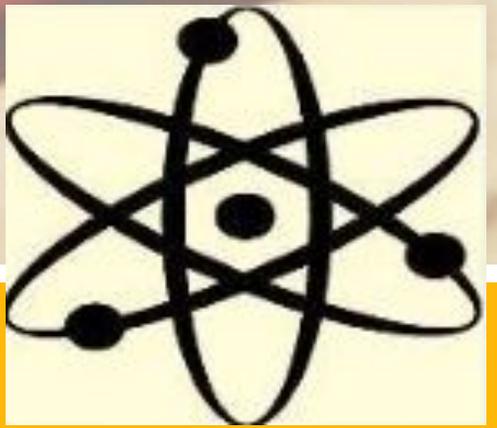


ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Лекция 1

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ. МЕТОДЫ РАСЧЁТА ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА (4 ЧАС)

(ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ЭЛЕМЕНТЫ И ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЦЕПЕЙ; ЗАКОНЫ ОМА И КИРХГОФА; АНАЛИЗ ЦЕПЕЙ С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ; МОЩНОСТЬ, БАЛАНС МОЩНОСТЕЙ; РАСЧЁТ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ)

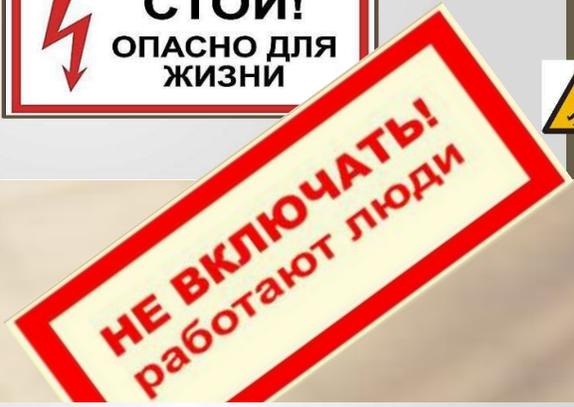


Королев Владимир Александрович
Курс – 3

Электробезопасность

«Электробезопасность»

комплекс мероприятий, направленный на исключение поражения человека электрическим током



Электрик, как сапёр,



ошибается один раз



Литература

- 1. Беневоленский С.Б., Марченко А.Л. Основы электротехники: Учеб. пособие для втузов (+CD). М.: Физматлит, 2006.**
- 2. А.Л. Марченко Основы электротехники: Учеб. пособие для втузов. М.: Физматлит, 2017.**
- 3. К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман и др. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 1. — 4-е изд. — СПб.:Питер, 2003.— 463 с.**
- 4. Л.А. Бессонов Теоретические основы электротехники. -М.: Высшая школа, 1996. - 488 С.**
- 5. А.Л. Марченко, С.В. Освальд Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде *Multisim*. - М.: ДМК Пресс, 2010. - 488 С.**

Электротехника – научно-техническая отрасль, связанная с применением электрических и магнитных явлений для преобразования энергии, получения и изменения химического состава веществ, производства и обработки материалов, передачи информации, охватывающая вопросы получения, преобразования и использования электрической энергии в практической деятельности человека.

Основные определения электротехники даны в ГОСТ Р 52002-2003.

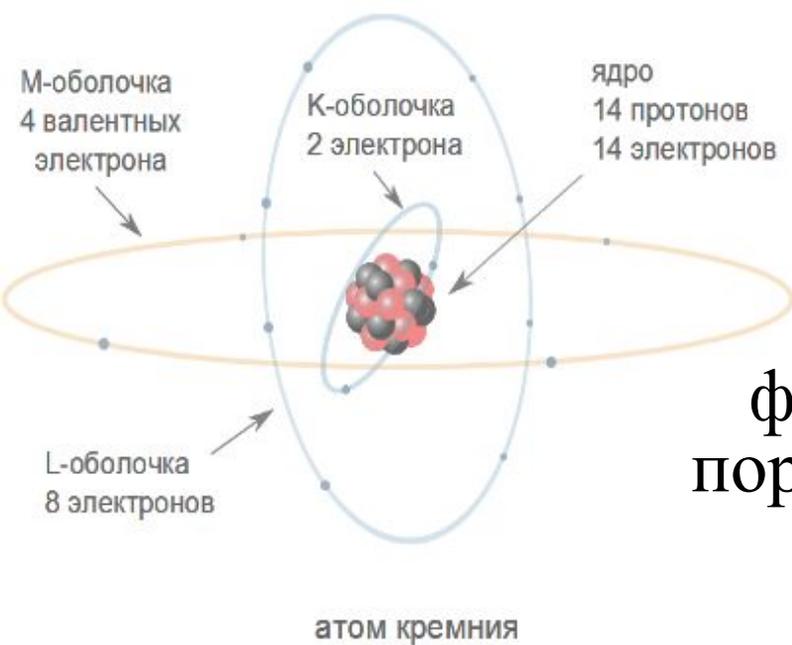
Постоянные величины обозначают прописными буквами: I , U , E ,
изменяющиеся во времени –
строчными: i , u , e .

Происхождение термина «электричество»

Древние учёные заметили, что янтарь (окаменевшая смола хвойных деревьев, которые росли на земле много сотен тысяч лет назад) при натирании его шерстью начинает притягивать к себе различные тела. По-гречески янтарь – «электрон», отсюда произошёл

*термин
«ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»*





Электрический заряд (количество электричества) — физическая скалярная величина, определяющая способность тел быть источником электромагнитных полей, принимать участие в электромагнитном взаимодействии. Элементарный электрический заряд — фундаментальная физическая постоянная, минимальная порция (квант) электрического заряда, наблюдающегося в природе у свободных долгоживущих частиц. В природе отрицательных зарядов столько же, сколько положительных. Электрические заряды атомов и молекул равны нулю, а заряды положительных и отрицательных ионов в каждой ячейке кристаллических

решёток твёрдых тел скомпенсированы.

Числовые значения зарядов электрона и протона равны, но противоположны по знаку. Электрический заряд дискретен: заряд любого тела составляет целое кратное от элементарного электрического заряда.

Элементарный электрический заряд
(с точностью до знака равен заряду электрона)

$-1,602\ 176\ 6208(98) \cdot 10^{-19}$ Кл.

Масса электрона = $9,10938291(40) \cdot 10^{-31}$ кг.

Заряд $6,24151 \cdot 10^{18}$ электронов равен 1 Кл.

Электрический заряд

Существует два рода электрических зарядов

«отрицательные» и «положительные»

Тела, имеющие заряды одинакового знака, взаимно отталкиваются, а тела, имеющие заряды противоположного знака, взаимно притягиваются

Строение вещества

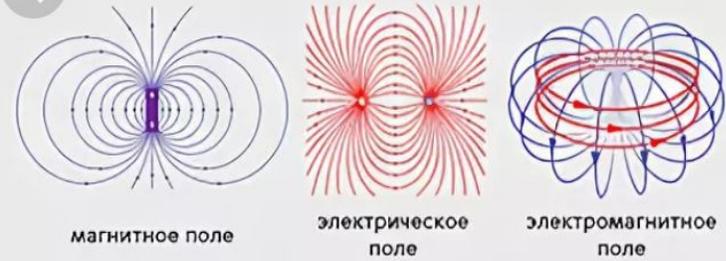
Все вещества в природе состоят из мельчайших частиц «молекул»

Молекулы состоят из еще меньших «атомов» частиц

Атом является сложной мельчайшей частицей состоящей

«протонов» «электронов» «нейтронов»

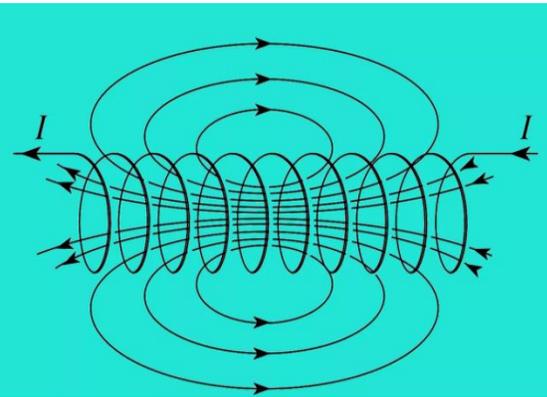
Изменяющееся со временем электрическое поле порождает переменное магнитное поле. Эти тесно взаимосвязанные и порождающие друг друга поля образуют электромагнитное поле.



Электромагнитное поле – вид материи, определяемый совокупностью взаимосвязанных и взаимообуславливающих друг друга электрического и магнитного полей, оказывающий силовое воздействие на электрически заряженные частицы, зависящее от их скорости и электрического заряда.

сила Лоренца,
$$\mathbf{F} = q (\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}])$$

Может существовать при отсутствии другого вещества, непрерывно распределено в пространстве (эм волна) либо дискретно (фотоны). Обладает энергией, массой, количеством движения, инерционно.

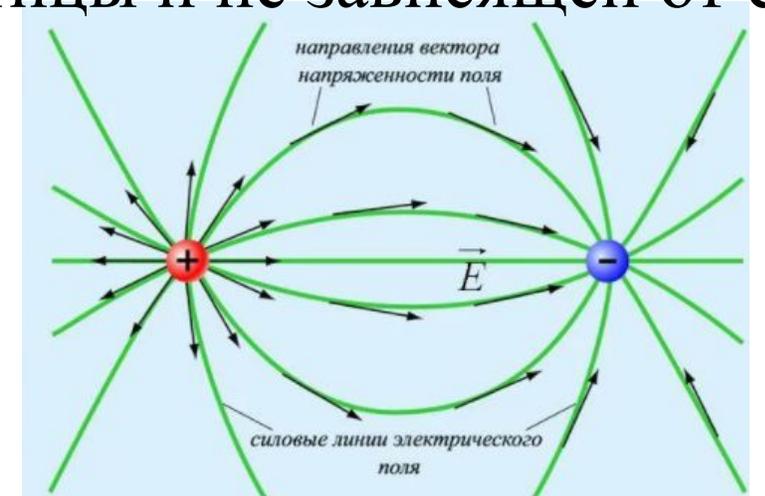


Электрическое поле – одна из двух сторон электромагнитного поля, характеризующаяся воздействием на **электрически** заряженную частицу с силой, пропорциональной заряду этой частицы и не зависящей от ее скорости. [сила Ампера](#)

Магнитное поле - одна из двух сторон электромагнитного поля, характеризующаяся воздействием на движущуюся **электрически** заряженную частицу с силой, пропорциональной заряду этой частицы и ее скорости.

$c = 299\,792\,458$ м/с

343.3 м/с 1500 м/с



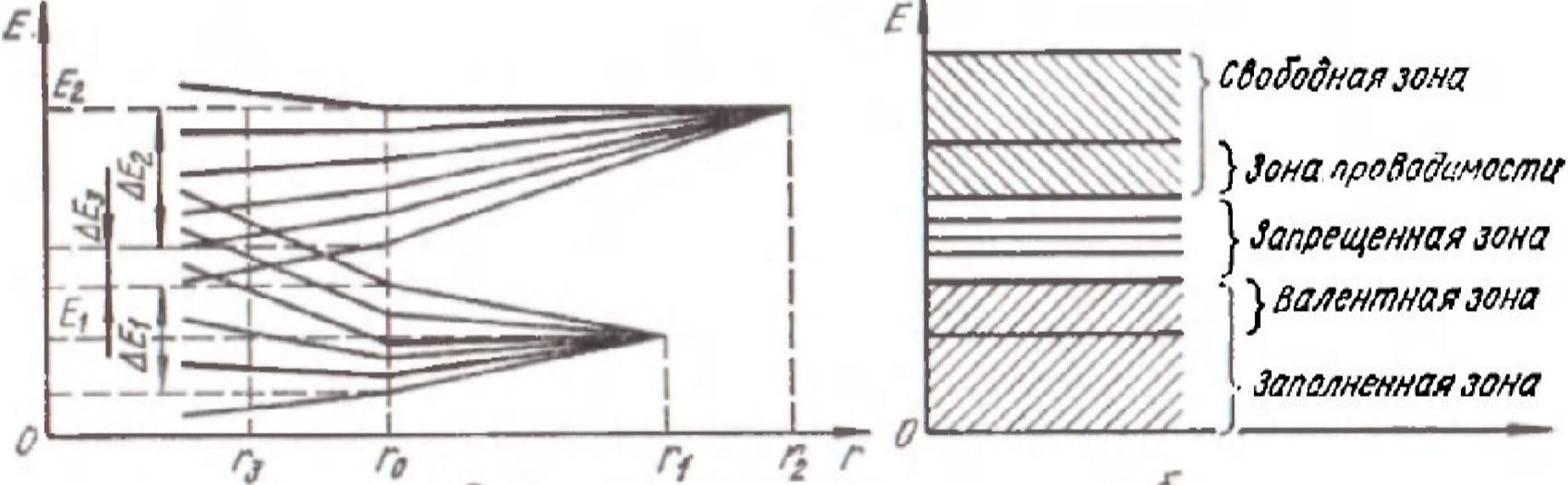
Электротехнические материалы — специальные материалы, обладающие свойствами, проявляющимися в электрическом и магнитном полях:

Проводники обладают высокой удельной электрической проводимостью (малым удельным электрическим сопротивлением: $10^{-8} \dots 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и хорошо проводят электрический ток (металлы и их сплавы, сильно ионизированные газы, жидкие проводники — электролиты).

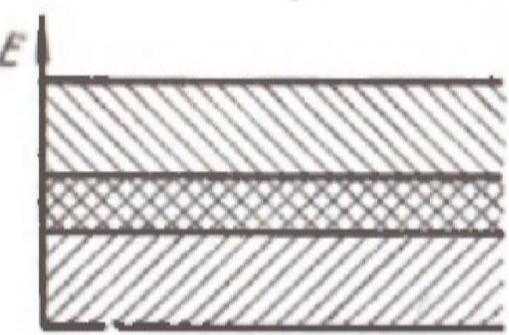
Изоляторы (диэлектрики) имеют низкую удельную электрическую проводимость (высокое удельное электрическое сопротивление: $10^8 \dots 10^{18} \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и плохо проводят электрический ток. Их используют для изоляции токоведущих деталей, находящихся под разными электрическими потенциалами, для невозможности протекания токов по цепям, не предусмотренным конструкцией электрической установки, в конденсаторах - для создания электрической ёмкости. В группу изоляторов входят материалы сотен наименований (твёрдые, жидкие и газообразные, природные и синтетические).

Полупроводники по способности проводить электрический ток занимают промежуточное положение между проводниками и изоляторами: их удельная электрическая проводимость мала для того, чтобы считать их проводниками, но слишком велика, чтобы использовать их как изоляторы ($10^{-6} \dots 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

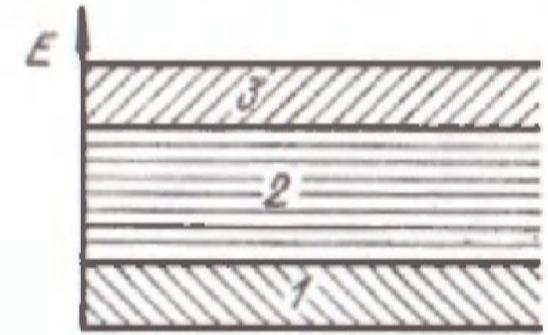
Магнитные материалы обладают способностью намагничиваться. Для них характерна высокая магнитная проницаемость. Одни из них легко перемагничиваются во внешнем магнитном поле, другие - намагничиваются с трудом, но длительно сохраняют намагниченное состояние. Из первых делают магнитопроводы электрических машин и аппаратов, работающих на переменном токе, экраны для защиты от внешнего магнитного поля, из вторых — постоянные магниты для измерительных приборов.



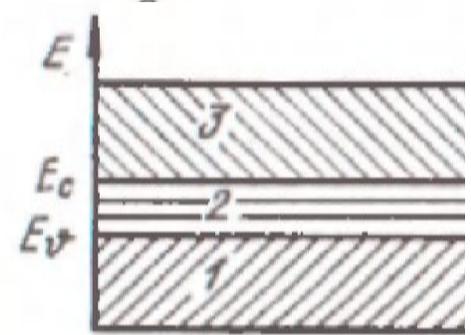
Зона проводимости



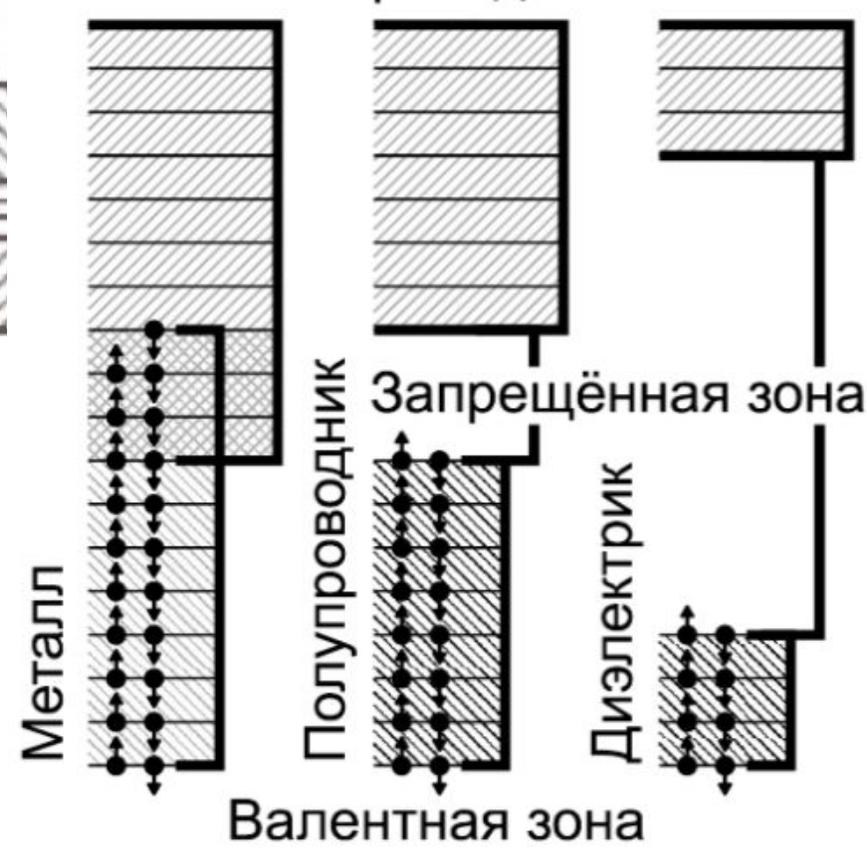
Проводник



Диэлектрик



Полупроводник



Энергия Ферми - максимально допустимая энергия, ниже которой при нулевой абсолютной температуре все энергетические уровни заняты [$f(E) = 1$]. Уровень Ферми в полупроводнике при абсолютном нуле в запрещённой зоне - в середине запрещённой зоны.

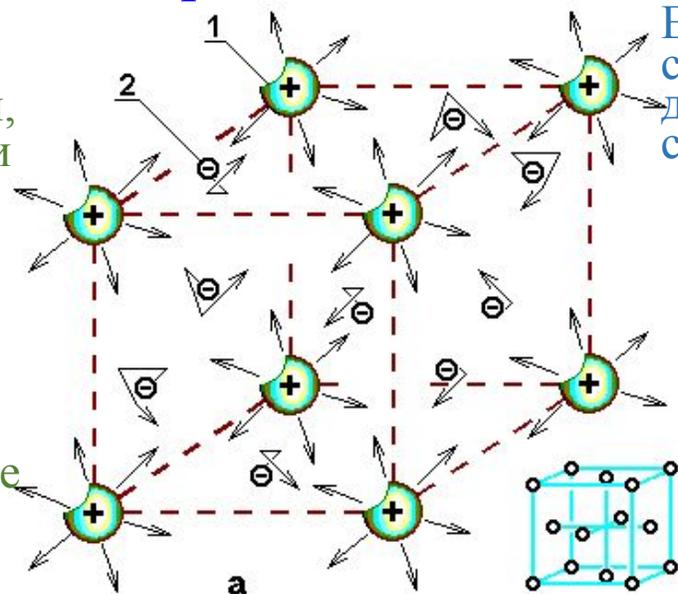
Проводники

- ✓ **первого рода - проводники с электронной проводимостью (посредством движения электронов);**
- ✓ **второго рода - проводники с ионной проводимостью (электролиты).**

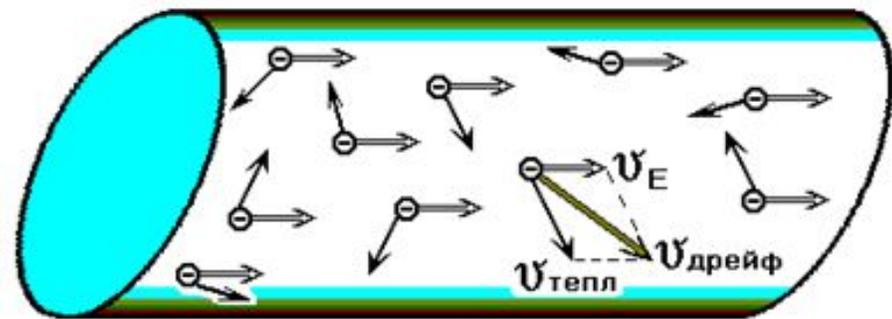
Пространственная кристаллическая решётка металла:

1 - узлы решётки - положительные ионы, 2 - свободные электроны проводимости
В узлах решётки размещены положительно заряженные ионы, колеблющиеся относительно узлов. Между ионами беспорядочно движутся отрицательно заряженные свободные электроны. В 1 мм^3 металла содержится около 10^{20} электронов. Средняя скорость их хаотического движения даже при комнатной температуре высока — около 10^5 м/с .

Электролиты — растворы кислот, солей, щелочей, оксидов, содержащие положительно и отрицательно заряженные ионы. Вне электрического поля они движутся хаотично, а под действием сил электрического поля перемещаются ещё и направленно, образуя ток в электролите. Положительные и отрицательные ионы движутся встречно, соответственно, к отрицательному (катоде) и положительному (аноду) электродам, помещённым в раствор.



Если в металле создать электрическое поле, свободные электроны начнут упорядоченно двигаться в направлении действия электрических сил, возникнет эл. ток



При возникновении электрического тока электроны по всей длине проводника приходят в однонаправленное движение со скоростью, близкой к скорости света.

Электрический ток проводимости — упорядоченное движение носителей зарядов под действием электрического поля. Если ток образован движением электронов, то материал обладает электронной проводимостью, если ток образован движением ионов, то проводимость ионная.

