

ЛЕКЦИЯ №2

По дисциплине:

«Электроника и электротехника»

Тема №:2

Электрические цепи постоянного тока

Занятие №:2

Электрическая цепь

Учебные вопросы:

1. Электрическая цепь и ее элементы.
2. Топологические характеристики электрических цепей.
Законы электрических цепей постоянного тока.

Литература для самостоятельной работы обучающихся:

1. Иванов, И. И. Электротехника и основы электроники: учебник. – 9-е изд., стер/ И.И. Иванов, Г.И. Соловьев, В.Я Фролов. – СПб: Лань, 2017. – 736 с.

2. Касаткин, А.С. Электротехника: учебник/ А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 12-е изд. стер. – Москва.: Академия, 2008. – 544 с. – и предыдущие издания.

б) дополнительная литература:

3. Немцов, М. В. Электротехника и электроника: учебник/ М. В. Немцов. – Москва: КноРус, 2016. – 560 с. – и предыдущие издания.

Введение

Электромагнитные процессы, протекающие в электротехнических устройствах, как правило, достаточно сложны. Однако во многих случаях, их основные характеристики можно описать с помощью таких интегральных понятий, как: напряжение, ток, электродвижущая сила (ЭДС), которые были рассмотрены в предыдущей лекции. При таком подходе совокупность электротехнических устройств, состоящую из соответствующим образом соединенных источников и приемников электрической энергии, предназначенных для генерации, передачи, распределения и преобразования электрической энергии и (или) информации, рассматривают как **электрическую цепь**. Электрическая цепь состоит из отдельных частей (объектов), выполняющих определенные функции и называемых **элементами цепи**.

1-й учебный вопрос: Электрическая цепь и ее элементы

Электрическая цепь – совокупность соединенных проводами элементов, образующих путь для электрического тока при условии, что электромагнитные процессы могут быть описаны с помощью понятий о токе, ЭДС и напряжении.

Элемент электрической цепи – отдельное устройство, входящее в состав цепи и выполняющее в ней определенную функцию (резистор, катушка индуктивности, конденсатор, источник тока и ЭДС.)

Электрическая цепь постоянного тока в общем случае содержит источник электрической энергии, приемники электрической энергии, измерительные приборы, коммутационную аппаратуру, соединительные линии и провода.

Основными элементами цепи являются источники и приемники электрической энергии (сигналов).

Источник электрической энергии (генератор) – устройство в котором осуществляется преобразование в электрическую энергию каких-либо других форм энергии (например, энергии химических процессов в гальванических элементах и аккумуляторах, тепловой энергии в термопреобразователях на основе термопар, механической энергии в генераторах)

Приемник электрической энергии – устройство в котором электрическая энергия преобразуется в другие формы энергии (например в механическую – двигатели постоянного тока, тепловую – электрические печи, нагревательные устройства, химическую – электролизные ванны, световую и тепловую в источниках света)

У каждого элемента цепи можно выделить определенное число зажимов (**полюсов**), с помощью которых он соединяется с другими элементами. Различают **двух** – и **многополюсные** элементы. Двухполюсники имеют два зажима. К ним относятся источники энергии (за исключением управляемых и многофазных), резисторы, катушки индуктивности,

конденсаторы. Многополюсные элементы – это, например, триоды, трансформаторы, усилители и т.д.

Все элементы электрической цепи условно можно разделить на **активные** и **пассивные**. **Активным** называется элемент, содержащий в своей структуре источник электрической энергии.

К **пассивным** относятся элементы, в которых рассеивается (резисторы) или накапливается (катушка индуктивности и конденсаторы) энергия.

К основным характеристикам элементов цепи относятся их вольт-амперные, вебер-амперные и кулон-вольтные характеристики, описываемые дифференциальными или (и) алгебраическими уравнениями. Если элементы описываются линейными дифференциальными или алгебраическими уравнениями, то они называются **линейными**, в противном случае они относятся к классу **нелинейных**. Строго говоря, все элементы являются нелинейными. Возможность рассмотрения их как линейных, что существенно упрощает математическое описание и анализ процессов, определяется границами изменения характеризующих их переменных и их частот. Коэффициенты, связывающие переменные, их производные и интегралы в этих уравнениях, называются **параметрами** элемента.

