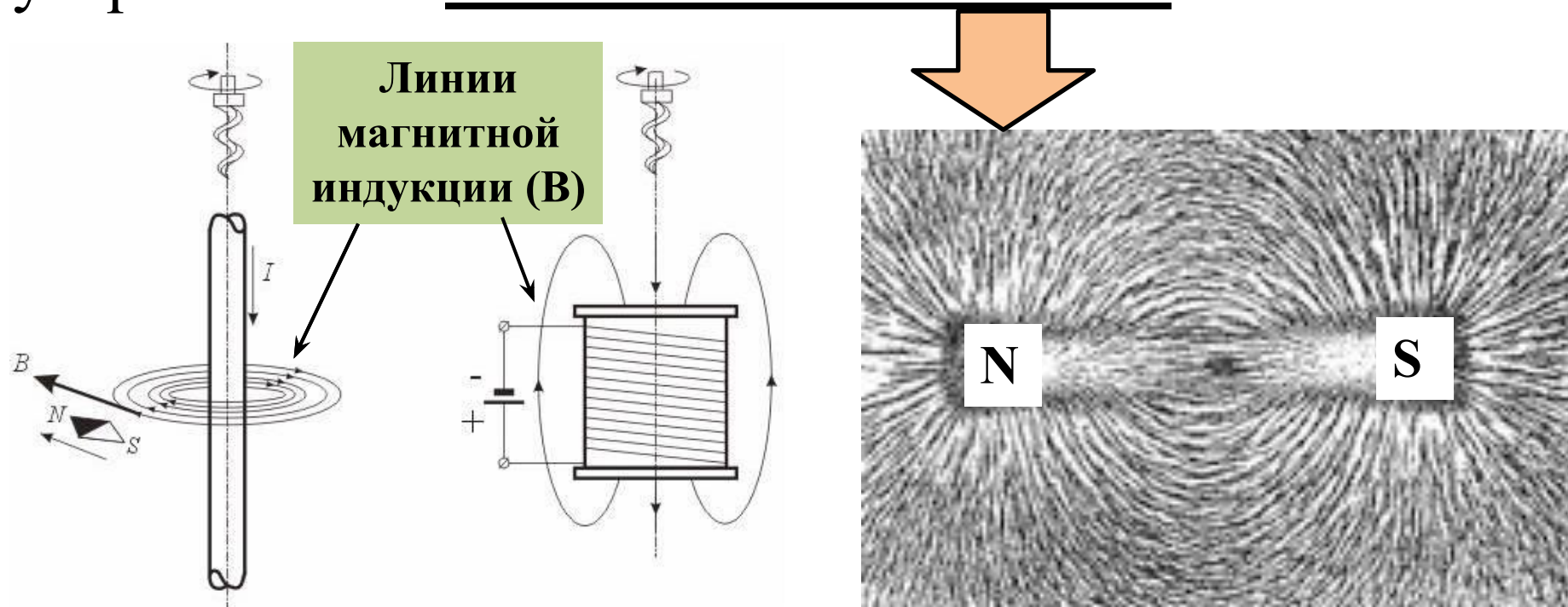
Распределение магнитных потоков от фазы A