Газы вне электрического поля содержат мало заряженных частиц. Под энергетическим воздействием космического излучения, ультрафиолетового излучения Солнца, радиоактивного фона земной коры электроны возбуждаются и отрываются от нейтральных молекул газа, возникает естественная ионизация — в газе образуются свободные электроны и положительные ионы. При хаотическом перемещении электроны с

и протекает обратный процесс — леионизация, восстановление (рекомбинация) нейтральных

Сила тока - число зарядов, протекающих через поперечное сечение среды S в единицу времени:

$$[i] = \frac{[dq]}{[dt]} = \frac{\text{Кл}}{\text{с}} \text{ Ампер (А)}$$

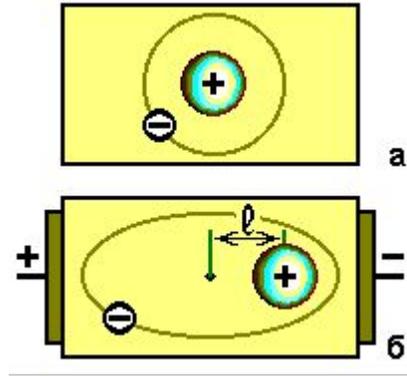
Диэлектрики

Электронная поляризация — упругое смещение электронных оболочек относительно ядра атомов диэлектрика под действием внешнего электрического поля

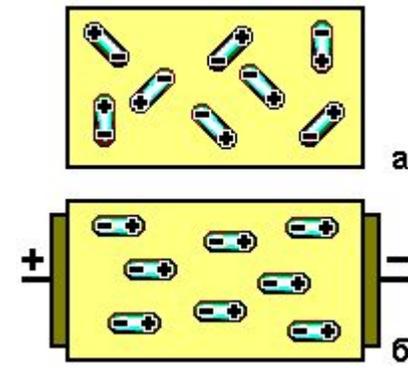
Дипольная поляризация — ориентация диполей диэлектрика по внешнему электрическому полю

Полярные молекулы — устойчивые диполи, существующие и вне электрического поля, но относительно друг друга они размещены хаотично, сумма их дипольных моментов равна нулю. В электрическом поле диполи диэлектрика поворачиваются, ориентируясь по нему, и растягиваются полем, что увеличивает их дипольные моменты. Суммарный дипольный момент упорядоченно ориентированных удлинённых диполей в 4...7 раз превосходит аналогичный показатель вакуума. Энергия, затраченная на ориентацию диполей, — диэлектрические потери, необратимо преобразующиеся в тепло.

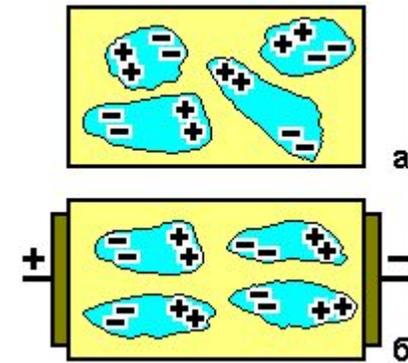
Спонтанная поляризация связана с наличием в диэлектрике областей — доменов областей — доменов, в пределах которых диполи имеют одинаковую ориентацию, но слабо связаны друг с другом. Ориентация диполей соседних доменов различна и при отсутствии внешнего электрического поля их суммарный дипольный момент равен нулю. Направление приложенного поля совпадает с ориентацией диполей какого-либо домена, который начинает подчинять своей ориентации диполи соседних областей и расти за их счёт. Процесс завершается одинаковой ориентацией всех диполей диэлектрика. Диэлектрики, в которых процесс спонтанной поляризации протекает весьма интенсивно, называются сегнетоэлектриками. Они способны поляризоваться в десятки тысяч раз сильнее, чем вакуум.



. Электронная поляризация диэлектрика. Диэлектрик вне электрического поля (а) и в электрическом поле (б)



. Дипольная поляризация диэлектрика. Диэлектрик вне электрического поля (а) и в электрическом поле (б)



Спонтанная (доменная) поляризация диэлектрика. Диэлектрик вне электрического поля (а) и в электрическом поле (б)

Электрический ток смещения — совокупность электрического тока смещения в пустоте и электрического тока поляризации диэлектрика, количественно характеризуемая скалярной величиной, равной производной по времени от потока электрического смещения DS сквозь рассматриваемую поверхность S

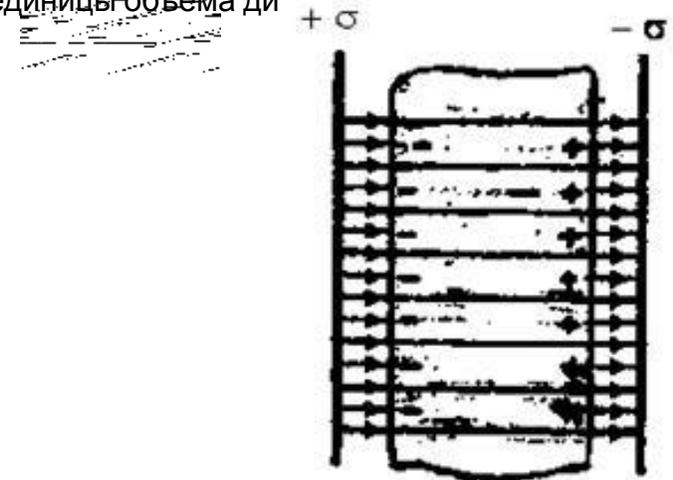
$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta(DS)}{\Delta t} = \frac{S dD}{dt},$$

где D — электрическое смещение.

При помещении диэлектрика во внешнее электростатическое поле он поляризуется (происходит смещение зарядов: положительные смещаются по полю, отрицательные - против поля), т.е. приобретает отличный от нуля дипольный момент, где - дипольный момент одной молекулы. Для количественного описания поляризации диэлектрика пользуются векторной величиной – поляризованность - дипольный момент единицы объёма диэлектрика.

Таким образом, появление связанных зарядов приводит к возникновению дополнительного электрического поля (поля, создаваемого связанными зарядами), которое направлено против внешнего поля (поля, создаваемого свободными зарядами) и ослабляет его.

Вектор напряжённости, переходя через границу диэлектриков, претерпевает скачкообразное изменение, создавая тем самым неудобства при расчёте электростатических полей. Поэтому оказалось необходимым помимо вектора напряжённости характеризовать поле ещё **вектором электрического смещения**, который для электрически изотропной среды по определению равен



Единица электрического смещения - кулон на метр в квадрате (Кл/м²).

Электрический ток переноса — электрический ток, осуществляемый переносом электрических зарядов телами, количественно характеризуемый скалярной величиной, равной производной по времени от электрического заряда, переносимого телами сквозь рассматриваемую поверхность.

Полный электрический ток — скалярная величина, равная сумме электрического тока проводимости, электрического тока переноса и электрического тока смещения сквозь рассматриваемую поверхность.

Условное положительное направление тока I во внешней (от источника энергии) цепи противоположно направлению движения потока электронов (от «+» к «-» источника).

Электрический ток

«Слово ток»

означает движение или течение чего-либо

«Электрический ток»

это упорядоченное (направленное)
движение заряженных частиц

«Электрический ток в металлах»

представляет собой упорядоченное
движение
свободных электронов



Сила тока

«Сила тока»

$$I = \frac{q}{t}$$

это отношение электрического заряда

« q »

прошедшего через поперечное сечение
проводника, ко времени его прохождения

« t »

За единицу силы тока принят

«АМПЕР»



Переменный и постоянный ток

Постоянным называется ток,
который с течением времени не
изменяется ни по величине, ни по
направлению

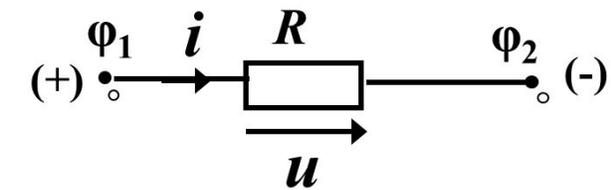
Переменным током называется
ток, который с течением времени
изменяется и по величине и по
направлению



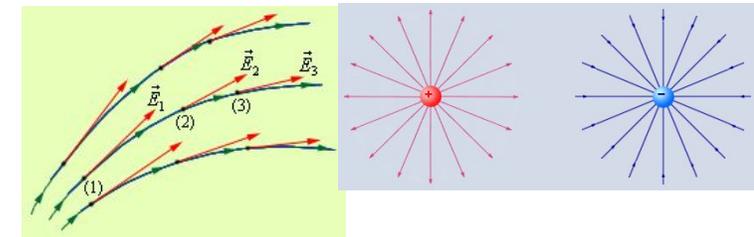
Ток возникает под влиянием электрического поля, которое, действуя на электроны, приводит их в движение от точки a с большим потенциалом к точке b с меньшим, вызывая падение напряжения (далее — напряжение) на сопротивлении этого участка:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b.$$

Потенциал (энергетическая характеристика любой точки поля) — это потенциальная энергия, которой обладает единичный положительный заряд, помещённый в данную точку. Потенциал численно равен работе по перемещению единичного положительного заряда (1 Кл) из точки « a » в ∞ .



$$\varphi_a = q \int_{\infty}^a \mathbf{E} dl = \int_{\infty}^a \mathbf{E} dl, \quad \varphi_b = \int_{\infty}^b \mathbf{E} dl,$$



где E — напряжённость (вектор) электрического поля, равная отношению силы, действующей на заряженную частицу, к значению её заряда:

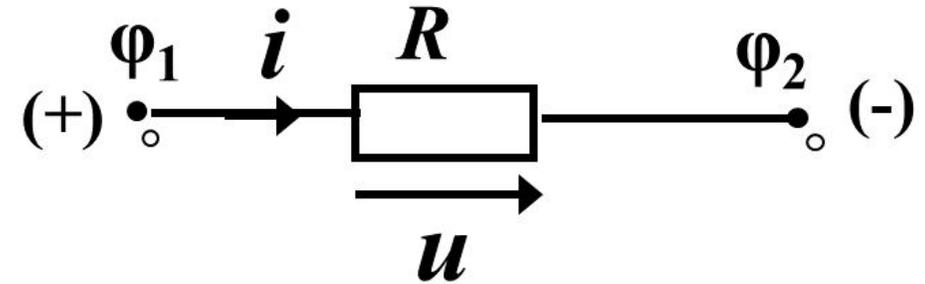
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

$$[E] = [H]/[Kл] = (В \cdot А \cdot с/м)/(А \cdot с) = В/м \text{ (вольт на метр)}$$

Напряжённость совпадает по направлению с силой, с которой поле действует на единичный положительный пробный заряд. У напряжённости электростатического поля нет зависимости от времени. Когда она во всех точках поля одинакова, поле называют однородным. В другом случае — неоднородным. Чтобы изобразить электростатические поля графически, необходимо задействовать понятие силовых линий. Такие линии в электростатическом поле разомкнутые. Они начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных. Реже уходят в бесконечность или возвращаются из неё. Силовые линии поля не могут пересекаться. Вектор напряжённости электрического поля подчиняется принципу суперпозиции

Электрическое напряжение — работа, затрачиваемая на перенос единицы заряда (1 Кл) из точки a в точку b поля с напряжённостью E по произвольному пути и равная линейному интегралу напряжённости электрического поля:

$$U_{ab} = \int_{l_{ab}} \mathbf{E} dl.$$



$$[U] = [B/m] \cdot [m] = B \text{ (ВОЛЬТ)}$$

$$u = \varphi_1 - \varphi_2, \quad [B]$$

Напряжение (разность потенциалов) 1 В выражается в разности потенциалов двух точек электрического поля, силы которого производят работу в 1 Дж для перемещения заряда 1 Кл из одной точки проводника в другую.

Появление электрического тока и напряжений в электрической цепи невозможно без источника (источников) электрической энергии. В этих источниках различные виды энергии (химической, механической, тепловой, световой и др.) преобразуются в электромагнитную или электрическую. При этом так наз. сторонними силами создаётся электрическое поле с напряжённостью E , которое, действуя на заряженные частицы в источнике энергии, разделяет их таким образом, что на положительном зажиме («+») источника скапливаются положительные заряды, а на другом («-») — отрицательные (электроны).

При подключении к зажимам источника элементов и устройств, создающих вместе с источником замкнутый проводящий контур, электроны в нем перемещаются от отрицательного зажима источника к положительному, нейтрализуя недостаток электронов на зажиме «+». Но в это же время сторонние силы в источнике разделяют заряды, обеспечивая их непрерывное движение (электрический ток) в цепи. Говорят, что движение электрических зарядов в цепи происходит под действием электродвижущей силы источника.

Причина возникновения ЭДС в источниках тока разная:

Химическая ЭДС. Возникает в батарейках и аккумуляторах вследствие химических реакций.

Термо ЭДС. Возникает, когда находящиеся при разных температурах контакты разнородных проводников соединены.

ЭДС индукции. Возникает в генераторе при помещении вращающегося проводника в магнитное поле. ЭДС будет наводиться в проводнике, когда проводник пересекает силовые линии постоянного магнитного поля или когда магнитное поле изменяется по величине.

Фотоэлектрическая ЭДС. Возникновению этой ЭДС способствует явление внешнего или внутреннего фотоэффекта.

Пьезоэлектрическая ЭДС. ЭДС возникает при растяжении или сдавливании веществ.

ЭДС и разность потенциалов в цепи очень похожие физические величины (измеряются в вольтах, определяют работу по перемещению заряда). Различие:

✓ э. д. с. (E) вызывается путём преобразования какой-либо энергии в электрическую, разность потенциалов (U) преобразует электроэнергию в другие виды. **Ещё различия:**

✓ E отдаёт энергию всей цепи. U - мера энергии между двумя точками на схеме.

✓ E является причиной U, но не наоборот.

✓ E индуцируется в электрическом, магнитном и гравитационном поле.

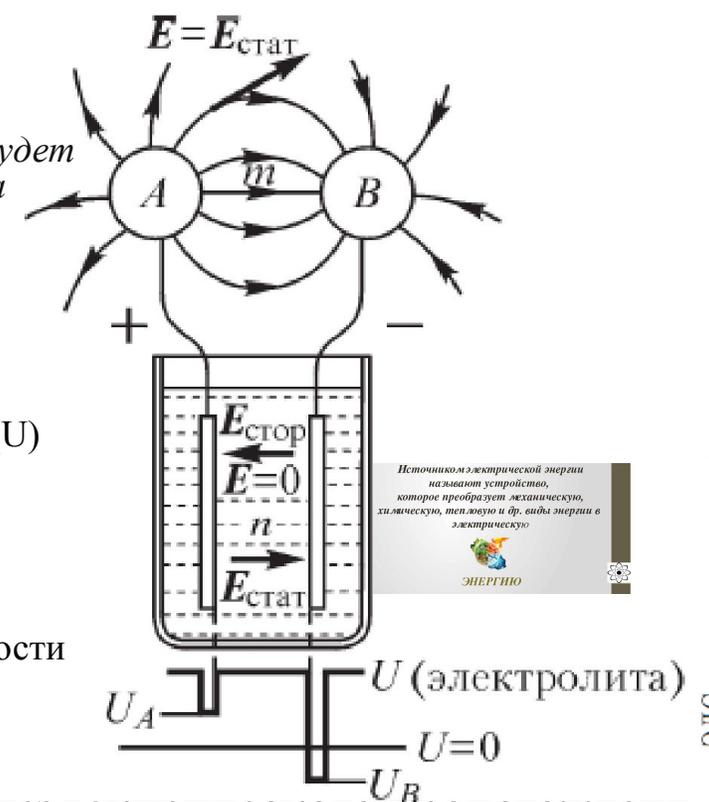
✓ Напряжение на клеммах источника питания, как правило, не равно ЭДС источника. Это происходит из-за наличия внутреннего сопротивления источника (электролита и электродов, обмоток генератора). Связь разности потенциалов, ЭДС источника и тока $U = E - Ir$.

Электродвижущая сила (ЭДС) E - величина, характеризующая способность стороннего поля (сил неэлектрического происхождения любых сил, кроме электростатических и диссипативных) и индуцированного электрического поля вызывать электрический ток.

ЭДС численно равна работе (энергии) W в джоулях (Дж), затрачиваемой этим полем на перемещение единицы заряда (1 Кл) из одной точки поля в другую:

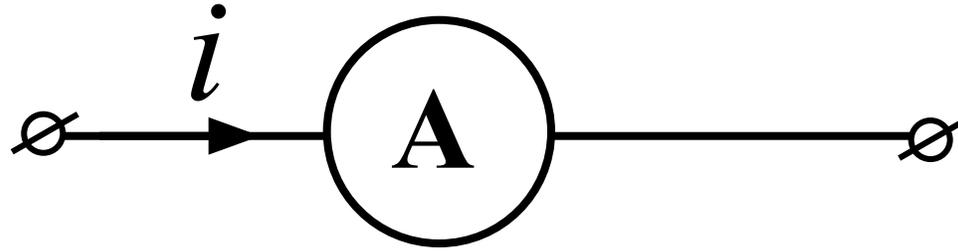
$$[E] = [W]/[q] = \text{Дж}/\text{Кл} = \text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}/(\text{А} \cdot \text{с}) = \text{В} \text{ (вольт)}$$

По аналогии с [напряжённостью электрического поля](#) вводят понятие напряжённость *сторонних сил* E, под которой понимают векторную физическую величину, равную отношению сторонней силы, действующей на пробный электрический заряд к величине этого заряда

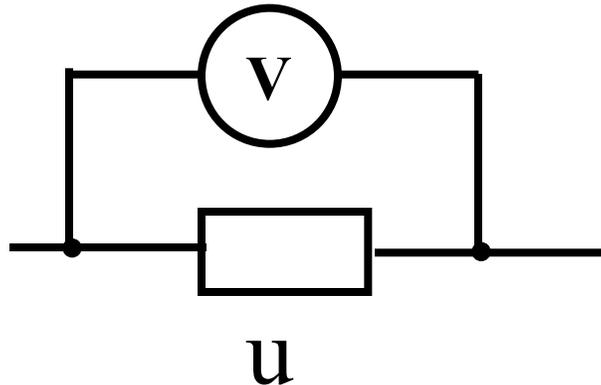


Источники ЭДС могут являться, например, электрические генераторы, гальванические элементы, аккумуляторы, термоэлементы.

Для измерения тока применяют амперметры.
Амперметр включают последовательно в электрическую цепь.
Внутреннее сопротивление идеального амперметра равно нулю.



Напряжение измеряют вольтметрами.
Вольтметр подключают к точкам (параллельно), между которыми необходимо измерить напряжение.
Внутреннее сопротивление идеального вольтметра равно бесконечности



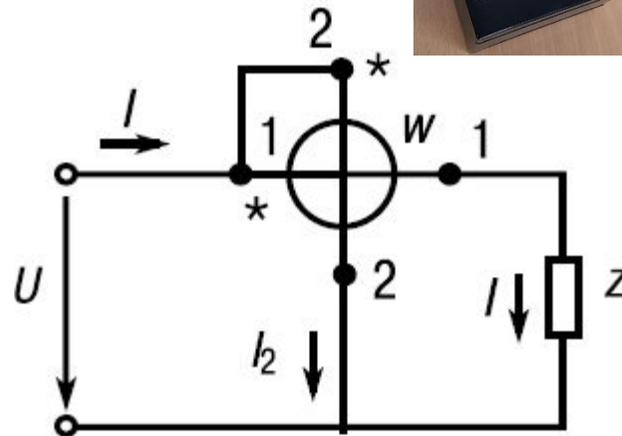
Энергия электрического поля – это энергия, затраченная на перемещение заряда q на участке цепи с напряжением u к моменту времени t :

$$W_{\text{эл}} = \int_{-\infty}^t u dq = \int_{-\infty}^t u i dt \quad [\text{Дж}]$$

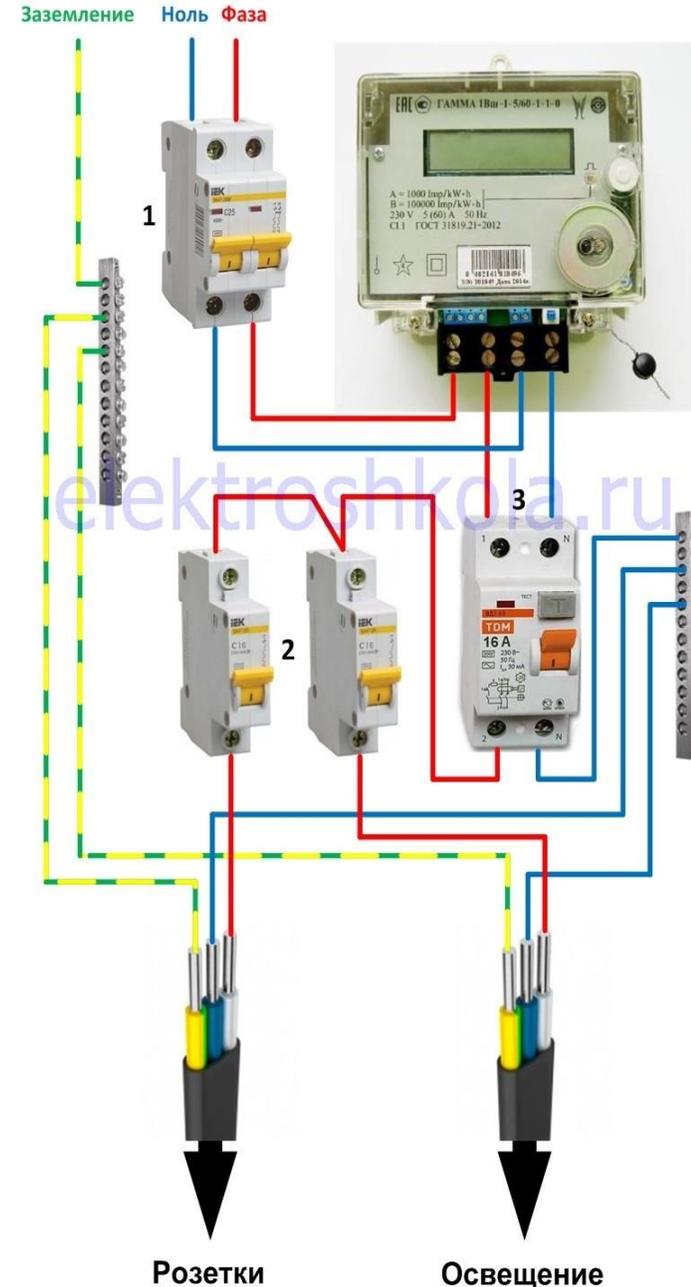
Мощность характеризует преобразование энергии на участке цепи и равна скорости изменения этой энергии

$$p = \frac{dW_{\text{эл}}}{dt} = ui \quad [\text{Вт}]$$

Схема подключения ваттметра



ВВОД



Закон Ома: $U = IR$, $I = U / R$, $R = U / I$

Закон Джоуля – Ленца.

$$W = I^2 R t$$

Мощность $P = I^2 r = UI = U^2 / r$

Сопротивление провода

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S},$$

где ρ — *удельное сопротивление* вещества проводника, l — длина проводника, а S — площадь сечения.