Если параметры элемента не являются функциями пространственных координат, определяющих его геометрические размеры, то он называется **элементом с сосредоточенными параметрами**. Если элемент описывается уравнениями, в которые входят пространственные переменные, то он относится к классу **элементов с распределенными параметрами**. Классическим примером последних является линия передачи электроэнергии (длинная линия).

Цепи, содержащие только линейные элементы, называются **линейными**. Наличие в схеме хотя бы одного нелинейного элемента относит ее к классу нелинейных.

Рассмотрим пассивные элементы цепи, их основные характеристики и параметры.

1. Резистивный элемент (резистор) R

Условное графическое изображение резистора приведено имеет вид

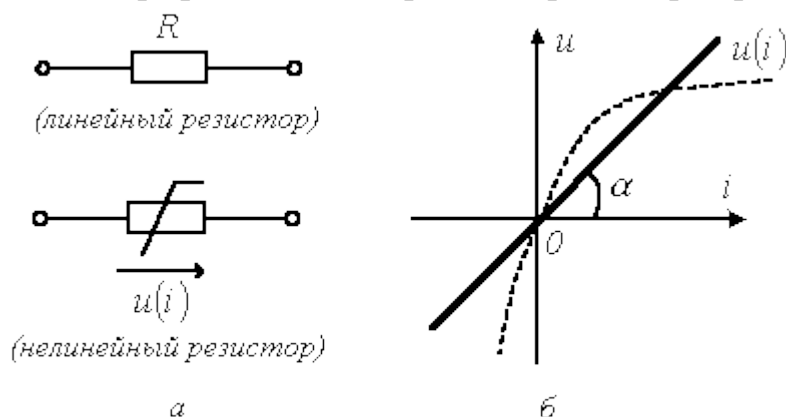


Рис.1

Резистор – это пассивный элемент, характеризующийся резистивным сопротивлением R .

Основной характеристикой резистивного элемента является зависимость $u(i)$, называемая вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Если зависимость $u(i)$ представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат (см. рис. 1,б сплошная линия), то резистор называется линейным и описывается соотношением $u = R \cdot i$

Резистивный элемент ВАХ которого нелинейна (рис 1,б пунктирная линия) называется нелинейным.

2. Индуктивный элемент (катушка индуктивности) L

Условное графическое изображение катушки индуктивности приведено на рис. 2,а. Катушка – это пассивный элемент, характеризующийся индуктивностью L . Для расчета индуктивности катушки необходимо рассчитать созданное ею магнитное поле.

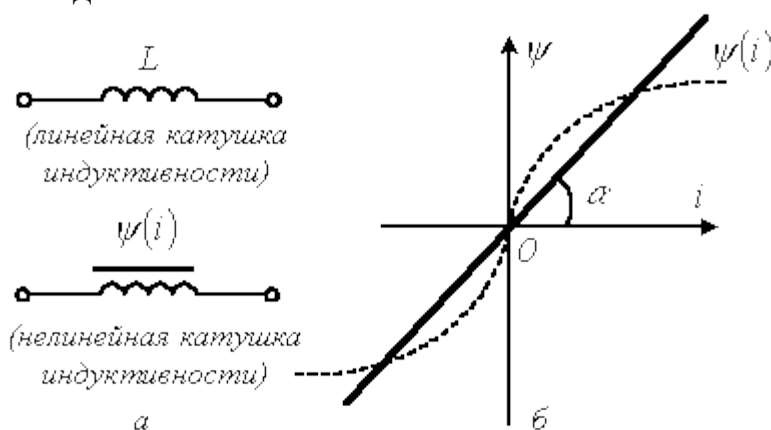


Рис.2

Индуктивность определяется отношением потокосцепления к току, протекающему по виткам катушки

$$L = \frac{\Psi}{i}, [L]=1 \text{ Генри}=1 \text{ Гн}$$

В свою очередь потокосцепление Ψ равно сумме произведений потока, пронизывающего витки, на число этих витков

$$\Psi = \sum w_k \Phi_k, \Phi_k = \int_{S_k} \vec{B} \cdot \vec{dS}$$

Основной характеристикой катушки индуктивности является зависимость $\Psi(i)$, называемая вебер-амперной характеристикой. Для линейных катушек индуктивности зависимость $\Psi(i)$ представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат (см. рис. 2,б).