Распределение магнитных потоков от фазы B

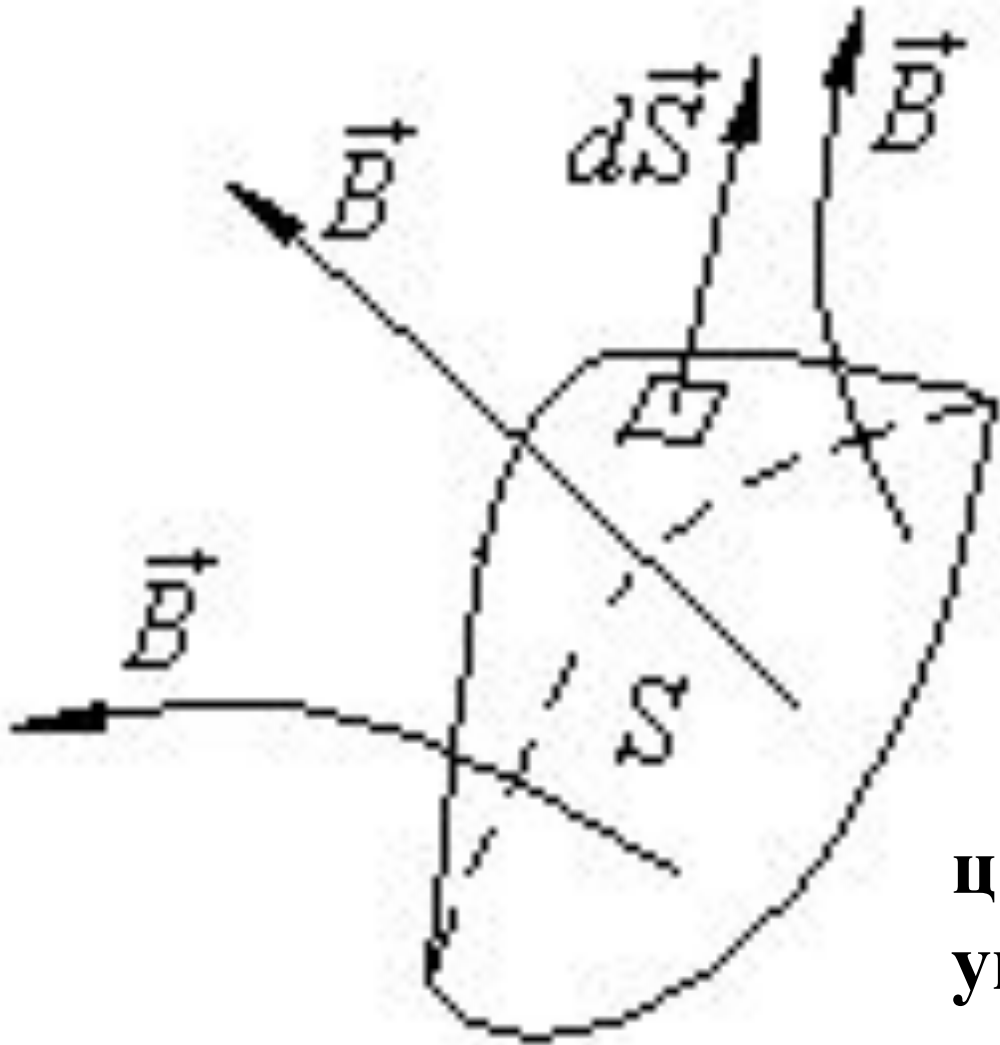


Магнитный поток создается токами, протекающими по обмоткам электротехнических устройств или постоянными магнитами.