Термины и определения основных понятий в области электротехники установлены ГОСТ Р 52002-2003 «Электротехника. Термины и определения основных понятий». - М.: Госстандарт России, 2003 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ — **совокупность устройств, обеспечивающих производство, передачу, распределение и взаимное преобразование электрической энергии**



Появление электрического тока и напряжений в электрической цепи невозможно без источников электрической энергии, которые преобразуют механическую, тепловую, световую и другие виды энергии в электрическую. При этом в источнике так наз. сторонними ЭДС создаётся электрическое поле с напряжённостью E , которое, действуя на заряженные частицы, разделяет их таким образом, что на одном зажиме (положительном, обозначаемом знаком "+") источника скапливаются положительные заряды, а на другом (обозначаемом знаком "-") - отрицательные (электроны).

При подключении к зажимам источника энергии объектов и устройств, создающих вместе с источником замкнутый контур - электрическую цепь, в этих устройствах электроны перемещаются от отрицательного зажима источника к положительному, нейтрализуя недостаток электронов на зажиме "+". Но в это же время сторонние силы в источнике разделяют заряды, обеспечивая непрерывное движение зарядов (электрического тока) в цепи. Говорят, что движение электрических зарядов в цепи происходит под действием электродвижущей силы источника.

Вспомогательные элементы: выключатели, предохранители, резистивные регуляторы тока, измерительные приборы, разъёмы и др.

Приемники электрической энергии (пассивные элементы) – устройства, в которых электрическая энергия преобразуется в другие виды тепловую (нагревательные элементы), механическую (электрические двигатели), световую (люминесцентные лампы), химическую (гальванические ванны) и др.

Пассивными наз. элементы электрической цепи, не способные генерировать электрическую энергию (резисторы, индуктивные катушки и конденсаторы).



Резистор - пассивный элемент электрической цепи, обладающий определённым или переменным значением электрического сопротивления R . Линейно преобразует силу тока в напряжение и напряжение в силу тока, ограничивает ток и др. Это - диссипативный элемент (не может накапливать энергию): полученная им электрическая энергия необратимо в нем преобразовывается в тепловую.

Параметры:

- номинальное сопротивление (рабочее) и допустимые отклонения от него;
- номинальная мощность рассеяния (максимальная мощность, которую резистор может рассеивать без изменения своих параметров при длительной работе);
- предельное рабочее напряжение (м/б приложено к резистору без нарушения его работоспособности);
- температурный коэффициент сопротивления (ТКС) (характеризует изменение сопротивления резистора при изменении температуры на 1°C).

Электрическое сопротивление току (R) характеризует способность цепи преобразовывать электромагнитную энергию в тепловую, скалярная величина, равная откуда

$$R = \frac{U}{I}$$

$$I_R = \frac{U_R}{R}, \text{ или } U_R = RI_R$$

Потери энергии в резисторе при прохождении в цепи тока проводимости

$$P = RI_R^2 = U_R I_R = GU_R^2,$$

$$[R] = [U]/[I] = \text{В}/\text{А} = \text{Ом}$$

Единица электрического сопротивления:

$$R = \rho \cdot \frac{\boxtimes}{S}$$

где R – электрическое сопротивление постоянному току, (Ом); ρ - удельное сопротивление, (Ом*м); l - длина проводника, (м); S – площадь поперечного сечения, (м²),



Электрическое сопротивление

«Электрическое сопротивление»
«Закон Ома»
«Один из основных физических законов»

сила тока участка цепи
прямо пропорциональна напряжению
на концах этого участка

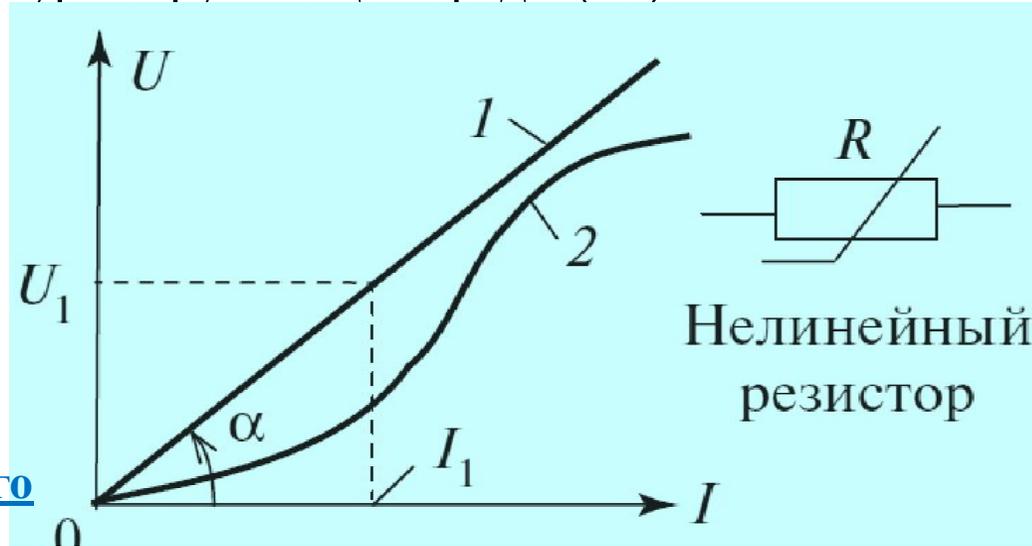
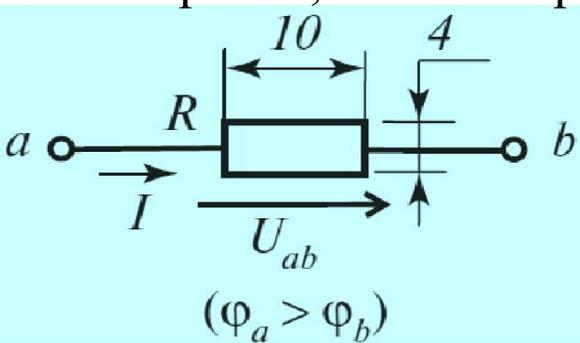
и обратно пропорциональна его
сопротивлению

За единицу сопротивления принят «Ом»

Сопротивление проводов, резисторов и других проводников электрического тока зависит от температуры T окружающей среды

$$R = R_{20} \cdot [1 + \alpha (T - 20^{\circ})]$$

где R – электрическое сопротивление постоянному току, (Ом); R_{20} – электрическое сопротивление постоянному току при температуре 20°C , (Ом); α – температурный коэффициент сопротивления, зависящий от материала; T – температура окружающей среды ($^{\circ}\text{C}$).



Для линейного резистора численное значение сопротивления R определяет тангенс угла наклона ВАХ этого элемента

$$R = \frac{U_1}{I_1} = m_R \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{const}$$

Зависимость от:
 температуры (терморезисторы);
 яркости света (фоторезисторы);
 напряжения (варисторы);
 деформации (тензорезисторы);
 напряжённости электрического поля (магниторезисторы);
 от протекающего заряда (мемристоры).

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) линейного (1) и нелинейного (2) резисторов.

Электрическая проводимость (для постоянного тока) - скалярная величина, равная отношению постоянного электрического тока через пассивный двухполюсник к постоянному электрическому напряжению между выводами этого двухполюсника - величина обратная сопротивлению

$$G = \frac{I}{U} \Rightarrow G = \frac{1}{R} = R^{-1}$$

где G - электрическая проводимость, (См) (Сименс) или Ом^{-1} ; U - напряжение, (В); I - сила тока, (А); R - электрическое сопротивление, (Ом).

Типы:

по назначению:

- резисторы общего назначения;
- резисторы специального назначения:
- высокоомные (сопротивления от десятка МОм до единиц ГОм, рабочие напряжения 100—400 В);
- высоковольтные (рабочие напряжения — десятки кВ);
- высокочастотные (имеют малые собственные индуктивности и ёмкости, рабочие частоты до сотен МГц);
- прецизионные и сверхпрецизионные (повышенная точность, допуск 0,001 — 1 %).

по материалу:

- ✓ углеродистые резисторы. Изготавливают в виде плёночных и объёмных. Плёнки или резистивные тела представляют собой смеси графита с органическими или неорганическими веществами.
- ✓ Металлоплёночные или металлоокисные резисторы. В качестве резистивного материала используется тонкая металлическая лента.
- ✓ Композиционные резисторы.
- ✓ Проволочные резисторы.
- ✓ Интегральный резистор. Резистивный элемент — слаболегированный полупроводник, формируемый в кристалле микросхемы в виде обычно зигзагообразного канала, изолированного от других цепей микросхемы p-n переходом. Такие резисторы имеют большую нелинейность вольт-амперной характеристики. В основном используются в составе интегральных монокристаллических микросхем, где применить другие типы резисторов принципиально невозможно.

Электрический конденсатор – пассивный элемент электрической цепи, обладающий свойством электрической ёмкости для временного накопления и сохранения электрической энергии. Конденсаторы состоят из двух и более токопроводящих обкладок, разделённых слоем (слоями) диэлектрика.

При нарастании напряжения на зажимах конденсатора в нём происходит преобразование электрической энергии внешнего источника в энергию электрического поля (накопления зарядов противоположных знаков на двух его электродах - пластинах). При уменьшении напряжения происходит обратное преобразование энергии электрического поля в электрическую энергию, возвращаемую источнику. Такой способностью обладают любые два провода, разделённые диэлектриком, например провод, висящий над землёй, любые два провода линии передачи.

При подключении к постоянному напряжению U последовательно соединённых резистора R и конденсатора C последний заряжается (в нём *накапливается энергия W*) некоторое время в течение которого ток заряда i_{zC} уменьшается от значения $i_{zC} = I = (U/R)$ до нуля, а напряжение заряда u возрастает от нуля до значения U . Т.о., при *установившемся* режиме (по истечении времени, когда заканчивается накопление W) в цепи постоянного тока конденсатор является местом её разрыва, т.е. через C постоянный ток не проходит, поэтому **электрическое сопротивление конденсатора $R_C = \infty$** , а накопленная в нём энергия определяется по формуле:

$$W_C = \frac{Cu_C^2}{2}$$

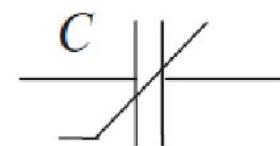
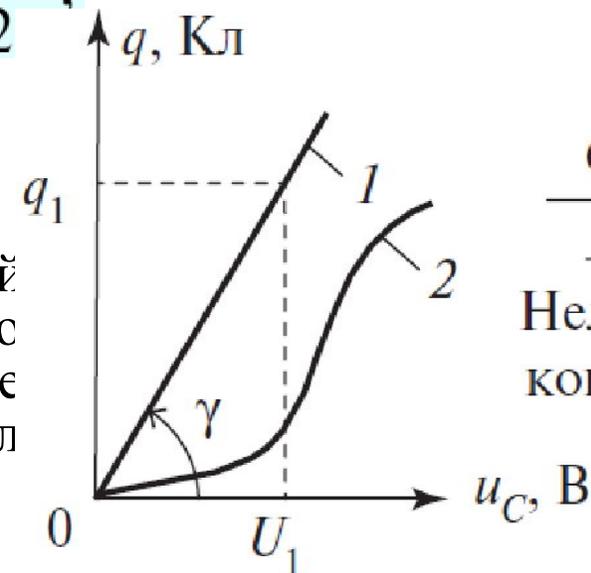
где C — ёмкость (основной параметр конденсатора), определяемая из кулон-вольтной характеристики I (линейного) или 2 (нелинейного) конденсаторов (см. рис.).

Накопленный заряд q на одном из электродов линейного конденсатора пропорционален приложенному к зажимам напряжению U_C : **$q = CU_C$**

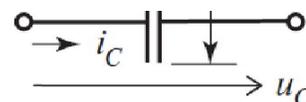
Электрическая ёмкость проводника — скалярная величина, характеризующая способность проводника накапливать электрический заряд, равная отношению электрического заряда проводника к его электрическому потенциалу в предположении, что все другие проводники бесконечно удалены и что электрический потенциал бесконечно удаленной точки принят равным нулю.

Единица ёмкости

$$[C] = [q]/[U] = \text{Кл}/\text{В} = \text{А} \cdot \text{с}/\text{В} = \text{с}/\text{Ом} = \text{Ф (фарад)}.$$



Нелинейный конденсатор



Когда к обкладкам конденсатора приложено переменное напряжение значения и знаки зарядов на них также меняются во времени. Считается, что переменный ток i_c через конденсатор *проходит*. При этом заряд конденсатора, ток и напряжение на нём определяются соотношениями:

$$i_c = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt}.$$

$$u_c = \frac{1}{C} \int i_c dt.$$

Эквивалентный ток через конденсатор прямо пропорционален ёмкости конденсатора и скорости изменения напряжения на его обкладках. Напряжение на выводах конденсатора изменится прямо пропорционально интегралу по току и обратно пропорционально ёмкости конденсатора.

Ёмкостное сопротивление (Ом)

$$R_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2f\pi C}$$

Основные параметры конденсаторов (ГОСТ):

- номинальная ёмкость с допустимыми отклонениями от неё;
- номинальное напряжение',
- тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ или добротность; характеризует электромагнитные потери в конденсаторе;
- не зависит от вида электрической схемы, в которой он измеряется, а зависит от вида диэлектрика, напряжённости электрического поля между обкладками конденсатора, температуры окружающей среды, частоты колебаний приложенного к нему переменного напряжения, времени электрического воздействия.
- ;
- ток утечки (в основном для электролитических конденсаторов);
- сопротивление изоляции',
- температурный коэффициент ёмкости ТКЕ (показывает изменение ёмкости конденсатора при изменении температуры окружающей среды на 1°C).

Когда к обкладкам конденсатора приложено переменное напряжение значения и знаки зарядов на них также меняются во времени. Считается, что переменный ток i_c через конденсатор *проходит*. При этом заряд конденсатора, ток и напряжение на нём определяются соотношениями:

$$i_c = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt}.$$

$$u_c = \frac{1}{C} \int i_c dt.$$

Эквивалентный ток через конденсатор прямо пропорционален емкости конденсатора и скорости изменения напряжения на его обкладках. Напряжение на выводах конденсатора изменятся прямо пропорционально интегралу по току и обратно пропорционально емкости конденсатора.

Ёмкостное сопротивление (Ом)

$$R_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

Параметры конденсаторов постоянной ёмкости:

- номинальная ёмкость с допустимыми отклонениями от неё (устанавливаются шкалой ГОСТа);
- номинальное напряжение (при котором он может работать бесперебойно в течение срока службы, установленного заводом-изготовителем);
- тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\psi = P/Q$, или добротность (характеризуют электромагнитные потери в конденсаторе);
- ток утечки (в основном для электролитических конденсаторов). Не зависит от вида электрической схемы, в которой он измеряется, а зависит от вида диэлектрика, напряжённости электрического поля между обкладками конденсатора, температуры окружающей среды, частоты колебаний приложенного к нему переменного напряжения, времени электрического воздействия;
- сопротивление изоляции;
- температурный коэффициент ёмкости ТКЕ (показывает изменение ёмкости конденсатора при изменении температуры окружающей среды на 1°C).

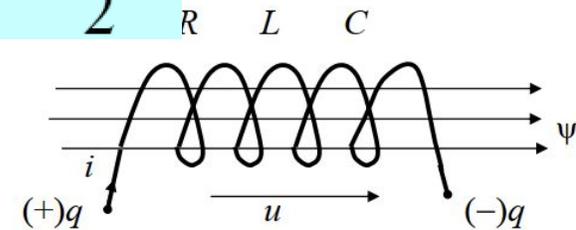
C - емкость, (Ф); **i_c** – сила тока, (А). **u** – напряжение, (В) **P** и **Q** - активная и реактивная мощности соответственно.

Индуктивная катушка — пассивный элемент цепи, предназначенный для использования его собственной индуктивности L и (или) его магнитного поля. При нарастании тока в индуктивной катушке происходит преобразование электрической энергии в магнитную и ее накопление в магнитном поле катушки, при убывании тока — обратное преобразование энергии магнитного поля в электрическую энергию, возвращаемую источнику.

Энергия, запасенная в магнитном поле катушки:

$$W_L = \frac{Li_L^2}{2},$$

где L — индуктивность катушки; i_L — ток, протекающий через катушку и создающий в ней магнитный поток Φ и потокосцепление Ψ в веберах (Вб).



Потокосцепление — сумма магнитных потоков, сцепленных с элементами контура электрической цепи.

$$\Psi = m\Phi$$

где Ψ — потокосцепление, (Вб); m - число витков; Φ — магнитный поток

Потокосцепление самоиндукции — потокосцепление элемента электрической цепи, обусловленное электрическим током в этом элементе.

Собственная индуктивность — скалярная величина, равная отношению потокосцепления самоиндукции элемента электрической цепи к электрическому току в нем.

$$L = \frac{\Psi}{I}$$

где L - индуктивность, (Гн); Ψ — потокосцепление, (Вб); I — сила тока, (А).

Как и конденсаторы, предназначены для временного накопления электромагнитной (электрической) энергии. Они представляют собой катушки, намотанные изолированными проводами, с ферромагнитными или стальными сердечниками (магнитопроводами), или без сердечника (воздушный магнитопровод). Катушки индуктивности, за исключением дросселей, применяемых в цепях электропитания радиоэлектронной аппаратуры, не являются комплектующими изделиями, как резисторы и конденсаторы. Их изготавливают на сборочных заводах, и они имеют те параметры, которые необходимы для конкретных изделий. Из-за трудностей микроминиатюризации, повышенной трудоёмкости изготовления их стараются использовать, по возможности, ограниченно. Однако в ряде электронных устройств без них обойтись нельзя. Тем более что они могут успешно работать при температурах 200...500°C.

Согласно закону электромагнитной индукции при изменении потокосцепления в катушке индуцируется ЭДС самоиндукции, равная (при ее эксплуатации на линейном участке вебер-амперной характеристики)

$$e_L = -\frac{d\Psi}{dt} = -L\frac{di_L}{dt}.$$

Знак «минус» показывает, что ЭДС самоиндукции согласно правилу Ленца препятствует изменению в ней тока. В индуктивной катушке будет протекать ток, если напряжение u_L на ее зажимах компенсирует ЭДС e_L и падение напряжения на электрическом сопротивлении R провода катушки. Пренебрегая активным сопротивлением R , получим *компонентное*

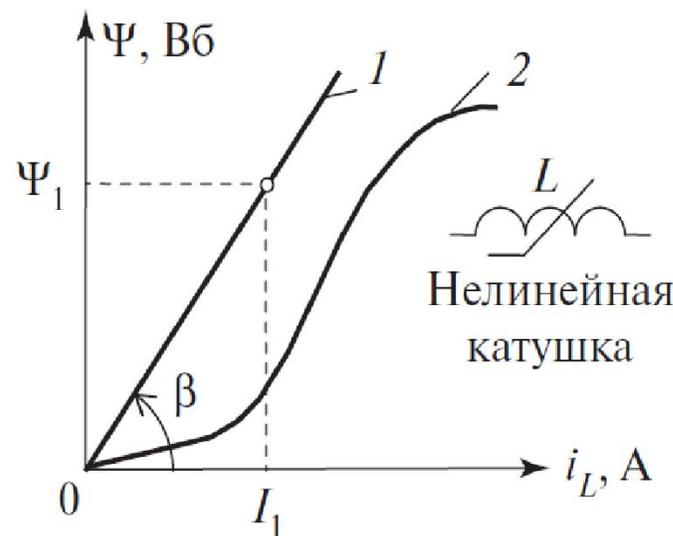
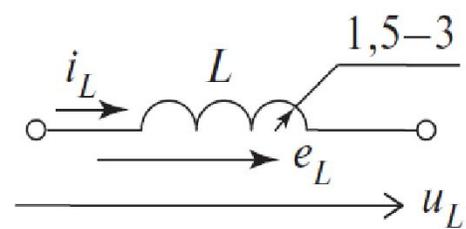
уравнение идеального индуктивного элемента (катушки): $u_L \approx -e_L = L\frac{di_L}{dt}$

$$i_L = \frac{1}{L} \int_0^t u dt$$

где i_L – сила тока, (А); L – индуктивность, (Гн); u – напряжение, (В).

Индуктивное сопротивление (Ом)

$$R_L = \omega L = 2 f \pi L$$

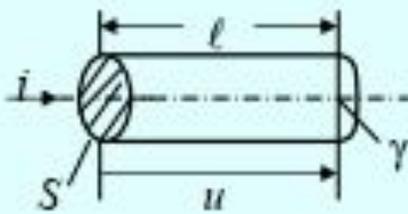
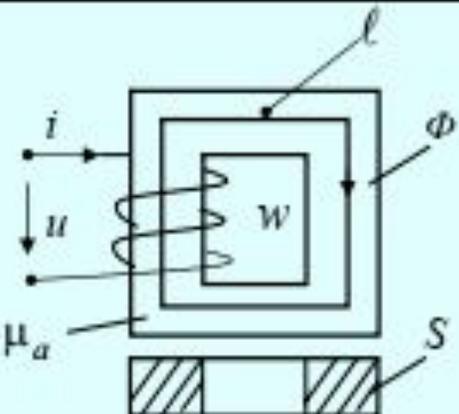
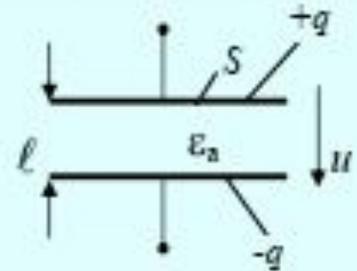


$$\Psi = Li_L \quad \text{или} \quad L = \frac{\Psi_1}{I_1} = m_L \operatorname{tg} \beta = \operatorname{const}.$$

Единица основного параметра катушки — индуктивности

$$[L] = [\Psi]/[I] = \text{В} \cdot \text{с}/\text{А} = \text{Ом} \cdot \text{с} = \text{Гн (генри)}$$

Формулы для расчета параметров простейших электротехнических устройств

№ п/п	Наименование устройства	Эскиз устройства	Формула для определения параметра
1	Прямолинейный проводник с постоянным поперечным сечением		$R = \frac{l}{\gamma S}$
2	Катушка на замкнутом стальном сердечнике постоянного сечения		$L = \frac{\mu_a w^2 S}{l}$
3	Плоский конденсатор		$C = \frac{\epsilon_a S}{d}$

Электрическая ёмкость ёмкость между электродами плоского конденсатора:

$$C = 0,0884 \cdot \epsilon \cdot \frac{S}{d}$$

где C – емкость, (пФ); S – площадь пластин конденсатора, (см²); d – расстояние между пластинами конденсатора (ширина диэлектрика), (см); ϵ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика (вакуум и воздух = 1; янтарь = 2,8; сосна сухая = 3,5; мрамор = 8-10; сегнетокерамика = 450-1700).