Нелинейные свойства катушки индуктивности (см. кривую $\Psi(i)$ на рис. 2,б) определяет наличие у нее сердечника из ферромагнитного материала, для которого зависимость $B(H) = \mu\mu_0 H$ магнитной индукции от напряженности магнитного поля нелинейна.

3. Емкостный элемент (конденсатор) С

Условное графическое изображение конденсатора приведено на рис.

3,а.

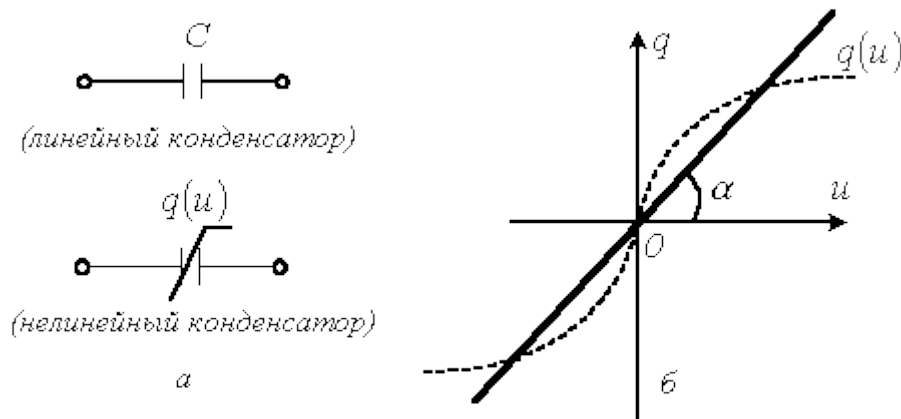


Рис.3

Конденсатор – это пассивный элемент, характеризующийся емкостью C . Для расчета последней необходимо рассчитать электрическое поле в конденсаторе. Емкость определяется отношением заряда q на обкладках конденсатора к напряжению u между ними

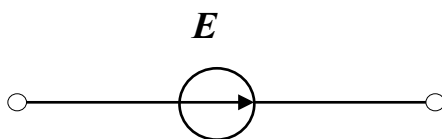
$$C = \frac{q}{u}, [C]=1 \text{ Фарада}=1 \text{ Ф}$$

Емкость конденсатора зависит от геометрии обкладок и свойств диэлектрика, находящегося между ними. Большинство диэлектриков, используемых на практике, линейны, т.е. у них относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = \text{const}$. В этом случае зависимость $q(u)$ представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат, (см. рис. 3,б).

У нелинейных диэлектриков (сегнетоэлектриков) диэлектрическая проницаемость является функцией напряженности поля, что обуславливает нелинейность зависимости $q(u)$ (рис. 3,б).

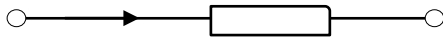
Активные элементы электрической цепи

Идеальным источником ЭДС называется источник электрической энергии, напряжение на зажимах которого не зависит от протекающего через него тока, внутреннее сопротивление $r = 0$.

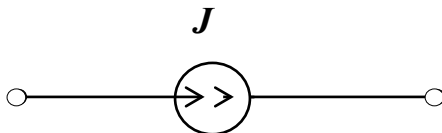


Реальный источник ЭДС характеризуется наличием определенного внутреннего сопротивления r .

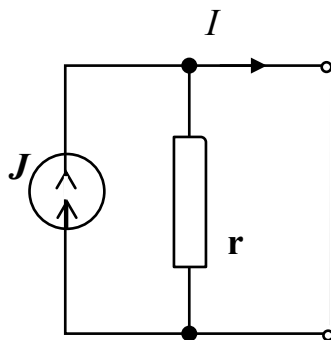




Идеальный источник тока – это источник электрической энергии, ток которого не зависит от напряжения на его зажимах, внутреннее сопротивление $r = \infty$.