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

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



$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

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

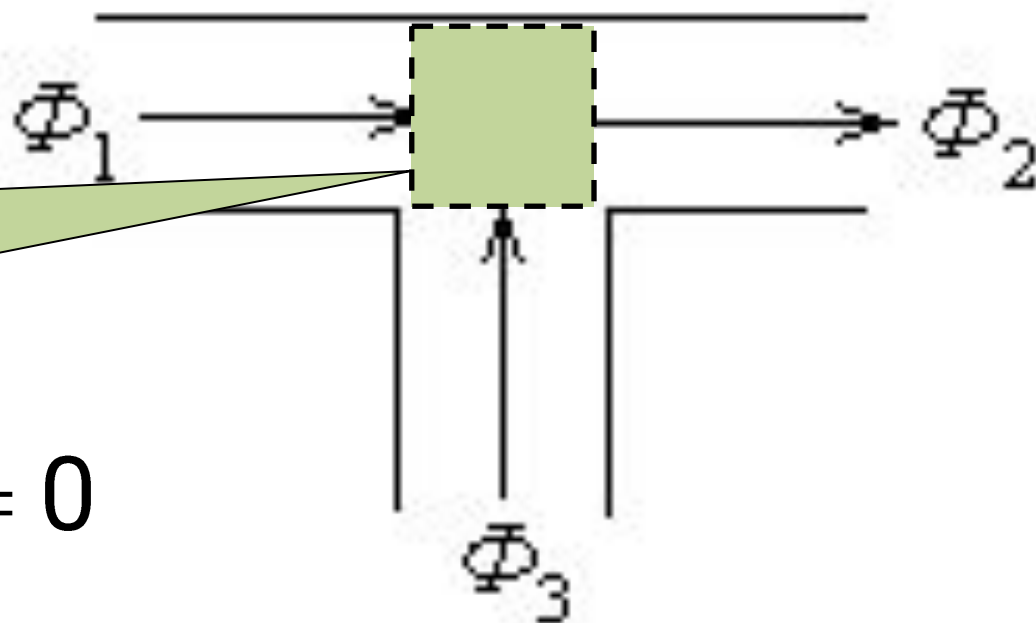
$$\Phi = BS$$

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



ПЕРВЫЙ ЗАКОН КИРХГОФА ДЛЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Узел магнитной
цепи



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

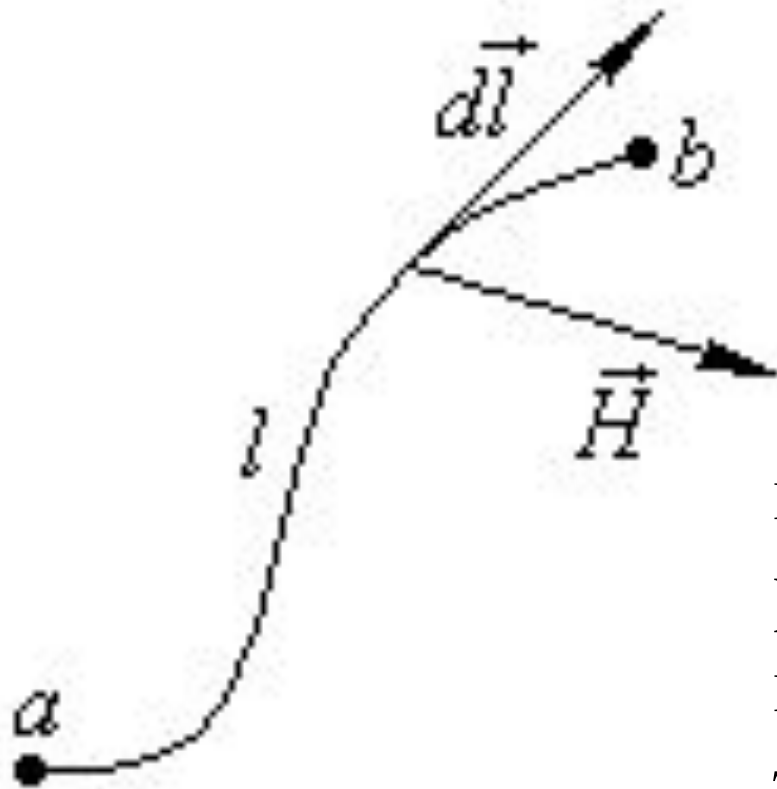
Сумма магнитных потоков, сходящихся в узле магнитной цепи, равна нулю.

Для представленного магнитопровода

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

Магнитное напряжение (U_M)

$$U_{M\ ab} = \int_a^b \vec{H} d\vec{l}$$



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**.