Индуктивность однослойной катушки со сплошной намоткой можно определить по эмпирической формуле:

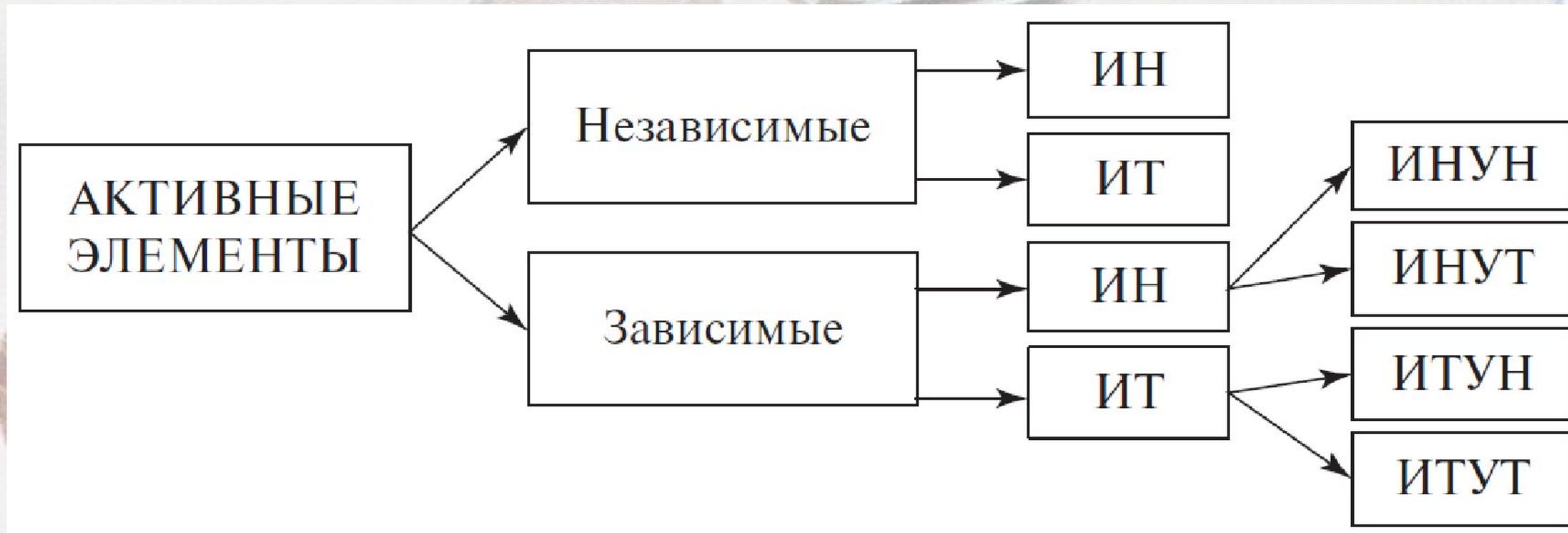
$$L = \frac{0,01 \cdot D \cdot \omega^2}{\frac{\boxtimes}{D} + 0,44}$$

Индуктивность многослойной катушки:

$$L = \frac{0,08 \cdot D^2 \cdot \omega^2}{3D + 9\boxtimes + 10t}$$

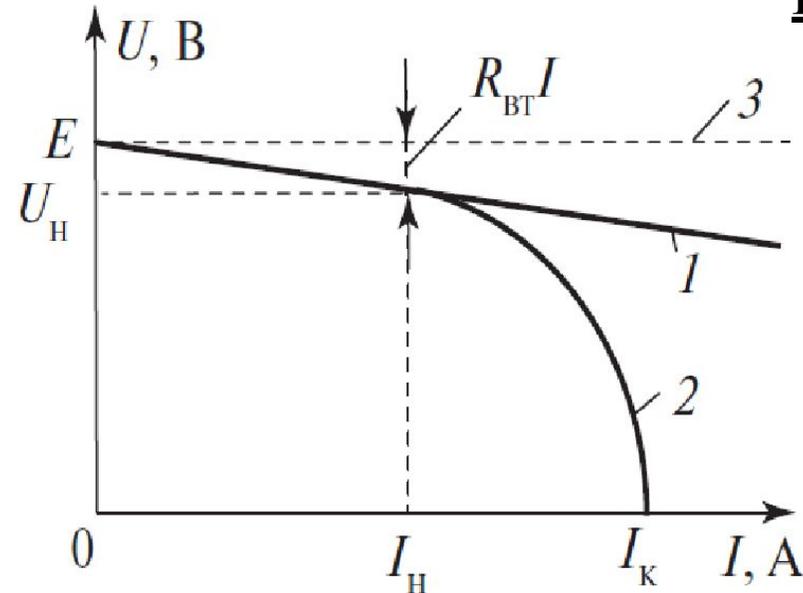
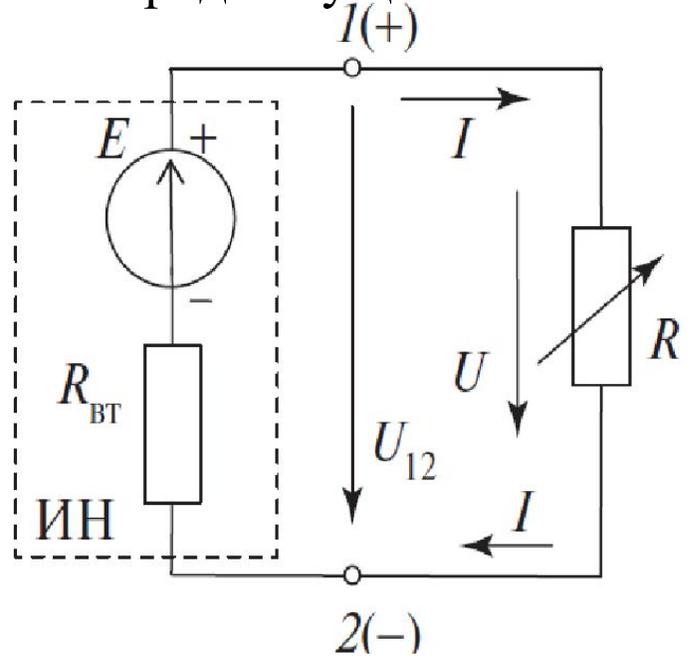
где L - индуктивность, (мкГн); D – диаметр катушки, (см); ω – число витков катушки; l - длина намотки, (см); t – толщина намотки, (см).

Активные элементы цепей являются источниками электрической энергии (аккумуляторы, генераторы и др.).



Различают **источники напряжения (ИН)** и **источники тока (ИТ)**, которые подразделяют на **независимые** — с постоянными параметрами (ИН: ЭДС $E = \text{const}$ и внутреннее электрическое сопротивление $R_{\text{вт}} = \text{const}$; ИТ: ток $I = \text{const}$ и внутренняя электрическая проводимость $G_{\text{вт}} = \text{const}$) и **зависимые**, параметры которых управляются напряжением u_y (**ИНУН** и **ИТУН**) или током i_y (**ИНУТ** или **ИТУТ**), т.е. $E = f(u_y)$ или $E = f(i_y)$ и $I = f(u_y)$ или $I = f(i_y)$.

Источник электрического напряжения (ИН) — источник электрической энергии, характеризующийся электродвижущей силой E и внутренним электрическим сопротивлением $R_{\text{вТ}}$.



Внешняя характеристика источника

$$U = U_{12} = E - U_{\text{вТ}} = E - R_{\text{вТ}} I$$

Режим холостого хода (ХХ):

$$E = \varphi_1 - \varphi_2 = U_{12\text{Х}}$$

Режим короткого замыкания (КЗ):

$$R = 0 \text{ и } U_{12} = 0 \quad I_{\text{к}} = E / R_{\text{вТ}}$$

Идеальный источник напряжения

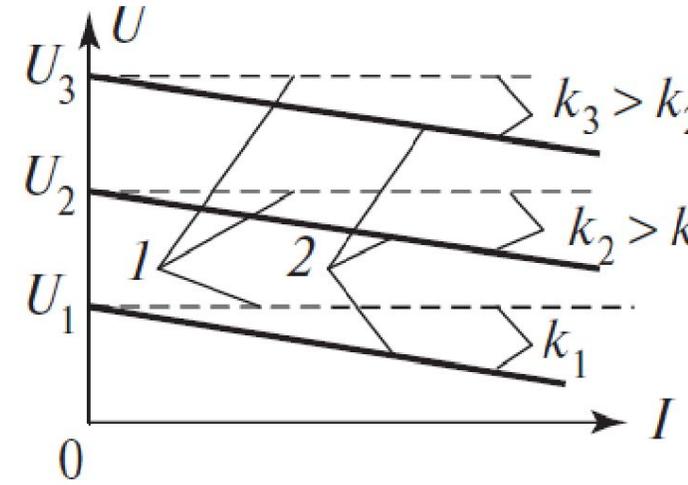
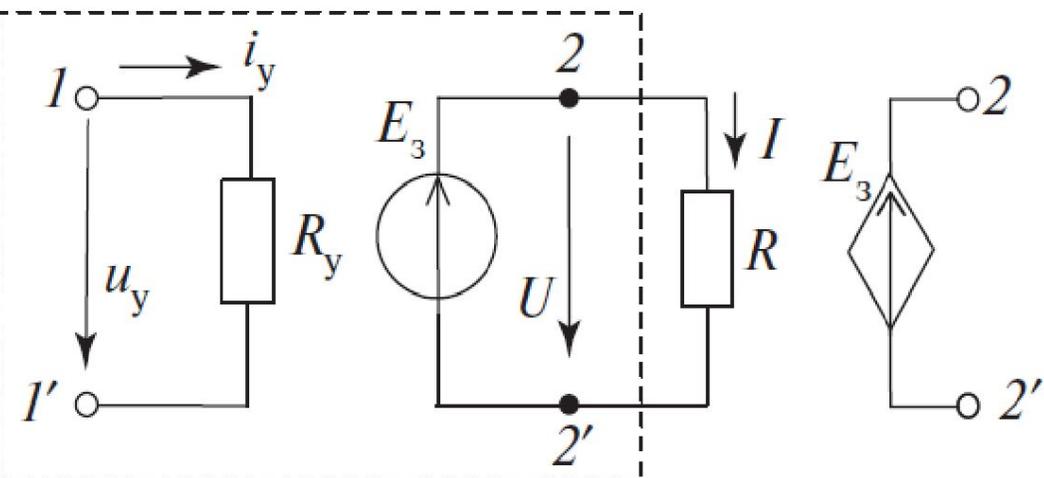
$$R_{\text{вТ}} \rightarrow 0 \quad I_{\text{к}} \rightarrow \infty$$

Закон Ома

$$U = RI \quad I = \frac{E}{R_{\text{вТ}} + R}$$

В зависимом ИН предусматривают две пары выводов: пару управляющих 1–1' и пару собственно ИН 2–2'.

Если ЭДС $E_3 = k u_y$, имеем источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН), а если $E_3 = k i_y$, имеем источник напряжения, управляемый током (ИНУТ).

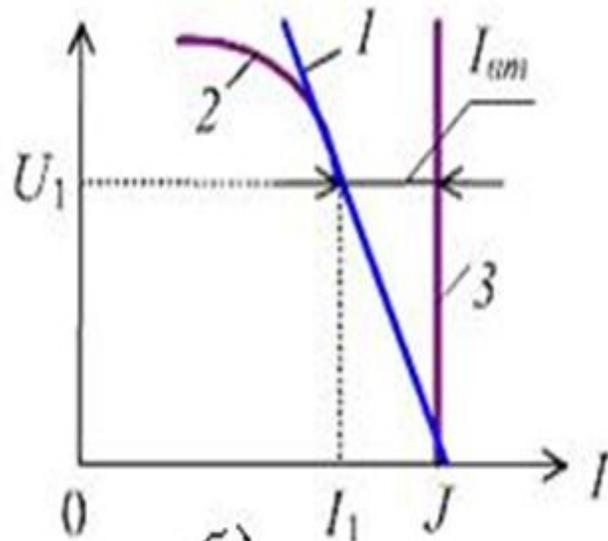
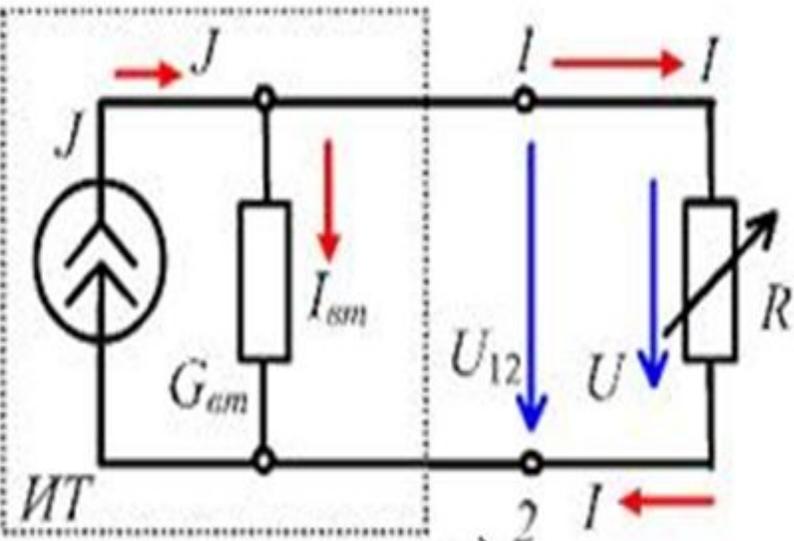


Источник электрического тока - источник электрической энергии, характеризующийся электрическим током J в нем и внутренней проводимостью $G_{вт}$

Пренебрегая сопротивлением проводов и принимая $U_{12} = U$, можно записать

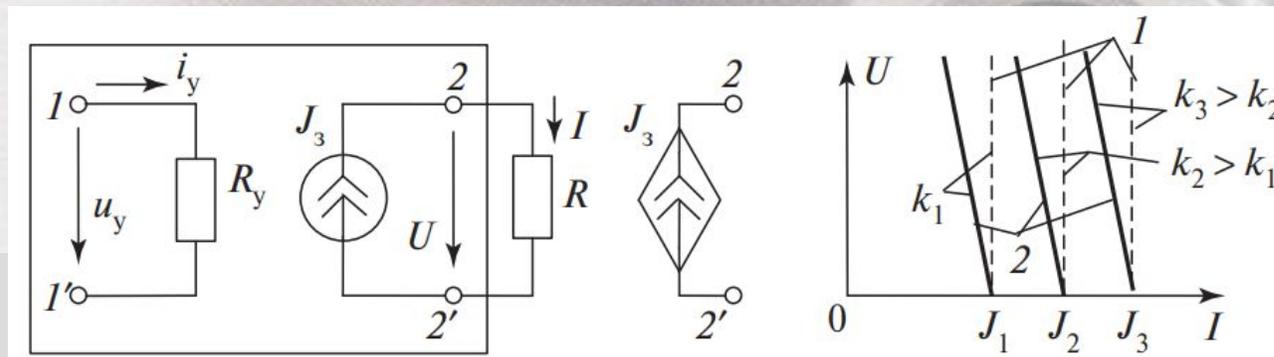
$$J = I_{эм} + I = G_{эм} U_{12} + I = G_{эм} U + I,$$

где $U = RI$ - напряжение на зажимах приемника.

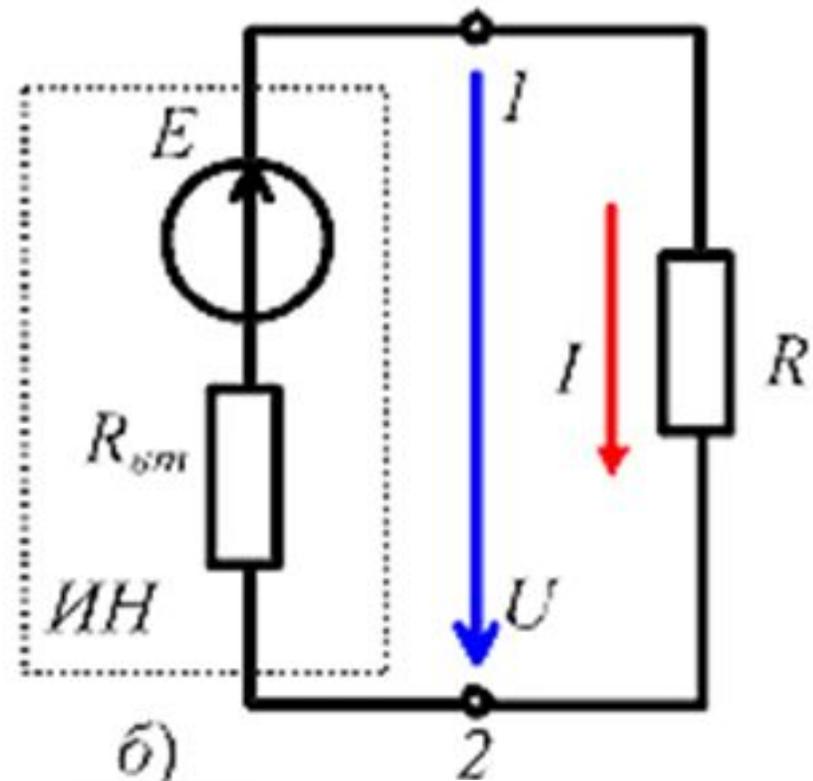
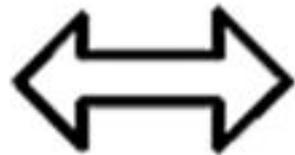
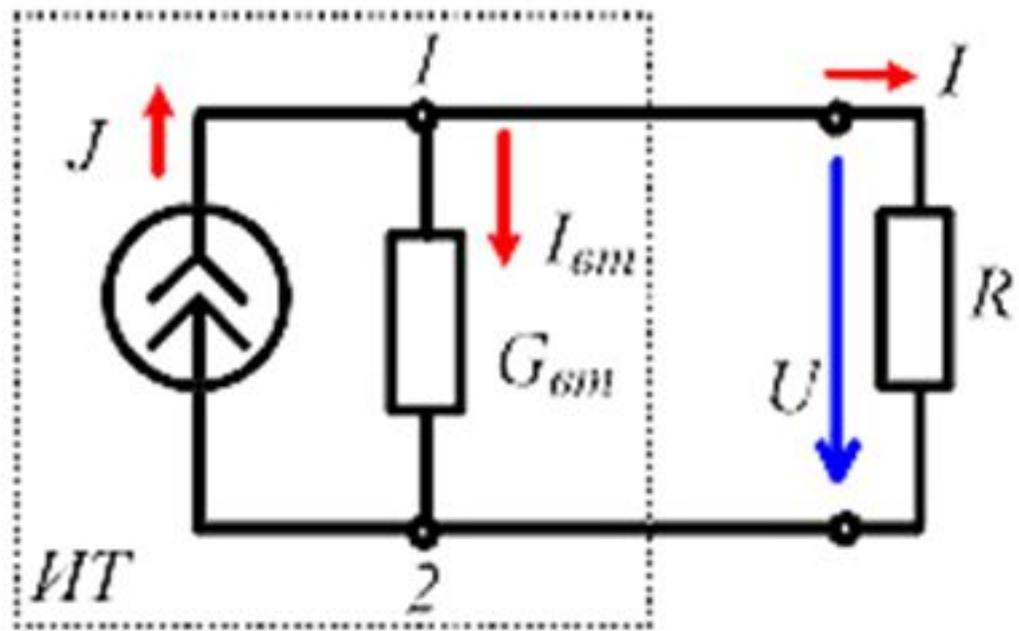


На схеме замещения (рис. 1.15, а) независимый источник тока представляют в виде идеального ИТ (с бесконечно большим сопротивлением) с заданным током J и параллельно с ним соединенного элемента (резистора) с внутренней проводимостью $G_{вт}$.

$$G = 1/R, \text{ т.е. } G_{вт} \ll G (R_{вт} \gg R).$$



В зависимости от метода расчета электрической цепи источники энергии на схеме замещения представляют или в виде источников напряжения ИН, или в виде источников тока ИТ, причем в ходе расчета возникает необходимость эквивалентной замены источника тока источником напряжения и обратно.



$$G_{ВТ} = \frac{1}{R_{ВТ}} \quad \text{и} \quad J = G_{ВТ} E$$

$$U = J/G_{см} - (1/G_{см})I.$$

$$R_{ВТ} = \frac{1}{G_{ВТ}} \quad \text{и} \quad E = R_{ВТ} J.$$

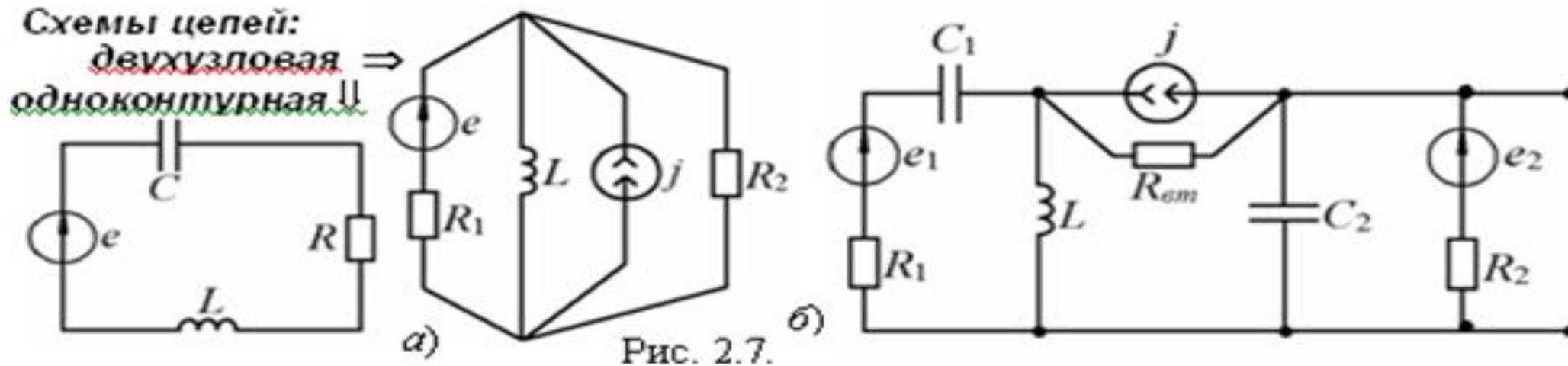
Классификация электрических цепей

(в соответствии с типами Э/Т систем)



Классификация электрических цепей

Выбор метода расчёта электрической цепи определяется топологией схемы цепи и характером входящих в неё активных (источников энергии) и пассивных элементов (приёмников энергии).