Реальный источник тока характеризуется конечным внутренним сопротивлением r .



Условия эквивалентности источника э.д.с. и источника тока

При расчете и анализе электрических цепей реальный источник электрической энергии с конечным значением величины внутреннего сопротивления r_0 заменяют расчетным эквивалентным источником ЭДС или источником тока.

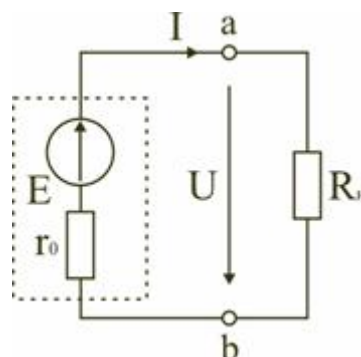


Рис. 4

Источник э.д.с. (рис. 3) имеет внутреннее сопротивление r_0 , равное внутреннему сопротивлению реального источника. Стрелка в кружке указывает направление возрастания потенциала внутри источника ЭДС.

Для данной цепи $E = U + Ir_0$ или $E = U - Ir_0$.

Эта зависимость напряжения U на зажимах реального источника от тока I определяется его вольт-амперной или внешней характеристикой

(рис. 5). Уменьшение напряжения источника U при увеличении тока нагрузки I объясняется падением напряжения $\Delta U = Ir_0$ на его внутреннем сопротивлении r_0 .

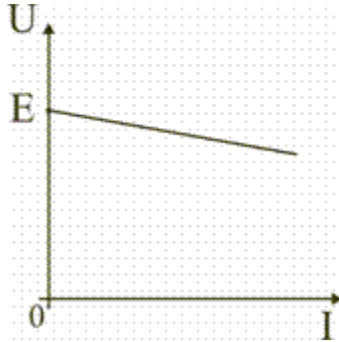


Рис. 5

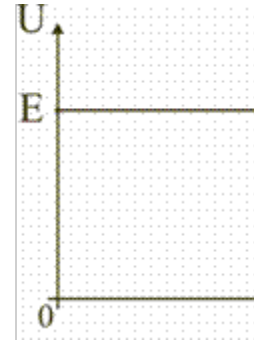


Рис. 6

У идеального источника ЭДС внутреннее сопротивление $r_0 \ll R_n$ (приблизительно $r_0 \approx 0$). В этом случае его вольт-амперная характеристика представляет собой прямую линию (рис. 6), следовательно, напряжение U на его зажимах постоянно ($U = E$) и не зависит от величины сопротивления нагрузки R_n .

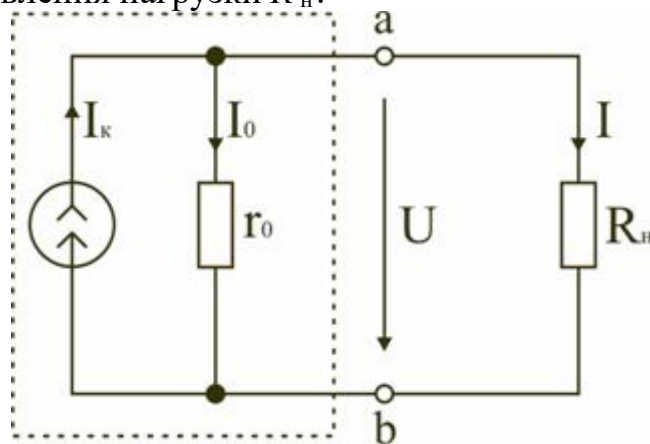


Рис. 7

Источник тока, заменяющий реальный источник электрической энергии, характеризуется неизменным по величине током I_k , равным току короткого замыкания источника э.д.с. ($I_k = \frac{E}{r_0}$), и внутренним сопротивлением r_0 , включенным параллельно (рис. 7).