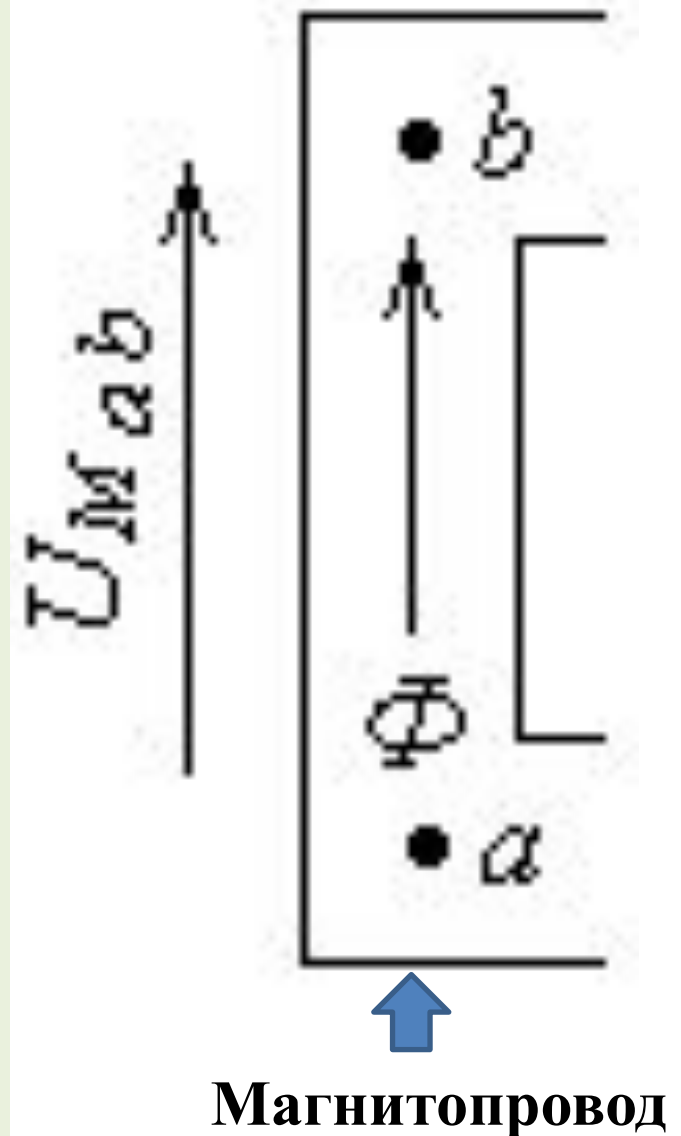
Магнитное напряжение

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

Магнитное напряжение обычно отсчитывается в том же направлении, что и магнитный поток Φ .