По топологическим особенностям электрические цепи подразделяют:

- на простые (одноконтурные; двухузловые, рис. 2.7, а) и сложные (многоконтурные (рис. 2.7, б); многоузловые; планарные (плоскостные) и объёмные);

Электрические цепи принято изображать в виде электрических схем. Схема электрической цепи - это её графическое изображение, содержащее условные обозначения элементов цепи и показывающее соединения этих элементов

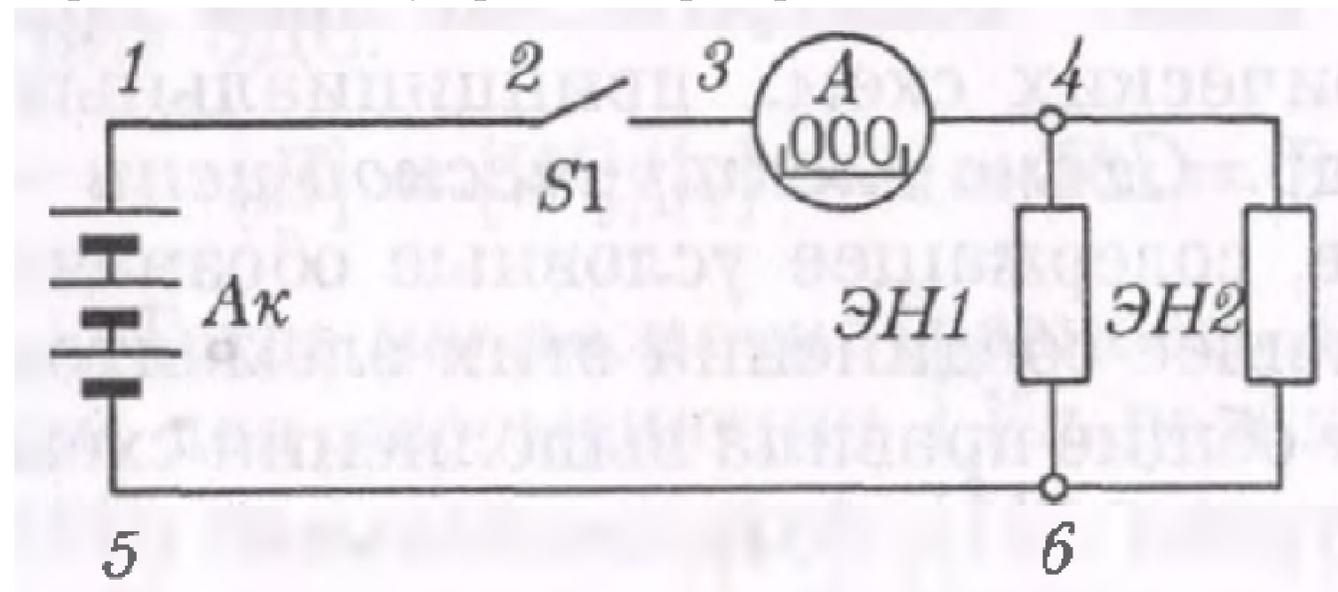
ГОСТ 2.701-76 устанавливает общие правила выполнения и типы (в зависимости от основного назначения) схем и их шифры.

Классификация электрических схем по типу и их шифры:

- Структурная (Э1);**
- Функциональные (Э2);**
- Принципиальная (полная Э3);**
- Соединений (монтажная Э4);**
- Подключения (Э5);
- Общая (Э6);

Структурная схема электрической цепи определяет основные функциональные части изделия, их назначение и связи. *Функциональные схемы* разъясняют определённые процессы протекающие в отдельных функциональных цепях изделия или изделия в целом.

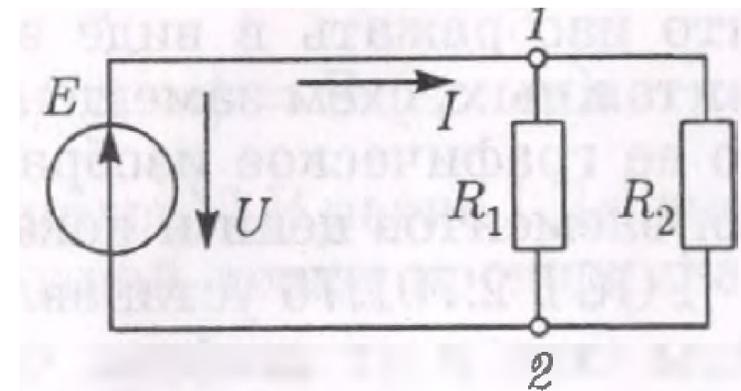
На *принципиальной схеме* должны быть изображены все электрические элементы и устройства, необходимые для осуществления и контроля заданных электрических процессов, все электрические связи между ними, а также разъемы, зажимы и т. п. которыми заканчиваются входные и выходные цепи. Элементы на схеме изображаются в виде условных графических обозначен[^] установленных в стандартах ЕСКД, и имеют буквенно-цифровые позиционные обозначения (с ростом порядковых номеров слег направо и сверху вниз). На схеме рекомендуется указывать минимальные значения параметров элементов и устройств, характеристики входных и выходных цепей (частоту, напряжение, то: мощность и т. п.).



Монтажная схема (схема соединений) электрической цепи составляется на основании принципиальной схемы с расположением всех элементов и устройств (с их внешними очертаниями), соответствующих действительному их размещению в изделии, помещении, на местности. Соединительные провода, жгуты и кабели показывают на схеме в виде отдельных линий с указанием маркировок, количества и сечения проводов.



При анализе электрических цепей их заменяют схемами замещения. *Схема замещения* электрической цепи



1.1.7. Топологические параметры схем

При анализе электрических схем пользуются следующими топологическими параметрами схем:

ВЕТВЬ (B)	УЗЕЛ (Y)	КОНТУР ($k_{\text{н}}$)
- это участок электрической цепи, по которому протекает один и тот же ток	- это место соединения ветвей электрической цепи. Место, где объединены две ветви, обычно называют не узлом, а соединением , а узел сводит не менее трех ветвей	- это замкнутый участок цепи. Линейно независимые контуры $k_{\text{н}}$ отличаются друг от друга хотя бы одной новой ветвью

Примечание. Число независимых контуров в цепи зависит от числа ветвей B и числа узлов Y в цепи и равно $k_{\text{н}} = B - (Y - 1)$.

Провести топологический анализ схемы электрической цепи (рис. 1.2), т. е. определить число ветвей, узлов, соединений и независимых контуров

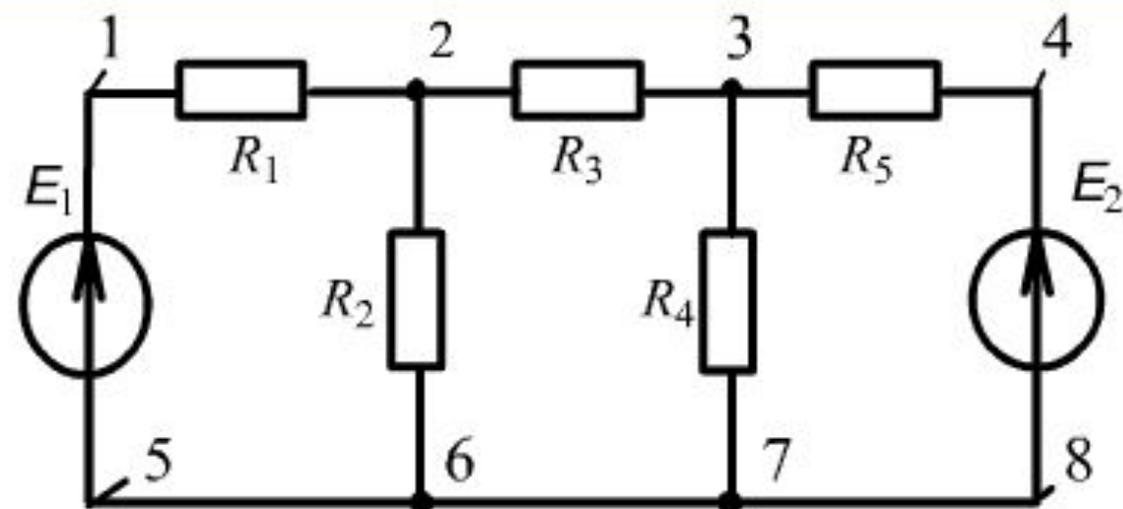


Рис. 1.2

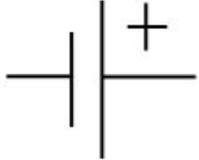
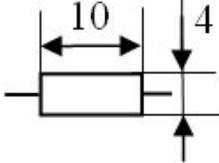
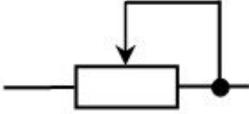
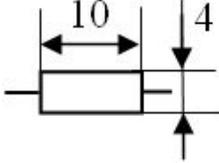
Решение

Число ветвей	Число узлов	Число соединений	Число независимых контуров
$B = 5$	$Y = 3$	2	$k_{\text{н}} = 5 - (3 - 1) = 3$

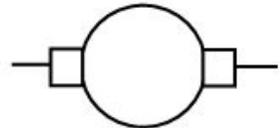
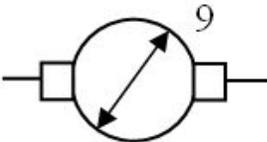
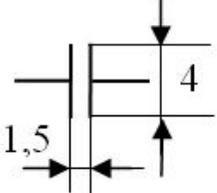
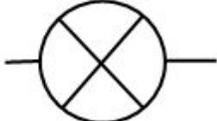
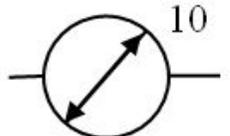
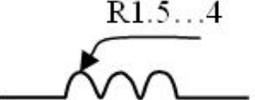
Примечания. 1. Точки 5, 6, 7 и 8 имеют одинаковый электрический потенциал, поэтому они могут быть объединены в одну общую точку - **узел**.

2. Точки 1 и 4 соединяют по два элемента, поэтому их называют **точками соединений**, а не узлами.

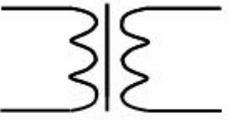
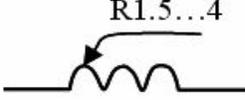
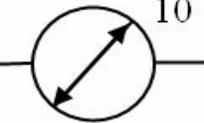
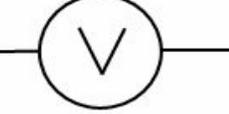
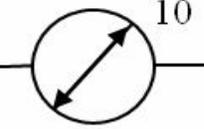
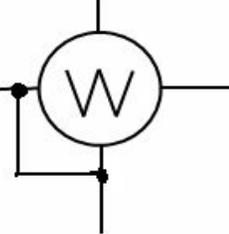
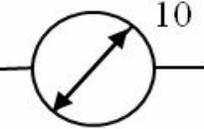
Графическое обозначение элементов цепей на принципиальных схемах.

№	Наименование элемента	Внешний вид	Условное графическое обозначение	Размеры графического обозначения	Условное буквенное обозначение	Единицы измерения
1	Гальванический элемент или аккумулятор				GB	В (Вольт)
2	Резистор нерегулируемый линейный				R	Ом
3	Резистор регулируемый линейный				R	Ом

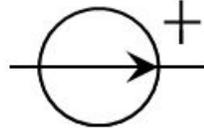
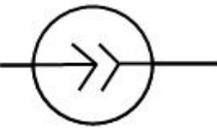
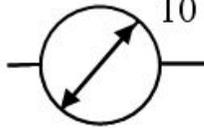
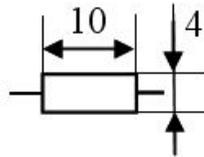
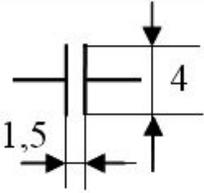
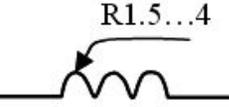
Графическое обозначение элементов цепей на принципиальных схемах.

№	Наименование элемента	Внешний вид	Условное графическое обозначение	Размеры графического обозначения	Условное буквенное обозначение	Единицы измерения
5	Ротор (якорь) генератора или двигателя постоянного тока				М	
6	Конденсатор				С	Ф (Фарады)
7	Лампа накаливания				EL	
8	Катушка индуктивности				L	Гн (Генри)

Графическое обозначение элементов цепей на принципиальных схемах.

№	Наименование элемента	Внешний вид	Условное графическое обозначение	Размеры графического обозначения	Условное буквенное обозначение	Единицы измерения
9	Трансформатор однофазный с ферромагнитным магнитопроводом				T	
10	Амперметр				PA	
11	Вольтметр				PV	
12	Ваттметр				PW	

Графическое обозначение элементов цепей на схемах замещения .

№	Наименование элемента	Внешний вид	Условное графическое обозначение	Размеры графического обозначения	Условное буквенное обозначение
1	Источник напряжения или ЭДС (идеальный)	Нет			G
2	Источник тока (идеальный)	Нет			G
3	Постоянное сопротивление	Нет			R
4	Конденсатор	Нет			C
5	Индуктивность	Нет			L

Законы, описывающие работу электрической цепи

Законы Ома

Закон Ома для участка цепи

$$I = \frac{U}{R}$$

- Обобщённый закон Ома для активной ветви

$$I = \frac{\pm E \pm U}{R}$$

Закон Ома для полной цепи:

ЭДС источника цепи равна сумме падений напряжения на источнике и на внешней цепи

$$I = \frac{E}{R_H + R_{Bm}}$$

Производные формулы $U_{ab} = IR;$ $R = \frac{U_{ab}}{I}.$

Напряжение на пассивном участке U_{ab}
называют падением напряжения

Законы, описывающие работу электрической цепи

Законы Кирхгофа

Первый закон

Алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в одном узле, равна нулю.

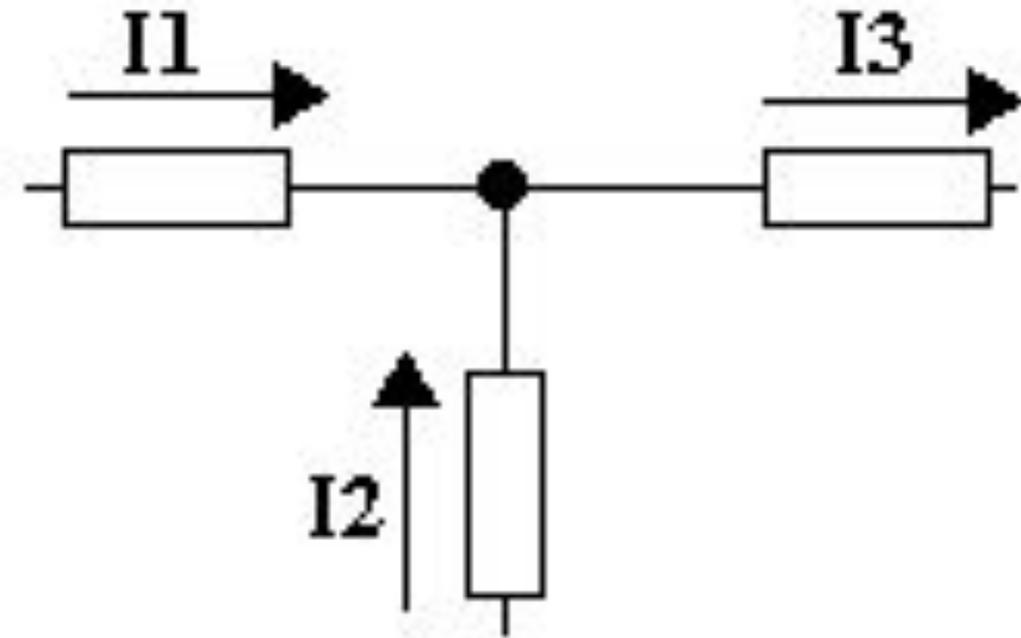
$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

где n число ветвей, составляющих узел.

Правило: ток втекающий в узел берётся с знаком «+» и вытекающий со знаком «-».

Вторая формулировка закона:

сумма токов, притекающих к узлу, равна сумме токов, вытекающих из узла.



$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

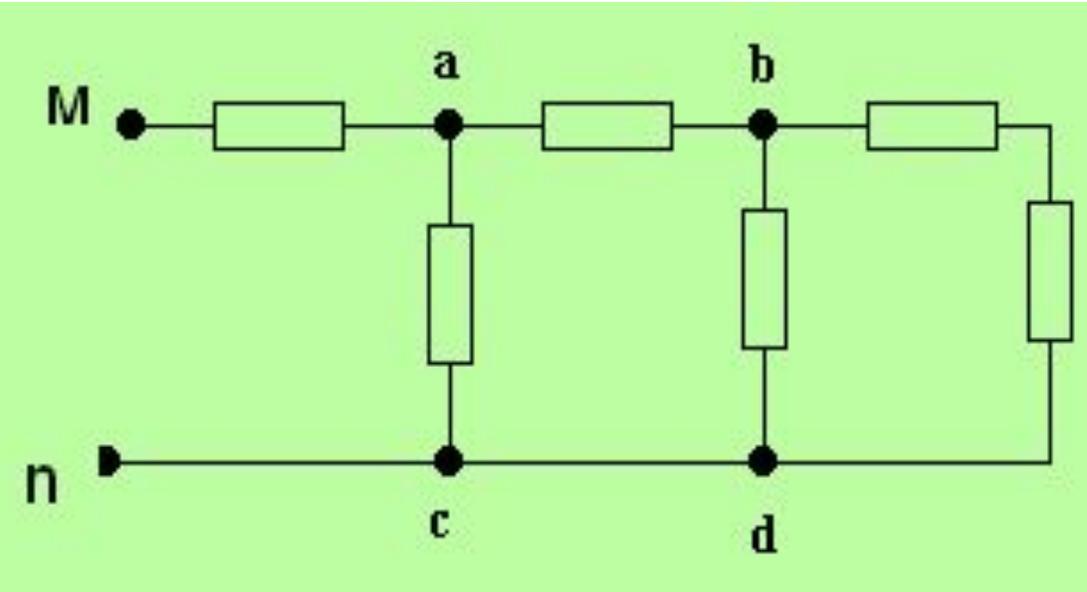
Законы, описывающие работу электрической цепи

Второй закон Кирхгофа:

Алгебраическая сумма напряжений на резистивных элементах замкнутого активного контура равна алгебраической сумме ЭДС, входящих в этот контур.

Правило: если ЭДС и ток имеют одинаковое направление с направлением обхода контура, то они берутся с «+», если нет, то с «-».

$$\sum R_i I_i = \sum E_i$$



Вторая формулировка закона: *алгебраическая сумма напряжений на всех элементах контура цепи равна нулю:*

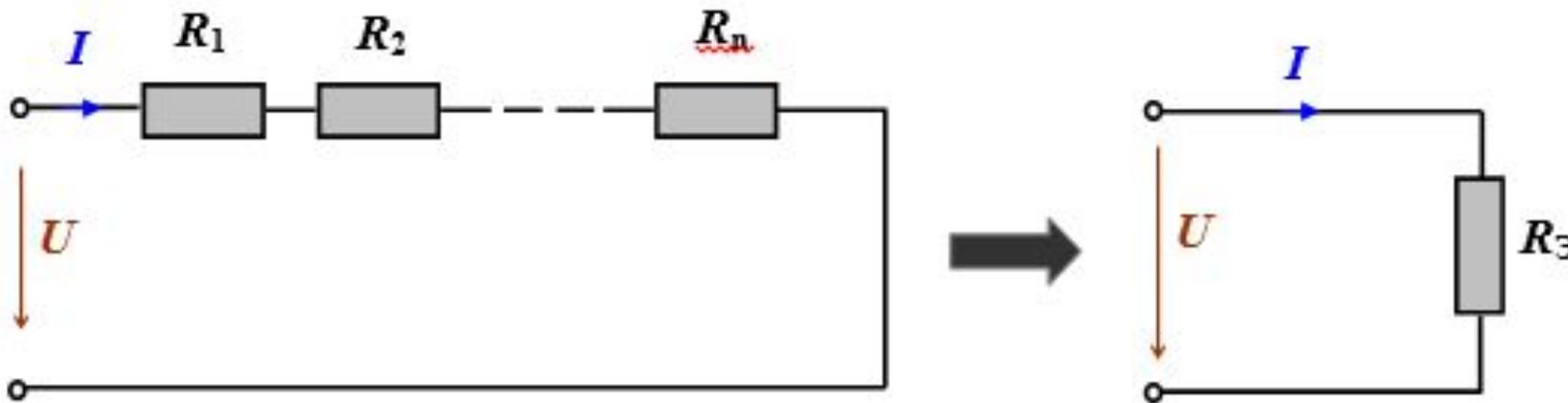
$$\sum_{k=1}^n U_k = 0$$

3. Преобразование схем электрических цепей

Условие эквивалентности цепей:

токи, напряжение и мощности в не преобразованной части цепи должны остаться неизменными.