Стрелка в кружке указывает положительное направление тока источника. Для данной цепи запишем соотношение

$$I_k = I_0 + I; \quad I_0 = \frac{U}{r_0}$$

В этом случае вольт-амперная (внешняя) характеристика $I(U)$ источника тока определится соотношением

$$I = I_k - I_0 = I_k - U/r_0 \text{ и представлена на рис. 8}$$

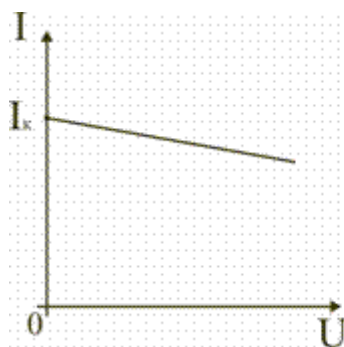


Рис. 8

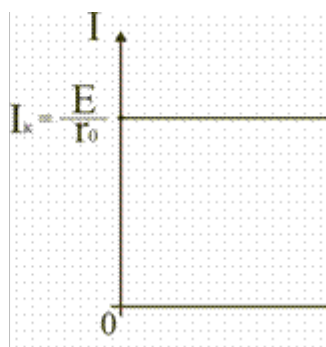


Рис. 9

Уменьшение тока нагрузки I при увеличении напряжения U на зажимах аб источника тока, объясняется увеличением тока I_0 , замыкающегося в цепи источника тока.

В идеальном источнике тока $r_0 \gg R_n$. В этом случае можно считать, что при изменении сопротивления нагрузки R_n потребителя $I_0 \approx 0$, а $I \approx I_k$. Следовательно вольт-амперная характеристика $I(U)$ идеального источника тока представляет прямую линию, проведенную параллельно оси абсцисс на уровне $I = I_k = E / r_0$ (рис. 9).

При сравнении внешних характеристик источника ЭДС (рис. 5) и источника тока (рис. 8) следует, что они одинаково реагируют на изменение величины сопротивления нагрузки. Можно показать, что ток в нагрузке R_n для схем источника ЭДС (рис. 4) и источника тока (рис. 7) одинаков и равен $I = \frac{E}{r_0 + R_n}$

Следовательно, схема источника тока (рис. 7) эквивалентна схеме источника э.д.с. (рис. 4) в отношении энергии, выделяющейся в сопротивлении нагрузки R_n , но не эквивалентна ей в отношении энергии, выделяющейся во внутреннем сопротивлении источника питания.

2-й учебный вопрос: Топологические характеристики электрических цепей

Схема электрической цепи – графическое изображение цепи с помощью условных обозначений ее элементов и соединений.

Для анализа и расчета электрическая цепь графически представляется в виде электрической схемы, содержащей условные обозначения ее элементов и способы их соединения. Электрическая схема простейшей электрической цепи, обеспечивающей работу осветительной аппаратуры, представлена на рис. 1

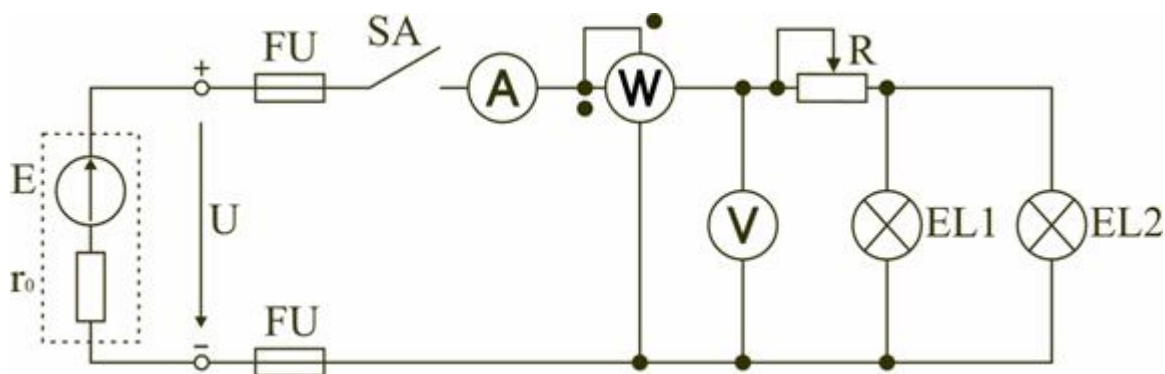


Рис. 10

В электрической схеме на рис. 1 электрическая энергия от источника ЭДС E , обладающего внутренним сопротивлением r_0 , с помощью вспомогательных элементов цепи передаются через регулировочный реостат R к потребителям (нагрузке): электрическим лампочкам EL_1 и EL_2 .