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

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



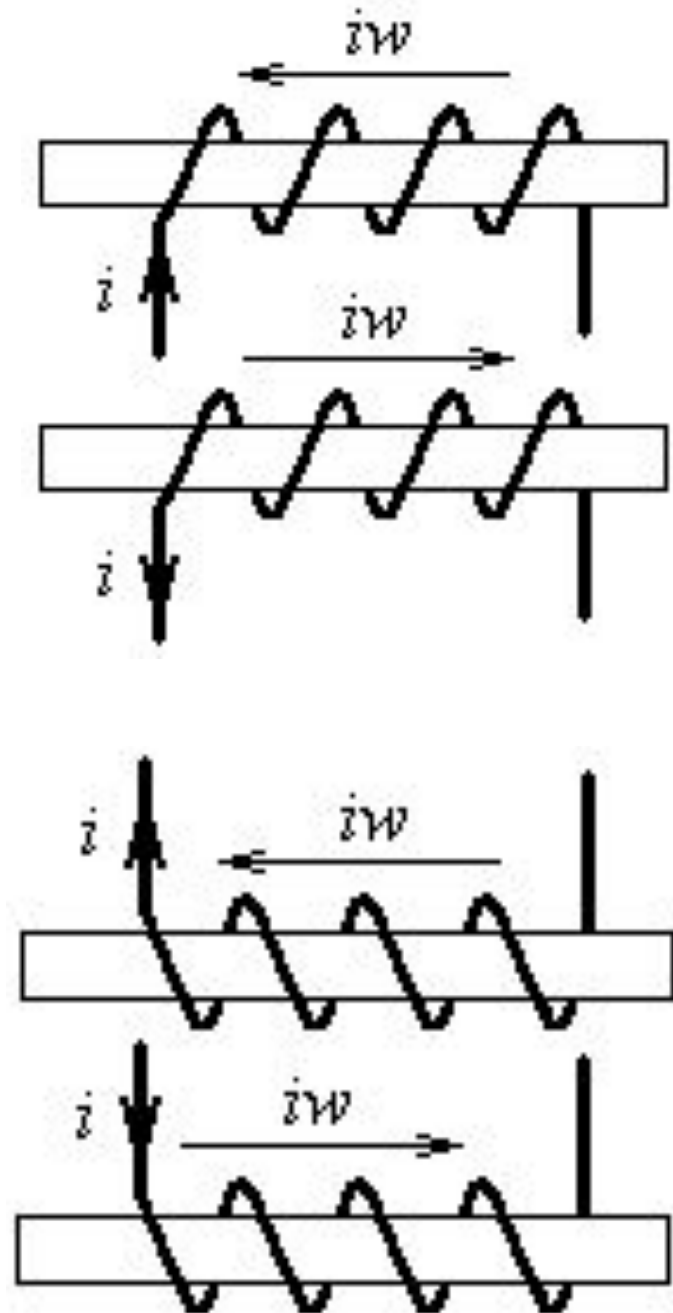
Магнитодвижущая сила обмотки

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.

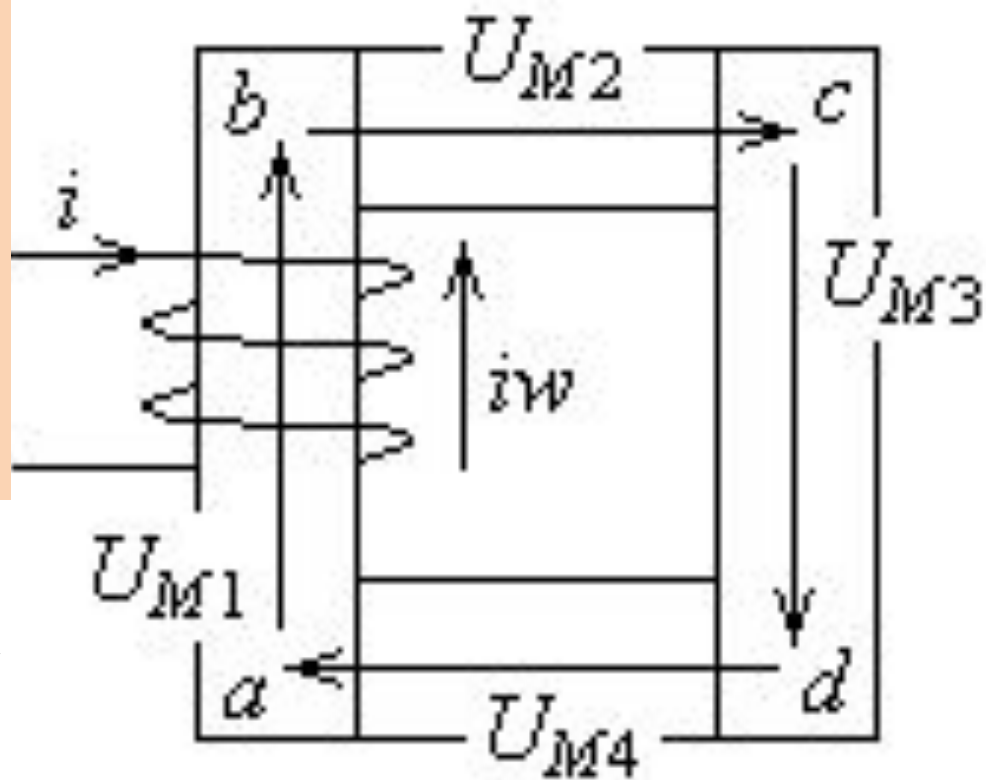
М.д.с. называют также **намагничивающей силой**.