3.1. Преобразование последовательно соединённых резистивных элементов



Условие эквивалентности схем

$$U = const, I = const.$$

Для исходной схемы (2-й закон Кирхгофа):

$$U = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n = I(R_1 + R_2 + \dots + R_n)$$

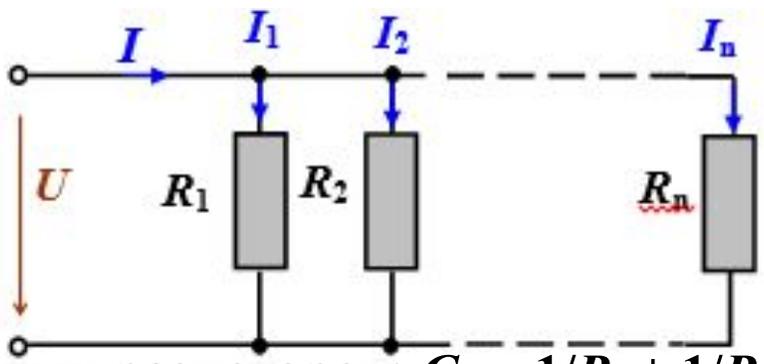
Для эквивалентной схемы $U = IR_{\text{Э}}$

Эквивалентное сопротивление последовательно соединённых резистивных элементов равно сумме сопротивлений этих элементов

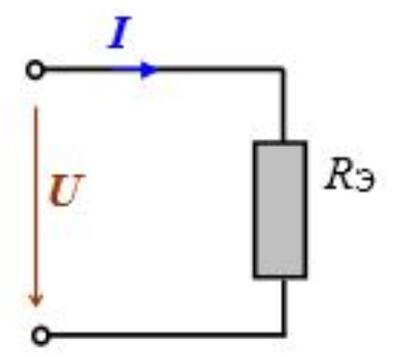
$$R_{\text{Э}} = \sum_{k=1}^n R_k$$

Преобразование параллельно соединённых пассивных элементов

При двух параллельно соединённых резисторах: $G_{\text{Э}} = 1/R_1 + 1/R_2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2}$,



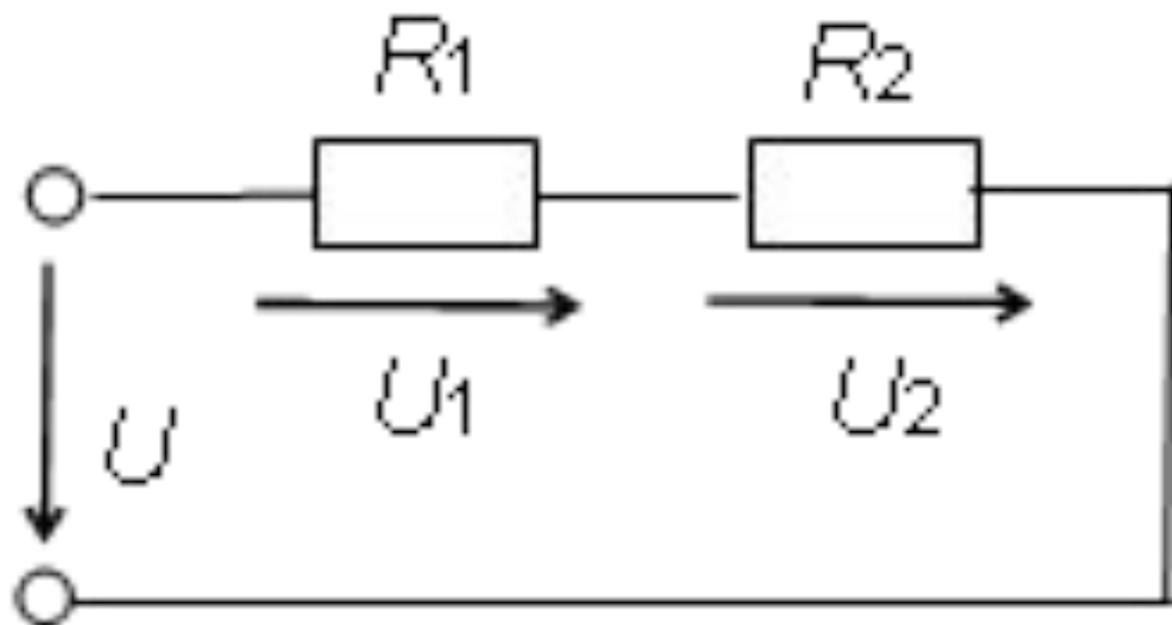
$$R_{\text{Э}} = \frac{1}{G_{\text{Э}}}$$



$$R_{\text{Э}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

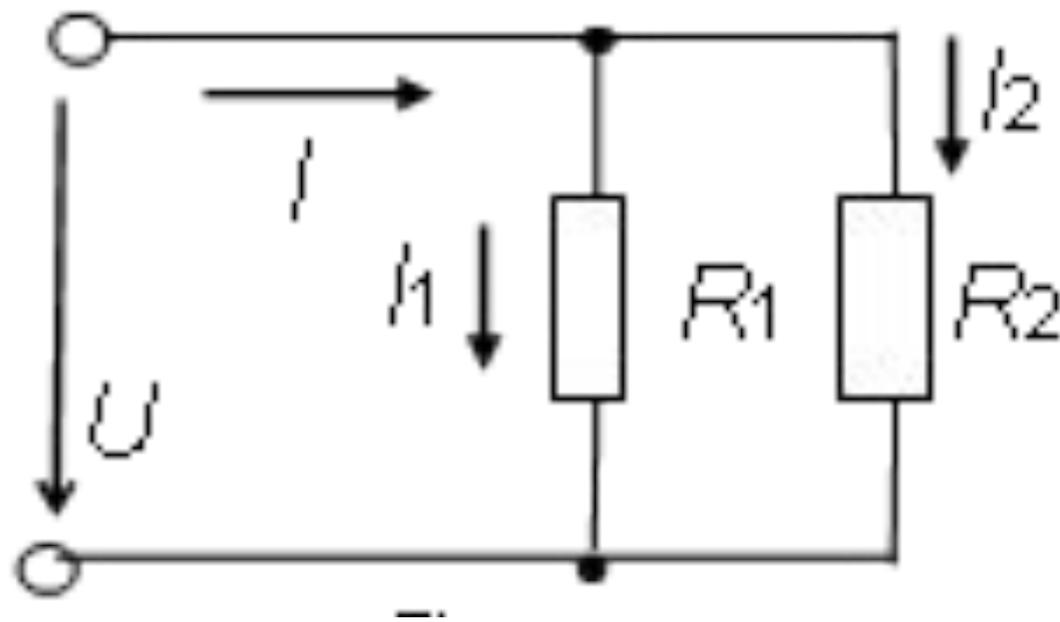
Правило делителя напряжения

$$U_1 = U \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad U_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

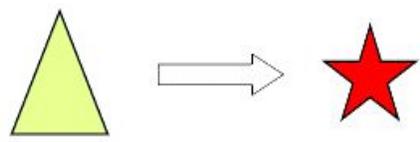
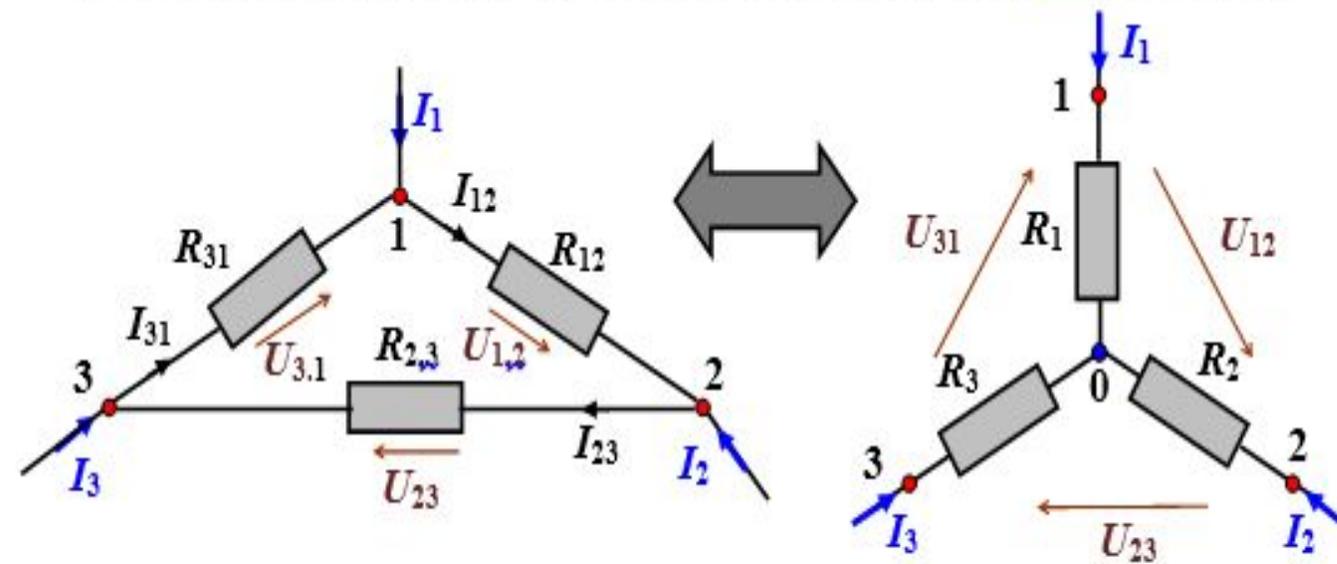


Правило делителя тока

$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$



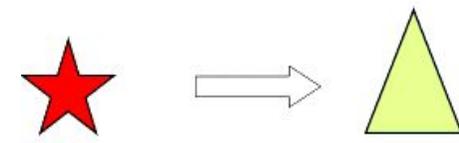
Взаимное преобразование «звезды» в «треугольник» и «треугольника» в «звезду»



$$R_1 = \frac{R_{31} \cdot R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

$$R_2 = \frac{R_{23} \cdot R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$

$$R_3 = \frac{R_{31} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}$$



$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}$$

$$R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}$$

$$R_{31} = R_1 + R_3 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}$$

Метод наложения — расчёт токов (напряжений) ветвей линейной электрической цепи с источниками напряжения и тока. Основан на определении частичных токов (напряжений) при поочерёдном действии ЭДС E_k и токов J_k источников энергии и последующим алгебраическим сложением полученных частичных токов I'_k (напряжений U'_k) в каждой ветви

$$I_k = \sum_{m+n} I'_k \quad \text{и} \quad U_k = \sum_{m+n} U'_k,$$

где m и n — число источников соответственно напряжения и тока.

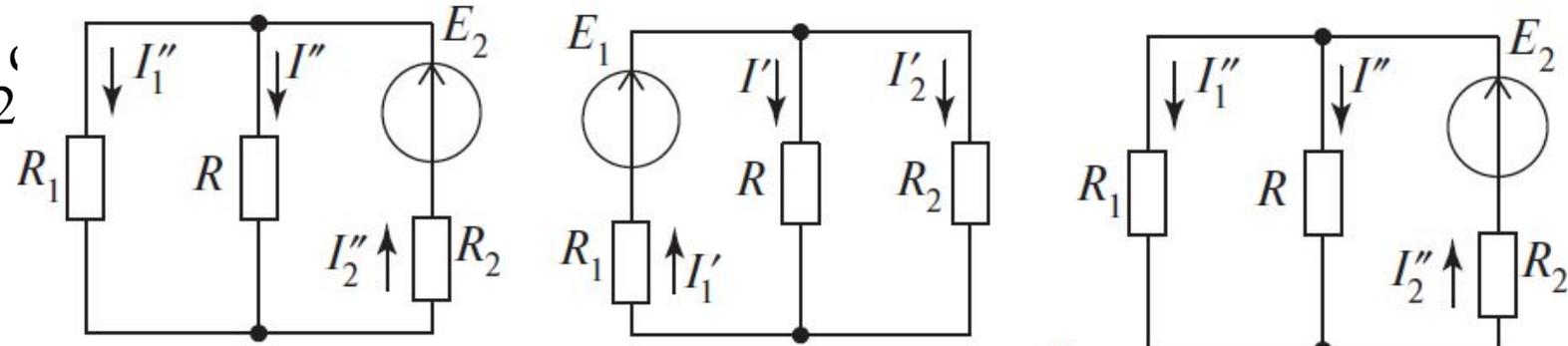
Внимание! При определении частичных токов (напряжений) ветвей от действия тока J_k или ЭДС E_k k -го источника энергии, ветви с другими ИТ разрывают, идеальные ИН замыкают накоротко, а их внутренние сопротивления сохраняют.

Упражнение. Определить токи ветвей с параметрами: $E_1 = 12$ В, $E_2 = 5$ В, $R_1 = 2$ Ом, $R = 8$ Ом методом наложения.

Решение.

1. Выбираем произвольно направления токов I_1 , I и I_2 .

2. Вычерчиваем расчётную схему с одним ИН E_1 и определяем частичные токи от действия ЭДС E_1 :



$$R'_3 = R_1 + \frac{RR_2}{R + R_2} = 4 \text{ Ом}, \quad I'_1 = \frac{E_1}{R'_3} = 3 \text{ А},$$

$$I' = I'_1 \frac{R_2}{R + R_2} = 0,6 \text{ А}, \quad I'_2 = I'_1 \frac{R}{R + R_2} = 2,4 \text{ А}.$$

3. Вычерчиваем расчётную схему с ИН E_2 и находим частичные токи:

$$R''_3 = R_2 + \frac{RR_1}{R + R_1} = 3,85 \text{ Ом}, \quad I''_2 = \frac{E_2}{R''_3} = 1,3 \text{ А},$$

$$I'' = I''_2 \frac{R_1}{R + R_1} = 0,3 \text{ А}, \quad I''_1 = I''_2 - I'' = 1 \text{ А}.$$

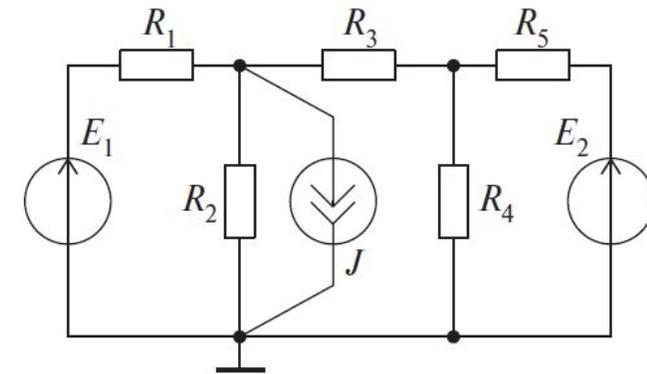
4. С учётом направлений частичных токов определяем токи в ветвях исходной электрической схемы:

$$I_1 = I'_1 - I''_1 = 3 - 1 = 2 \text{ А}, \quad I = I' + I'' = 0,6 + 0,3 = 0,9 \text{ А},$$

$$I_2 = -I'_2 + I''_2 = -2,4 + 1,3 = -1,1 \text{ А}.$$

Метод расчета, основанный на законах Кирхгофа числу ветвей в цепи ($N_{МЗК} = B$), в том числе, независимых уравнений по 1ЗК, на одно уравнение меньше числа узлов, т.е. $N_{1ЗК} = Y - 1$, а число независимых уравнений по 2ЗК — $N_{2ЗК} = B - (Y - 1)$, где B — число ветвей с неизвестными токами (без ветвей с источниками тока); Y — число узлов.

Упражнение. С помощью законов Кирхгофа составить необходимое число уравнений для определения токов ветвей схемы (рис.), если заданы ЭДС E_1 и E_2 источников напряжения, ток J источника тока и сопротивления R_1, \dots, R_5 резисторов.



Решение.

1. Проведем топологический анализ схемы для определения числа независимых уравнений. В схеме $B = 6$ ветвей, $Y = 3$ узла. Т.к. в ветви с ИТ ток J задан, число независимых ветвей $B = 5$.

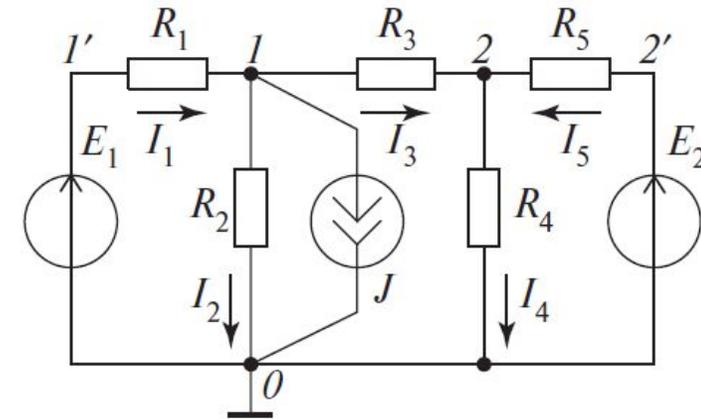
2. Пронумеруем узлы и выберем произвольно направления токов в ветвях

3. Составим уравнения по 1ЗК ($N_{1ЗК} = Y - 1 = 3 - 1 = 2$):

- для узла 1: $I_1 - I_2 - J - I_3 = 0$;
- для узла 2: $I_3 - I_4 + I_5 = 0$.

4. Выбираем независимые контуры и направление обхода контуров, например, по ходу часовой стрелки. Имеем три независимых контура

(ветвь с заданным током J ИТ в уравнениях, составленных по 2ЗК, не учитывается: $N_{2ЗК} = B - (Y - 1) = 3$).



5. Составим три уравнения по 2ЗК:

- для контура 1'-1-0-1': $E_1 = R_1 I_1 + R_2 I_2$;
- для контура 1-2-0-1: $0 = R_3 I_3 + R_4 I_4 - R_2 I_2$;
- для контура 2-2'-0-2: $-E_2 = -R_5 I_5 - R_4 I_4$.

6. Решив систему из пяти уравнений (методом Гаусса, Крамера), определим неизвестные токи ветвей

Метод узловых напряжений (МУН) базируется на первом законе Кирхгофа и обобщённом законе Ома, использует вспомогательные расчётные величины (узловые напряжения U_{k0} – напряжения между каждым k -м узлом схемы и базисным узлом с нулевым потенциалом уравнений для расчёта схемы по МУН:

$$N_{\text{МУН}} = Y - 1$$

Для каждого узла, кроме базисного, составляют уравнение по 1ЗК. В полученных уравнениях токи ветвей, присоединённых к базисному узлу, выражают через узловые напряжения и проводимости посредством обобщённого закона Ома:

$$I_k = \frac{E_k - U_{k0}}{R_k} = (E_k - U_{k0})G_k,$$

где $G_k = 1/R_k$ – проводимость k -й ветви.

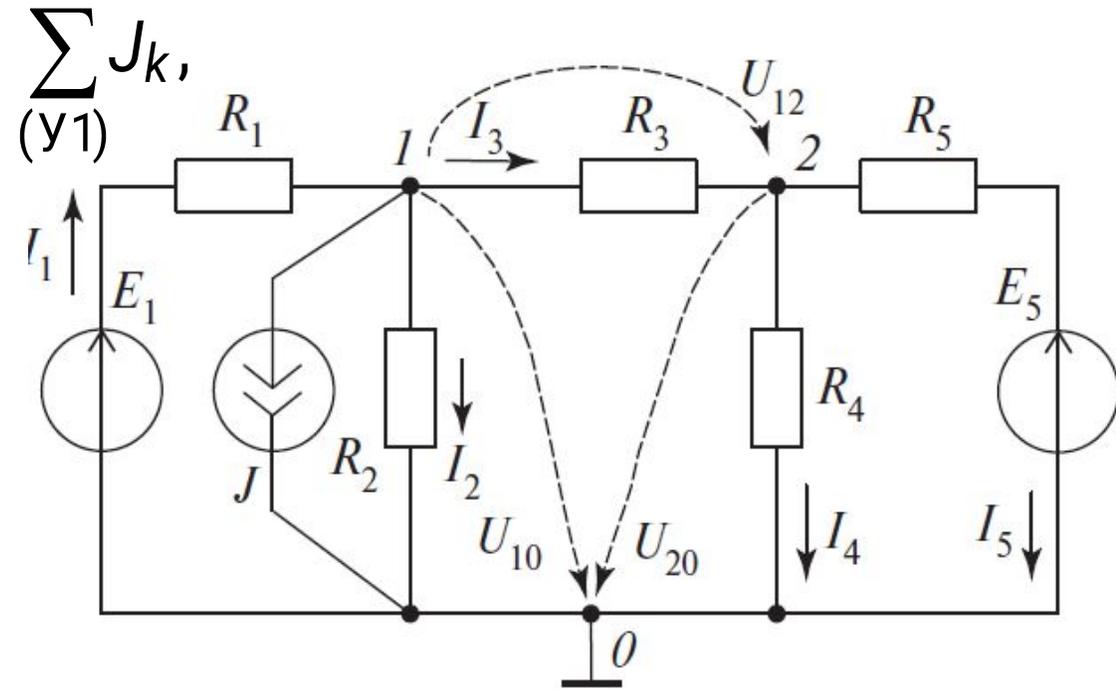
Ток в ветви, подключённой к узлам k и j : $I_{kj} = \frac{E_{kj} - U_{kj}}{R_{kj}} = (E_{kj} - U_{k0} + U_{j0})G_{kj}$,

где $U_{kj} = U_{k0} - U_{j0}$ – межузловое напряжение; $G_{kj} = 1/R_{kj}$ – межузловая проводимость

Структура каждого уравнения одинаковая, например, уравнение относительно узла 1:

$$G_{11}U_{10} - G_{12}U_{20} - \dots - G_{1n}U_{n0} = \sum_{(Y1)} E_k G_k - \sum_{(Y1)} J_k$$

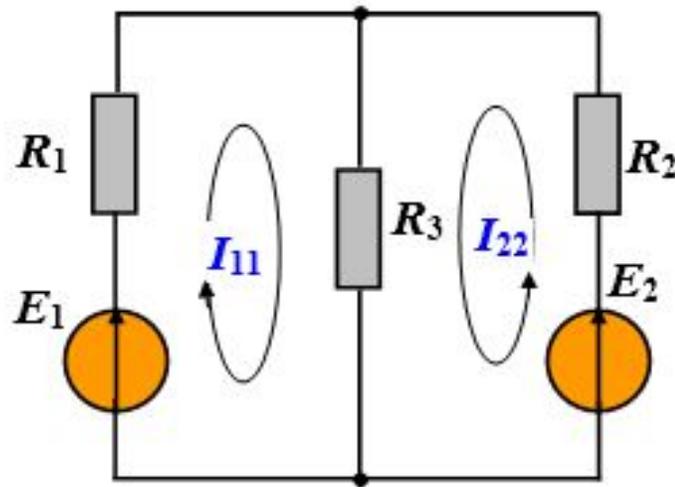
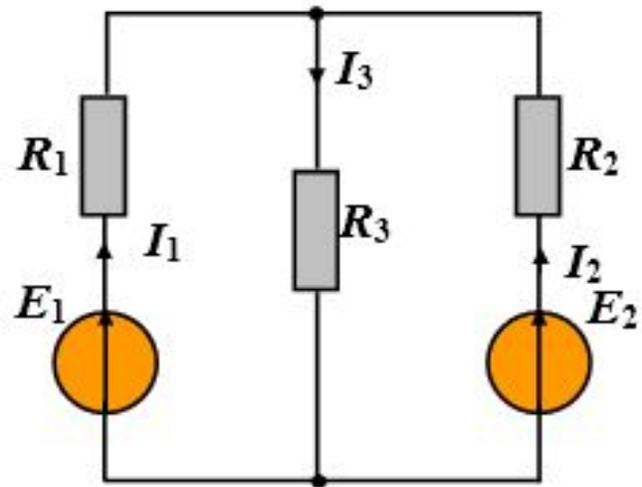
где $G_{11} = G_1 + G_2 + \dots + G_n$ — собственная проводимость узла 1, равная сумме проводимостей ветвей, присоединённых к узлу 1 (проводимости ветвей с ИТ не учитываются, так как $G_i = 1/R_i = 0$, ($R_i = \infty$); G_{12}, \dots, G_{1n} — межузловые проводимости;



$\sum_{(Y1)} E_k G_k + \sum_{(Y1)} J_k$ — узловой ток узла 1; $\sum_{(Y1)} E_k G_k$ — алгебраическая сумма произведений ЭДС ветвей, присоединённых к узлу 1, на проводимости этих ветвей, причём со знаком «+» («-») записывают произведения, если ЭДС направлена к узлу 1 (от узла 1);

$\sum_{(Y1)} J_k$ — алгебраическая сумма токов источников тока ветвей, подключённых к узлу 1, причём токи J_k записывают со знаком «+» («-»), если они направлены к узлу 1 (от узла 1). ¶

Метод контурных токов



По методу контурных токов записываются только уравнения 2-го закона Кирхгофа

В основе метода контурных токов лежат два положения:

- 1) в каждом независимом контуре цепи протекают независимые друг от друга токи, которые называются контурными токами;
- 2) составляются уравнения по второму закону Кирхгофа для независимых контуров, определяются контурные токи;
- 3) ток каждой ветви определяется как алгебраическая сумма контурных токов, замыкающихся через данную ветвь:

если направление контурного тока совпадает с направлением тока ветви, то он записывается со знаком плюс (+), если не совпадает — со знаком минус (-).