Для расчета и анализа реальная электрическая цепь представляется графически в виде *расчетной электрической схемы (схемы замещения)*. В этой схеме реальные элементы цепи изображаются условными обозначениями, причем вспомогательные элементы цепи обычно не изображаются, а если сопротивление соединительных проводов намного меньше сопротивления других элементов цепи, его не учитывают. Источник питания показывается как источник ЭДС E с внутренним сопротивлением r_0 , реальные потребители электрической энергии постоянного тока заменяются их электрическими параметрами: активными сопротивлениями R_1, R_2, \dots, R_n . С помощью сопротивления R учитывают способность реального элемента цепи необратимо преобразовывать электроэнергию в другие виды, например, тепловую или лучистую.

При этих условиях схема на рис. 10 может быть представлена в виде расчетной электрической схемы (рис. 2), в которой есть источник питания с ЭДС E и внутренним сопротивлением r_0 , а потребители электрической энергии: регулировочный реостат R , электрические лампочки EL_1 и EL_2 заменены активными сопротивлениями R, R_1 и R_2 .

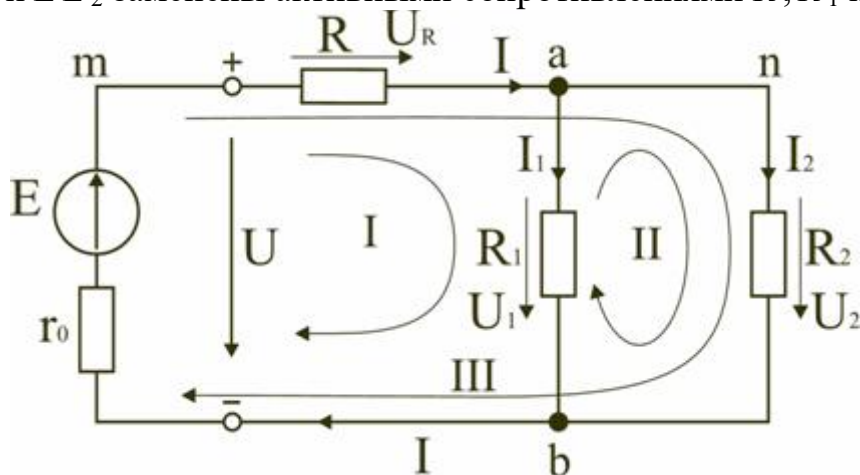


Рис. 11

Источник ЭДС на электрической схеме (рис. 11) может быть заменен источником напряжения U , причем условное положительное направление напряжения U источника задается противоположным направлением ЭДС.

При расчете в схеме электрической цепи выделяют несколько основных элементов.

Конфигурация схемы замещения цепи

Конфигурация схемы замещения цепи определяется следующими геометрическими (топологическими) понятиями: ветвь, узел, контур.

Ветвь – участок электрической цепи, представляющий собой один элемент или последовательное соединение нескольких элементов, через которые протекает один и тот же ток.

Схема на рис. 11 имеет три ветви: ветвь bma , в которую включены элементы r_0, E, R и в которой возникает ток I ; ветвь ab с элементом R_1 и током I_1 ; ветвь anb с элементом R_2 и током I_2 .

Узел – место соединения трех и более ветвей.

В схеме на рис. 11 – два узла a и b . Ветви, присоединенные к одной паре узлов, называют параллельными. Сопротивления R_1 и R_2 (рис.11) находятся в параллельных ветвях.

Контур – замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям так, что ни одна ветвь и ни один узел не встречаются более одного раза, т. е. это любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям.

В схеме на рис. 11 можно выделить три контура: I – $bmaab$; II – $anba$; III – $manbm$, на схеме стрелкой показывают направление обхода контура.