Второй закон Кирхгофа для магнитных цепей

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

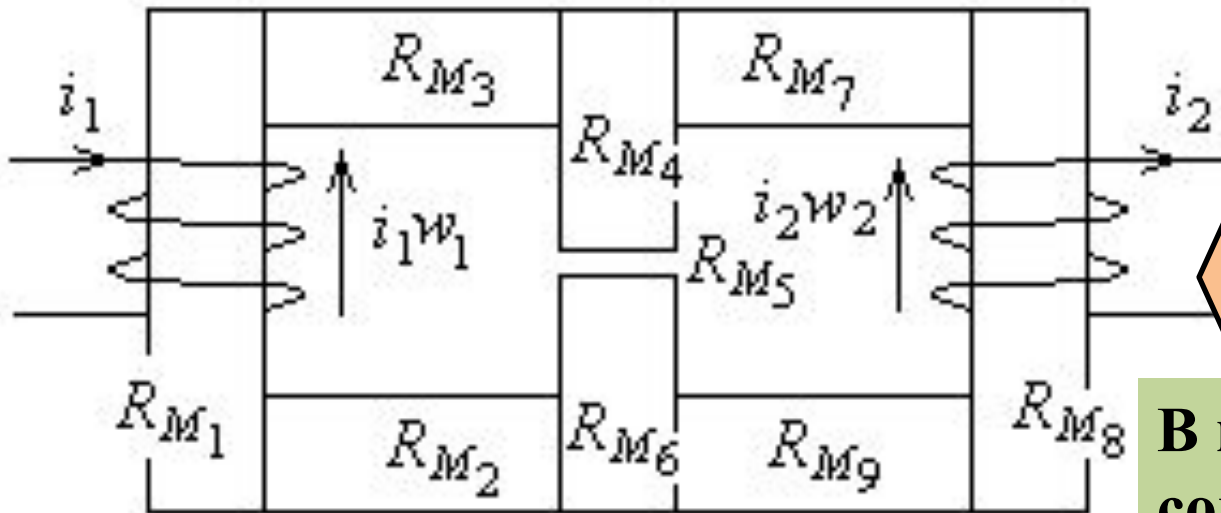
$$\sum_{k=1}^N \pm U_{Mk} = \sum_{k=1}^M \pm i_k w_k$$



Для приведенной магнитной цепи второй закон Кирхгофа:

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

Схемы магнитных цепей

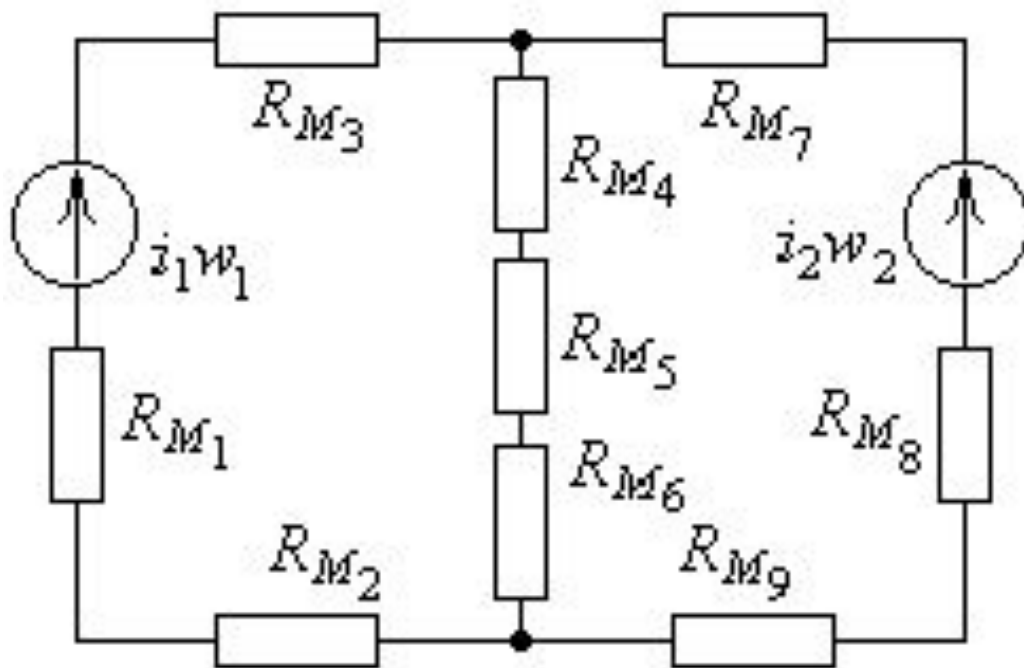


Магнитная цепь в виде рисунка

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 Φ , 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.