Необходимое для расчета цепи число уравнений по МКТ равно числу независимых контуров

$$N_{23K} = B - (Y - 1) = k_n.$$

Если схема содержит источники тока, число независимых уравнений уменьшится на число n ветвей с источниками тока:

$$N_{MKT} = N_{23K} = B - (Y - 1) - n,$$

так как контурный ток ячейки с ИТ известен и равен току источника тока.

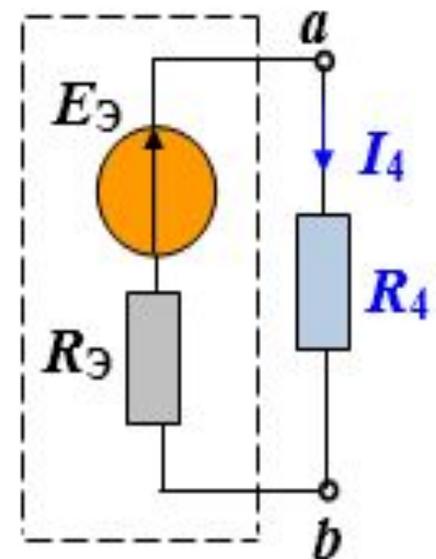
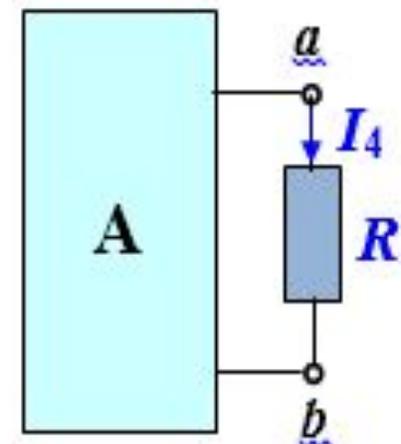
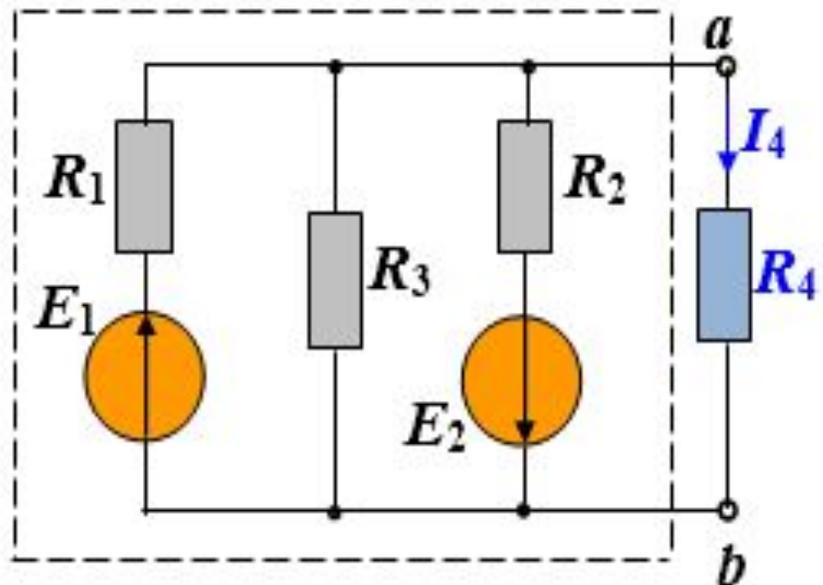
Метод эквивалентного генератора

(активного двухполюсника)

применяют для определения тока в одной ветви цепи.

Сущность метода: часть сложной электрической цепи с источниками электрической энергии и с двумя выделенными полюсами, за исключением рассматриваемой ветви, представляют активным двухполюсником.

Активным двухполюсником (А) называется любой фрагмент цепи, имеющий два полюса и содержащий ИЭЭ



Активный двухполюсник представляют эквивалентным источником ЭДС (эквивалентным генератором) с ЭДС E_3 и внутренним сопротивлением R_3 :

Метод расчёта, основанный на законе Ома

Упражнение. Найти токи ветвей схемы цепи с параметрами:

$E = 12 \text{ В}$, $R_{\text{вТ}} = 1 \text{ Ом}$, $R_1 = 4 \text{ Ом}$, $R_2 = R_3 = 6 \text{ Ом}$.

Решение.

1. Определяем эквивалентное сопротивление относительно зажимов ИН:

$$R = R_{\text{вТ}} + \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} = 1 + \frac{4 \cdot (6 + 6)}{4 + 6 + 6} = 4 \text{ Ом.}$$

2. Ток на входе цепи: $I = E/R = 12/4 = 3 \text{ А}$.

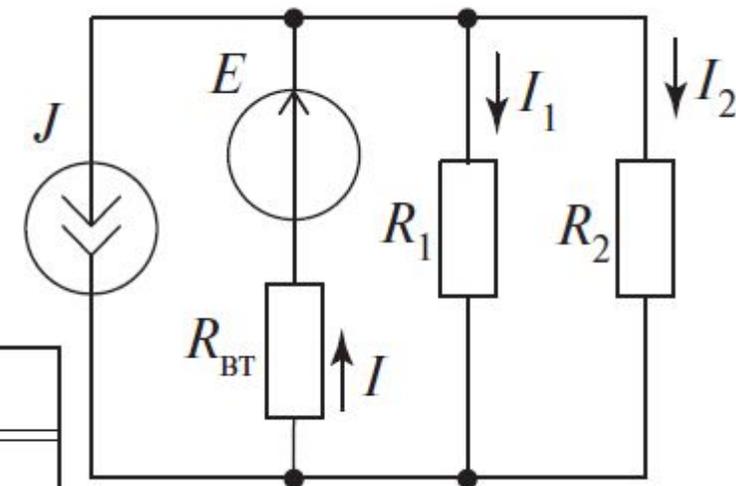
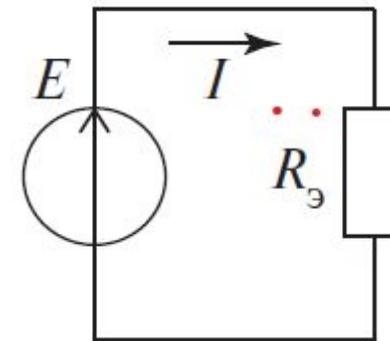
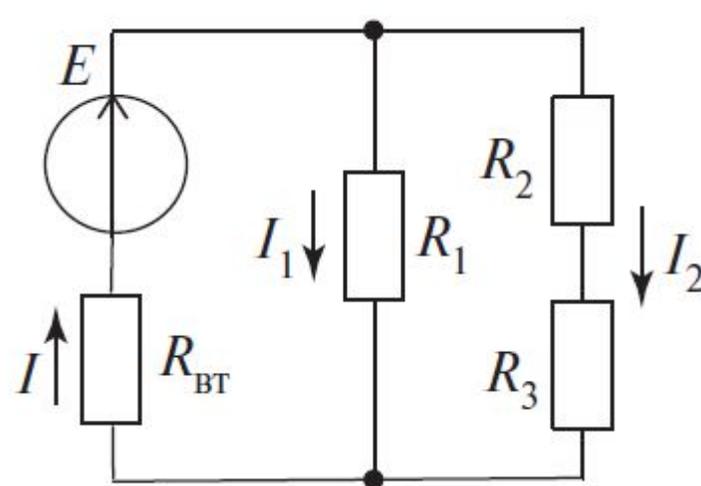
3. Согласно правилу делителя тока

$$I_1 = I \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = 3 \cdot \frac{6 + 6}{4 + 6 + 6} = 2,25 \text{ А,}$$

$$I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} = 3 \cdot \frac{4}{4 + 6 + 6} = 0,75 \text{ А.}$$

Задание. С помощью закона Ома рассчитать токи ветвей схемы цепи с параметрами: $J = 6 \text{ А}$, $E = 9 \text{ В}$, $R_{\text{вТ}} = 0,5 \text{ Ом}$, $R_1 = R_2 = 5 \text{ Ом}$.

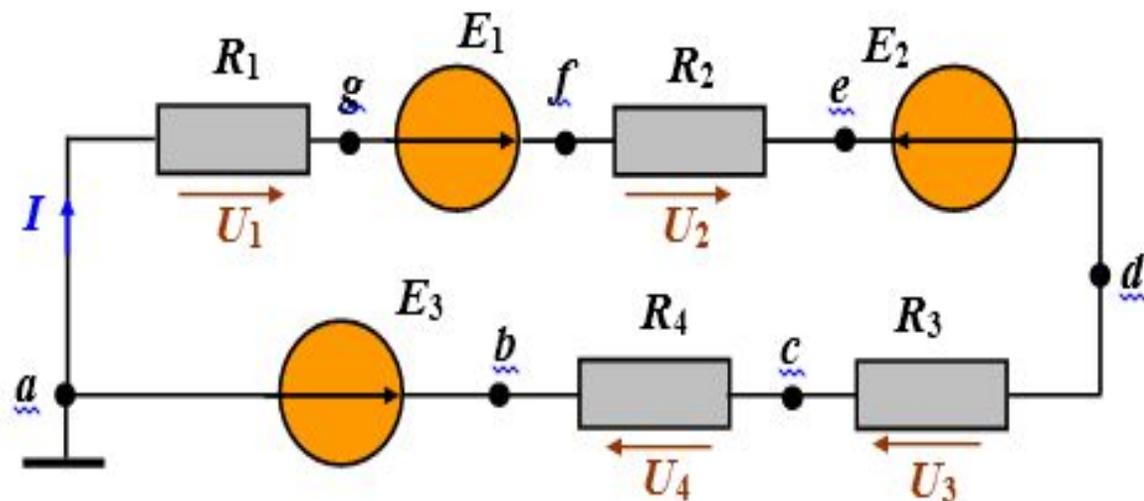
У к а з а н и е. Перенести ИТ с током J в ветвь с ИН.



$I, \text{ А}$	$I_1, \text{ А}$	$I_2, \text{ А}$
2	1	1

4. Потенциальная диаграмма

Потенциальной диаграммой называется графическое изображение распределения потенциалов различных точек цепи



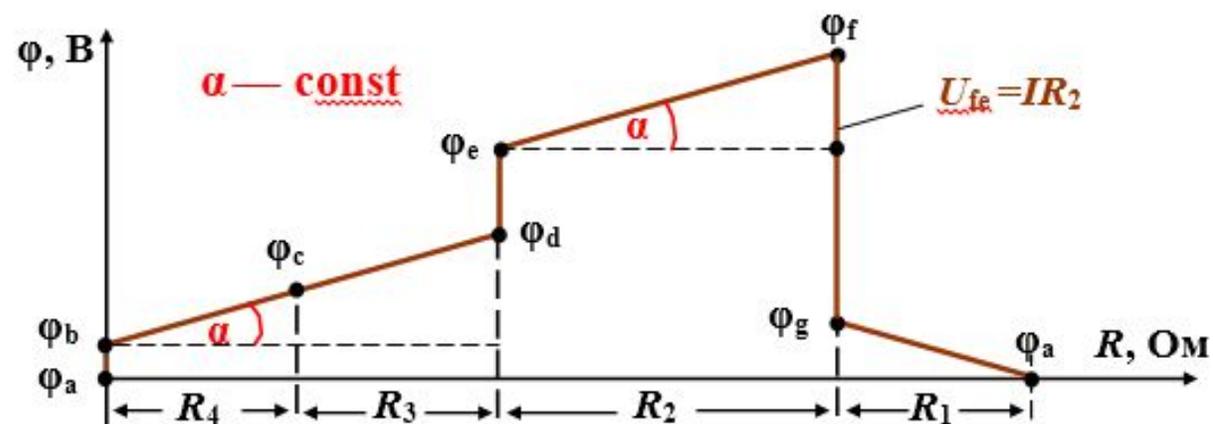
$$\varphi_a = 0$$

$$\varphi_b = \varphi_a + E_3; \quad \varphi_c = \varphi_b + IR_4; \quad \varphi_d = \varphi_c + IR_3;$$

$$\varphi_e = \varphi_d + E_2; \quad \varphi_f = \varphi_e + IR_2;$$

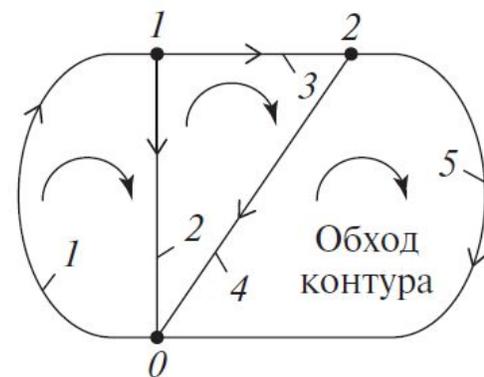
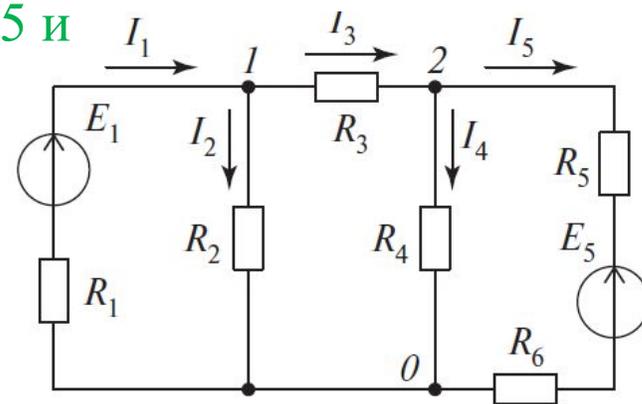
$$\varphi_g = \varphi_f - E_1; \quad \varphi_a = \varphi_g + IR_1 = 0.$$

При построении диаграммы по оси абсцисс последовательно откладываются сопротивления участков, а по оси ординат — рассчитанные потенциалы точек.



Применение матричной алгебры упростит запись уравнений при расчете сложных электро цепей. Матричные формы используют для формирования уравнений и численных расчётов на ЭВМ (методы расчета базируются на уравнениях Кирхгофа и понятиях топологии электросхем: узел, ветвь, контур).

Топологическую структуру цепи (с числом ветвей $V = 5$ и узлов $U = 3$) можно описать с помощью узловой и контурной матриц, изобразив направленный топологический граф схемы, в котором ветви представлены в виде линий, проведенных между точками-узлами. Ветвям графа приписывают направления, совпадающие с направлениями токов в ветвях и обозначаемые стрелками.



Узловая матрица $[A]$ представляет собой таблицу, строки которой соответствуют независимым узлам направленного графа цепи, а столбцы — ее ветвям. Если ветвь j связана с узлом k и направлена от узла, то ей присваивают значение $+1$, а если она направлена к узлу, то ей присваивают значение -1 , в случае, если она не связана с узлом k , то ей присваивают нулевое значение. При этом выбранный базисный узел (узел 0 ,) не входит в матрицу.

Номера ветвей →

$$[A] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Номера узлов ↑

Контурная матрица $[B]$ представляет собой таблицу, строки которой соответствуют независимым контурам цепи, а столбцы — ее ветвям. Элементы матрицы имеют следующие значения: если контур j содержит ветвь k и направление обхода контура совпадает с направлением ветви, то элемент матрицы имеет значение $+1$, а если ветвь направлена против обхода контура, то -1 , если ветвь не входит в контур, то ей присваивают нулевое значение.

Номера ветвей →

$$[B] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Номера контуров ↑

Законы Кирхгофа в матричной форме

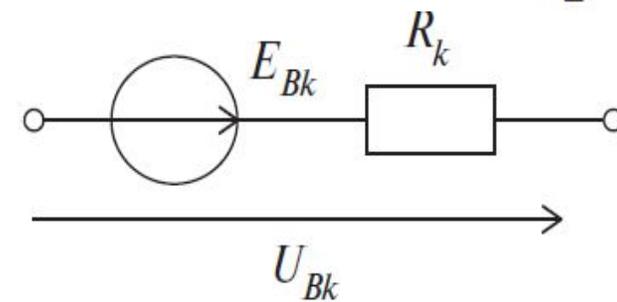
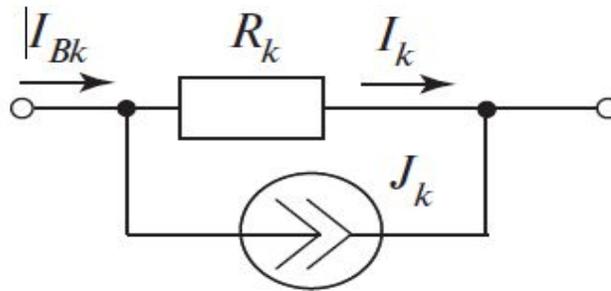
При составлении уравнений Кирхгофа в матричной форме токи I_{Bk} и напряжения U_{Bk} ветвей записывают в виде столбцов (столбцовых матриц-векторов).

При записи векторов $[I_B]$ и $[U_B]$ непосредственно по виду схемы цепи необходимо учитывать следующее:

- число элементов в матричных столбцах $[I_B]$ и $[U_B]$ равно числу ветвей;
- матрица-столбец токов ветвей $[I_B]$ учитывает наличие источников тока, т.е. ток ветви $I_{Bk} = I_k \pm J_k$, причем J_k записывают со знаком «плюс», если направления тока J_k и тока ветви I_k совпадают, и со знаком «минус» — в противоположном случае;
- матрица-столбец напряжений ветвей $[U_B]$ учитывает наличие в ветвях источников напряжения: $U_{Bk} = R_k I_k \pm E_{Bk}$, причем суммарную ЭДС ветви E_{Bk} записывают со знаком «плюс», если направления этой ЭДС и тока ветви не совпадают, со знаком «минус» — в другом случае

$$\begin{array}{l} \text{Номера} \\ \text{ветвей} \\ \downarrow \\ 1 \\ 2 \\ \vdots \\ n \end{array} \begin{bmatrix} I_{B1} \\ I_{B2} \\ \vdots \\ I_{Bn} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Номера} \\ \text{ветвей} \\ \downarrow \\ 1 \\ 2 \\ \vdots \\ n \end{array} \begin{bmatrix} U_{B1} \\ U_{B2} \\ \vdots \\ U_{Bn} \end{bmatrix}$$

$[I_B] =$ $[U_B] =$



Первый закон Кирхгофа в матричной форме. Так как элементы строки узловой матрицы $[A]$ содержат сведения о ветвях, связанных с узлами цепи, и отражают направления токов ветвей к этим узлам, то сумма произведений элементов каждой строки на токи соответствующих ветвей представляет *первый закон Кирхгофа* в матричной форме: $[A][I_B] = \mathbf{0}$.

Второй закон Кирхгофа в матричной форме. Так как элементы строки контурной матрицы $[B]$ содержат сведения о ветвях, связанных с контурами цепей, и отражают направления напряжений (совпадающие с направлениями токов) на этих ветвях, то сумма произведений прямоугольной матрицы $[B]$ на напряжения ветвей представляет собой *второй закон Кирхгофа* в матричной форме: $[B][U_B] = \mathbf{0}$.