Условные положительные направления ЭДС источников питания, токов во всех ветвях, напряжений между узлами и на зажимах элементов цепи необходимо задать для правильной записи уравнений, описывающих процессы в электрической цепи или ее элементах. На схеме (рис. 2) стрелками укажем положительные направления ЭДС, напряжений и токов:

а) для ЭДС источников – произвольно, но при этом следует учитывать, что полюс (зажим источника), к которому направлена стрелка, имеет более высокий потенциал по отношению к другому полюсу;

б) для токов в ветвях, содержащих источники ЭДС – совпадающими с направлением ЭДС; во всех других ветвях произвольно;

в) для напряжений – совпадающими с направлением тока в ветви или элемента цепи.

3-й учебный вопрос: Законы электрических цепей постоянного тока

Закон Ома в интегральной форме:

- закон Ома для однородного участка электрической цепи (в отсутствии источников э.д.с)

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

где R – коэффициент называемый электрическим сопротивлением.

$$[R] = 1 \text{ O}_M$$

Величина сопротивления зависит от материала проводника, его геометрии, температуры. Для однородного цилиндрического проводника

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

где l – длина проводника, S – площадь поперечного сечения, ρ – удельное сопротивление проводника.

- закон Ома для неоднородного участка электрической цепи (содержащего источники э.д.с E)

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

Закон Ома в дифференциальной форме:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

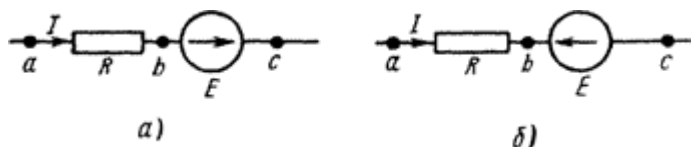
$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

σ – коэффициент электропроводности или проводимость,

\vec{E} – напряженность электрического поля

Обобщенный закон Ома

Закон Ома для участка цепи, содержащего источник ЭДС, позволяет найти ток этого участка по известной разности потенциалов $\varphi_a - \varphi_c$ на концах участка цепи и имеющейся на этом участке э.д.с. E .



В общем

случае

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_c \pm E}{R}$$

Знак «+» перед E соответствует рисунку а), знак «-» рисунку б).

Первый закон Кирхгофа - алгебраическая сумма всех токов, сходящихся в узле равна нулю.

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0, \text{ n — количество ветвей, сходящихся в узле.}$$

Токи, входящие в узел, условно принимаются положительными, а выходящие из него – отрицательными.

Второй закон Кирхгофа - в любом контуре электрической цепи алгебраическая сумма э.д.с. равна алгебраической сумме падений напряжений в отдельных сопротивлениях.

$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m I_k R_k$, где n – количество э.д.с. в контуре, m – количество сопротивлений в контуре.

Баланс мощностей в цепях постоянного тока

Если на участке цепи с активным сопротивлением R под действием приложенного к нему напряжения протекает ток I , то выделяемая в нем мощность равна

$$P = I \cdot U = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$$

Если через источник ЭДС E протекает ток I , то вырабатываемая им мощность равна

$$P = E \cdot I$$

Уравнение баланса мощностей в цепи постоянного тока: алгебраическая сумма мощностей, отдаваемых всеми источниками энергии E_i , равна сумме мощностей, потребляемых в ее элементах R_k .

Заключение

На лекции были рассмотрены основные элементы электрических цепей постоянного тока, их условные обозначения, способы построения схем, топологические понятия, такие как ветвь, узел, контур.

Также рассмотрен вопрос об эквивалентности источника э.д.с. и источника тока. В заключении можно отметить: вопрос о том, каким из двух эквивалентных источников питания пользоваться, не играет существенной роли. Однако на практике, особенно при расчете электротехнических устройств, чаще используется в качестве источника питания источник э.д.с. с внутренним сопротивлением r_0 и величиной электродвижущей силы E .

При расчете и анализе электрических цепей реальный источник электрической энергии с конечным значением r_0 заменяют расчетным эквивалентным. В качестве эквивалента может быть взят:

1. Источник э.д.с. E с последовательно включенным сопротивлением r_0 , равным внутреннему сопротивлению реального источника;
2. Источник тока с током $I = \frac{E}{r_0}$ и параллельно с ним включенным сопротивлением r_0 .