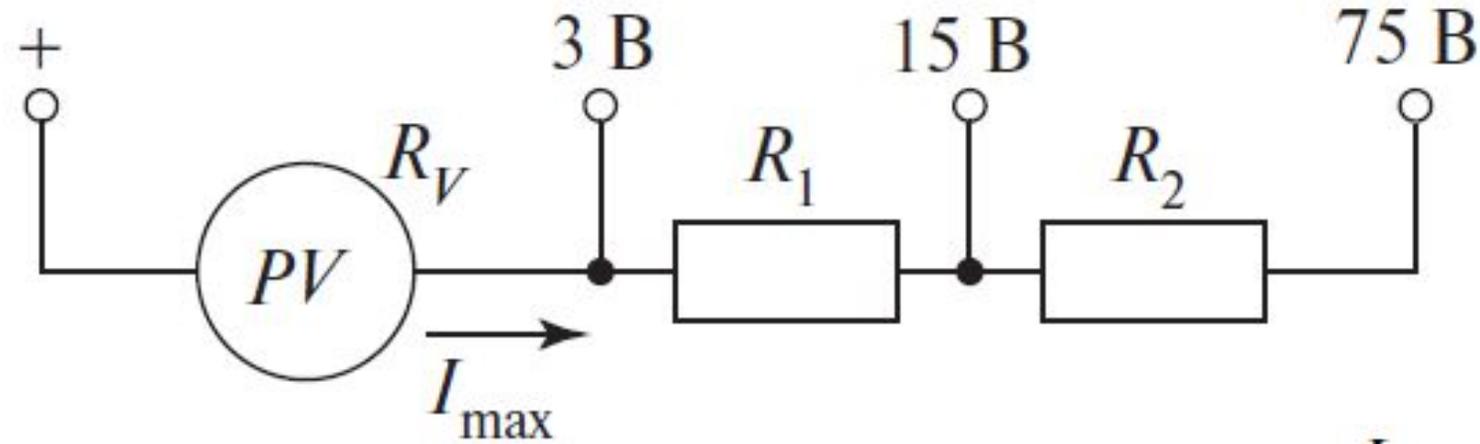
Баланс мощностей цепи постоянного тока

Для любой, сколько угодно сложной цепи постоянного тока, можно составить энергетический баланс, вытекающий непосредственно из закона сохранения энергии: *алгебраическая сумма всех мощностей источников энергии равна сумме всех мощностей приемников энергии:*

$$\sum_k^K E_k I_k = \sum_{n=1}^N I_n^2 R_n$$

K - число источников энергии цепи; N – число приемников энергии цепи

Упражнение. Вольтметр PV на номинальное напряжение 3 В имеет внутреннее сопротивление $R_V = 400$ Ом. Определить сопротивления добавочных резисторов R_1 и R_2 которые нужно подключить к вольтметру PV , чтобы расширить пределы измерения до 15 В и 75 В.



Решение.

1. Максимальный ток (ток полного отклонения стрелки) в обмотке вольтметра PV :

$$I_{\max} = \frac{3}{400} = 0,0075 \text{ А} = 7,5 \text{ мА.}$$

2. Суммарное сопротивление ветви при напряжении $U = 75$ В:

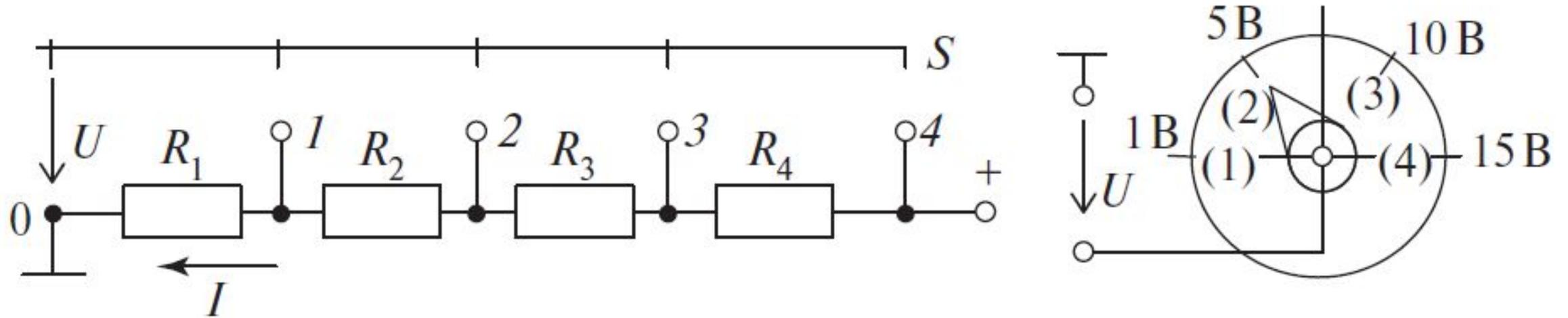
$$R_{75} = \frac{75}{I_{\max}} = \frac{75}{0,0075} = 10\,000 \text{ Ом} = 10 \text{ кОм.}$$

3. Сопротивления резисторов:

$$R_1 = \frac{15 - 3}{I_{\max}} = \frac{12}{0,0075} = 1600 \text{ Ом} = 1,6 \text{ кОм,}$$

$$R_2 = R_{75} - R_1 - R_V = 10 - 1,6 - 0,4 = 8 \text{ кОм.}$$

Задание. Рассчитать сопротивления R_1, \dots, R_4 резисторов аттенюатора (делителя напряжения, рис. 1.49), имеющего четыре положения переключателя S , чтобы иметь на выходе следующие уровни напряжения: 1 В, 5 В, 10 В и 15 В. Стабилизированное значение тока $I = 1$ А.



$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$R_4, \text{ Ом}$
1 Ом	4 Ом	5 Ом	50 Ом

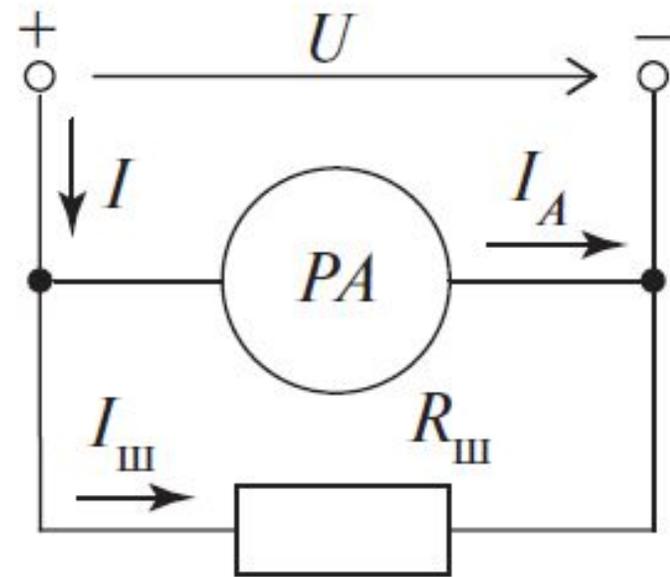
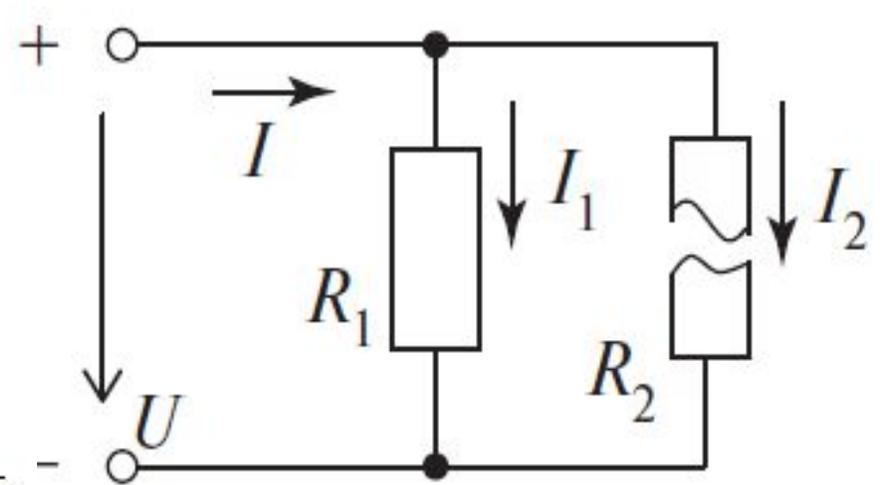
Упражнение. Для цепи, ток на входе которой $I = 5$ А, сопротивление резистора $R_1 = 4$ Ом, определить сопротивление R_2 «перегоревшего» нагревательного элемента, ток которого I_2 был равен 1 А.

Решение.

1. Согласно правилу делителя тока: $I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}$.

2. Сопротивление $R_2 = R_1 \frac{I - I_2}{I_2} = 4 \frac{5 - 1}{1} = 16$ Ом.

Задание. Миллиамперметр РА на номинальный ток $I_A = 30$ мА имеет номинальное падение напряжения $U = 75$ мВ (рис. 1.52). Определить сопротивление $R_{ш}$ добавочного резистора (шунта), который нужно включить параллельно прибору для расширения предела измерения по току до $I = 3$ А, и занести его значение в выделенное поле



$$R_{ш} = 0,0253 \text{ Ом}$$

Упражнение. Пользуясь методом узловых напряжений, определить токи ветвей схемы, если $E_1 = 12 \text{ В}$, $E_5 = 15 \text{ В}$, $J = 2 \text{ А}$, $R_1 = 1 \text{ Ом}$, $R_2 = 5 \text{ Ом}$, $R_3 = R_4 = 10 \text{ Ом}$, $R_5 = 1 \text{ Ом}$. В схеме 6 ветвей и 3 узла.

Решение.

1. Выбираем базисный узел 0 и направления узловых напряжений U_{10} и U_{20} от узлов 1 и 2 к базисному

2. Составляем ($N_{\text{МУН}} = Y - 1 = 3 - 1 = 2$) уравнения по МУН:

• для узла 1

$$G_{11} U_{10} - G_{12} U_{20} = E_1 G_1 - J;$$

• для узла 2

$$-G_{21} U_{10} + G_{22} U_{20} = E_5 G_5;$$

где $G_{11} = G_1 + G_2 + G_3$, $G_{12} = G_3 = 1/R_3$,

$$G_{22} = G_3 + G_4 + G_5, \quad G_{21} = G_{12} = G_3.$$

3. После подстановки числовых значений ($G_1 = 1/R_1 = 1 \text{ См}$, $G_2 =$

$0,2 \text{ См}$, $G_3 = G_4 = 0,1 \text{ См}$, $G_5 = 1 \text{ См}$) имеем

$$1,3 U_{10} - 0,1 U_{20} = 12 - 2 = 10,$$

$$-0,1 U_{10} + 1,2 U_{20} = 15.$$

5. Межузловое напряжение

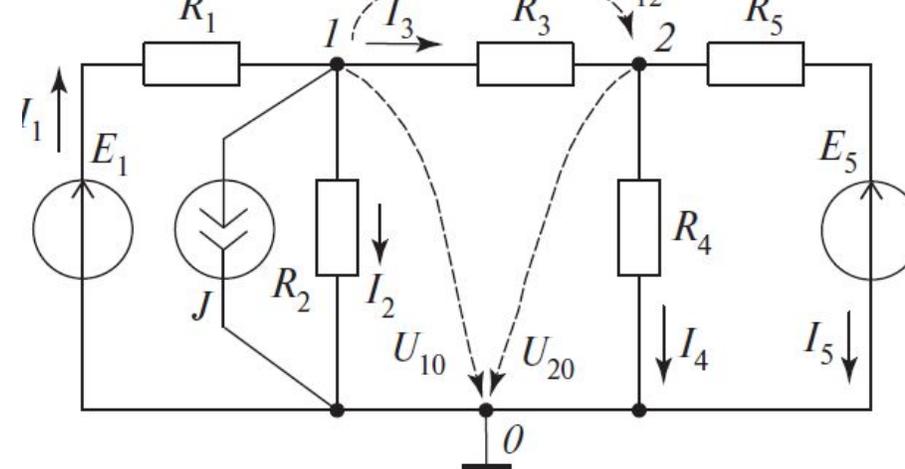
$$U_{12} = U_{10} - U_{20} = 8,7097 - 13,226 = -4,5163 \text{ В}.$$

6. Искомые токи ветвей (см. выбранные направления токов ветвей на схеме):

$$I_1 = (E_1 - U_{10}) G_1 = 3,29 \text{ А}, \quad I_2 = U_{10} G_2 = 1,754 \text{ А},$$

$$I_3 = U_{12} G_3 = -0,452 \text{ А}, \quad I_4 = U_{20} G_4 = 1,323 \text{ А},$$

$$I_5 = (-E_5 + U_{20}) G_5 = -1,774 \text{ А}.$$



4. Воспользовавшись формулами Крамера, находим узловые напряжения

$$U_{10} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} 10 & -0,1 \\ 15 & 1,2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1,3 & -0,1 \\ -0,1 & 1,2 \end{vmatrix}} = \frac{13,5}{1,55} = 8,7097 \text{ В},$$

$$U_{20} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{\begin{vmatrix} 1,3 & 10 \\ -0,1 & 15 \end{vmatrix}}{1,55} = \frac{20,5}{1,55} = 13,226 \text{ В}.$$

Пр и м е ч а н и е. Вычисление узловых напряжений нужно проводить с большой точностью. В данном примере достаточно округлить четвёртый знак после запятой.

7. Проверим результаты расчета токов. Согласно 1ЗК для узла 2

$$\sum_{y2} I_k = I_3 - I_4 - I_5 = -0,452 - 1,323 + 1,774 = 0.$$

Упражнение. Методом контурных токов найти токи ветвей схемы цепи с параметрами $E_1 = 100 \text{ В}$, $E_2 = 30 \text{ В}$, $E_3 = 10 \text{ В}$, $E_4 = 6 \text{ В}$,

$R_1 = R_3 = 10 \text{ Ом}$, $R_4 = 7 \text{ Ом}$, $R_5 = 5 \text{ Ом}$, $R_6 = 15 \text{ Ом}$. В схеме ветвей $V = 6$, узлов

Решение.

1. Выбираем направления контурных токов I_{K1} , I_{K2} , I_{K3} по ходу часовой стрелки.

2. Составим систему уравнений для контуров, в которых алгебраическая сумма ЭДС (контурная ЭДС) равна произведению контурного тока данной ячейки на сумму всех сопротивлений ячейки, минус произведения контурных токов соседних ячеек на соответствующие сопротивления *общих* ветвей.

Число уравнений по МКТ: $MMKT = V - (Y - 1) = 6 - (4 - 1) = 3$,

$$E_1 - E_2 - E_3 = (R_1 + R_2)IK_1 - R_2IK_2,$$

$$E_2 - E_4 = (R_2 + R_5 + R_4)IK_2 - R_4IK_3 - R_2IK_1,$$

$$E_3 + E_4 = (R_6 + R_4)IK_3 - R_4IK_2.$$

4. Решив эту систему, найдем контурные токи:

$$IK_1 = 5 \text{ А}, IK_2 = 4 \text{ А}, IK_3 = 2 \text{ А}.$$

5. Токи ветвей определим, руководствуясь выбранными направлениями токов ветвей и правилами:

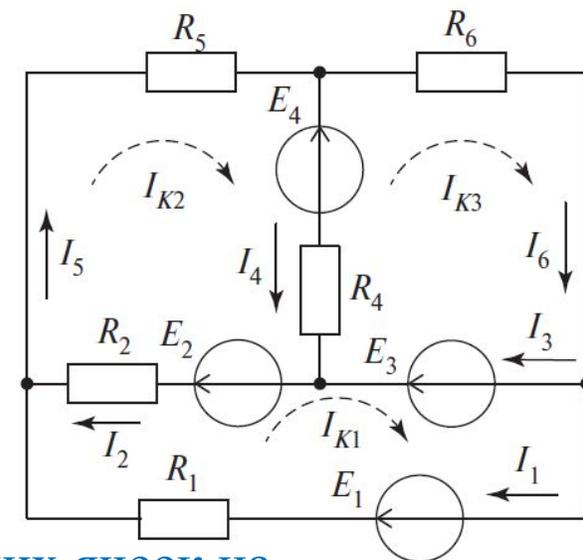
• токи наружных (не имеющих соседних контуров) ветвей равны соответствующим контурным токам;

• токи общих ветвей равны разности контурных токов соседних контуров-ячеек:

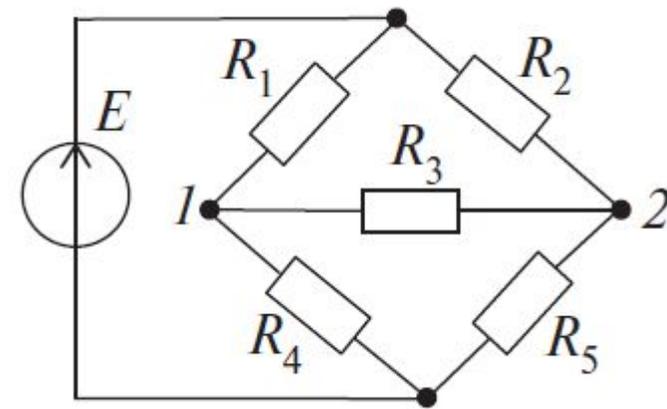
$$I_1 = IK_1 = 5 \text{ А}, I_5 = IK_2 = 4 \text{ А},$$

$$I_6 = IK_3 = 2 \text{ А}, I_2 = IK_1 - IK_2 = 5 - 4 = 1 \text{ А},$$

$$I_4 = IK_2 - IK_3 = 4 - 2 = 2 \text{ А}, I_3 = IK_1 - IK_3 = 5 - 2 = 3 \text{ А}.$$



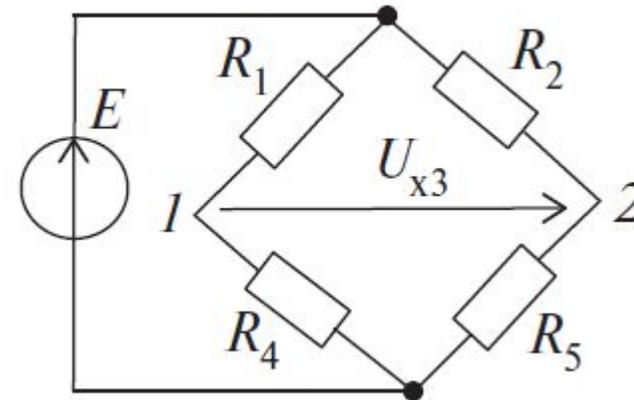
Упражнение. Определить ток I_3 диагональной ветви схемы



Решение.

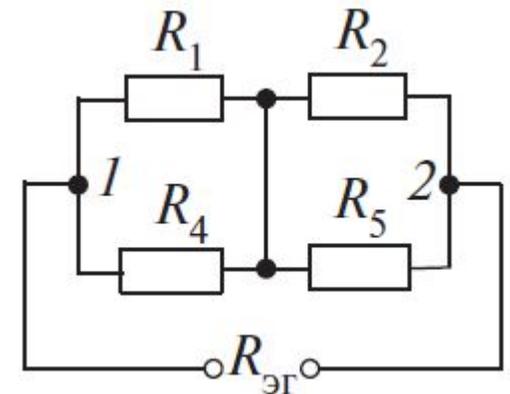
1. Разомкнём ветвь R_3 и определим напряжение $U_{x3} = E_{\text{ЭГ}}$ между узлами 1 и 2 , например, как разность напряжений участках R_4 и R_5

$$U_{x12} = U_{x3} = \frac{E}{R_1 + R_4} R_4 - \frac{E}{R_2 + R_5} R_5.$$



2. Сопротивление $R_{\text{ЭГ}}$ между узлами 1 и 2 определим при $E = 0$ и замкнутой ветви R_3

$$R_{\text{ЭГ}} = \frac{R_1 R_4}{R_1 + R_4} + \frac{R_2 R_5}{R_2 + R_5}.$$



3. Ток в третьей ветви

$$I_3 = \frac{E_{\text{ЭГ}}}{R_{\text{ЭГ}} + R_3} = \frac{U_{x3}}{R_{\text{ЭГ}} + R_3}.$$

1. Определите понятия «электрическая цепь», «электрическая схема», «ветвь», «узел», «соединение (устраняемый узел)», «контур».
2. Дайте определения электрических токов: проводимости, переноса, смещения и полного.
3. Что положено в основу определения:
 - а) напряжённости электрического поля ;
 - б) электрического напряжения U ? Каковы единицы их измерения? Как связаны электрический потенциал j и напряжённость?
4. Как выбирают положительные направления для токов в пассивных элементах схем замещения и как связаны с ними положительные направления напряжений на выводах этих элементов?
5. Какие функции выполняет резистор как элемент схемы замещения реальной электрической цепи ? Запишите компонентное уравнение резистора.
6. Дайте определение понятия «индуктивная катушка». Запишите компонентное уравнение идеализированной индуктивной катушки.
7. Прокомментируйте три способа определения индуктивности L :
8. Дайте определение понятия «конденсатор». От каких параметров зависит ёмкость конденсатора? Запишите компонентное уравнение конденсатора.
9. Прокомментируйте три способа определения ёмкости C конденсатора:
 $C = q/uC$; $C = i/(duC/dt)$; $C = 2WC / (uC * uC)$.
10. Выразите 4,7 кОм; 0,4 мГн и 0,1 нФ соответственно в омах, в генри и в фарадах.
11. Какие схемы электрической цепи вы знаете ? Приведите примеры простейших схем.
12. Дайте определения:
 - а) «пассивный элемент электрической цепи»;
 - б) «активный элемент электрической цепи».Приведите классификацию:
 - а) пассивных элементов;
 - б) активных элементов.
13. Изобразите характеристики: а) линейного и нелинейного резисторов; б) линейного и нелинейного конденсаторов; в) линейной и нелинейной катушек индуктивности. Постройте соответствующие им зависимости $R = u/i = f(i)$, $C = q/u = f(u)$, $L = \Psi/i = f(i)$.

14. Изобразите характеристики:

- а) линейного резистора;
- б) линейного источника напряжения;
- в) линейного источника тока.

15. Изобразите ВАХ:

- а) независимых реального, идеализированного и идеального ИН;
- б) независимых реального, идеализированного и идеального ИТ.

16. Чему равно:

- а) внутреннее сопротивление идеального источника напряжения;
- б) внутренняя проводимость идеального источника тока?

17. Какому режиму работы ИН соответствует точка пересечения его внешней характеристики с осью:

- а) абсцисс;
- б) ординат?

18. Запишите уравнения внешних характеристик:

- а) независимого источника напряжения;
- б) независимого источника тока.

19. Нарисуйте ВАХ реального, идеализированного и идеального зависимого:

- а) источника напряжения;
- б) источника тока.

20. Источник напряжения преобразовывают в источник тока. Запишите формулы для определения параметров ИТ.

21. Источник тока преобразовывают в источник напряжения. Запишите формулы для определения параметров ИН.

22. Проверьте уровень усвоения Вами учебного материала темы 1, воспользовавшись программой тестирования УТИС