

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

В.И. БОГДАНОВИЧ

**ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ:
КОНСПЕКТ ЛЕКЦИИ**

Для студентов первого курса специальности
1-31 04 03 «Физическая электроника»

ПРЕПРИНТ РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2015

Лекция 1

Раздел 1 Электрические цепи постоянного тока

Тема 1 Основные законы, элементы и параметры электрических цепей

Общие сведения об электрических цепях и их элементах

Электрической цепью называется совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитические процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об ЭДС, напряжении и токе. В общем случае электрическая цепь состоит из источников и приемников электрической энергии, соединенных с помощью проводников.

Элементы электрической цепи, генерирующие электрическую энергию, называются источниками электрической энергии (источники тока, генераторы), а элементы электрической цепи, потребляющие электроэнергию, называются приемниками электрической энергии (электролампы, электродвигатели, электронагревательные приборы и др.).

Отдельные устройства, составляющие электрическую цепь, называют элементами электрической цепи. Различают активные и пассивные элементы. Активными элементами считаются источники электрической энергии: источники ЭДС, источники тока. К пассивным элементам электрической цепи относятся сопротивления, индуктивности и емкости.

Положительные направления тока и напряжения

Электрическим током называется упорядоченное движение электрического заряда. За положительное направление принимают перемещение положительных зарядов.

Мгновенное значение тока, т. е. его значение в любой момент времени t определяется как: $i = dq/dt$, где $q = q^+ + q^-$; q^+ и q^- положительные и отрицательные заряды, переместившиеся в противоположные стороны за время t .

Электрический ток может быть постоянным или переменным.

Направление тока характеризуется знаком тока. Понятие положительный или отрицательный ток имеет смысл, если сравнивать направление тока в проводнике с некоторым ранее выбранным ориентиром. Если в результате выполненного расчета, ток имеет знак (+), т. е. $i > 0$, то направление тока выбрано, верно, если же значение тока имеет знак (-), то направление тока необходимо поменять на противоположное.

Рассмотрим участок электрической цепи (рисунок 1).

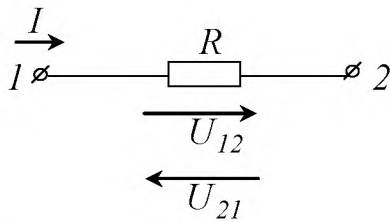


Рисунок 1 – Эквивалентная схема участка электрической цепи

Разность электрических потенциалов точек 1 и 2 представляет собой напряжение на данном участке цепи. Если потенциал тока 1 выше потенциала тока 2, то напряжение положительно, в противном случае напряжение отрицательно, т. е. $U_{12} = -U_{21}$, $\varphi_1 = \varphi_2 + IR$, а $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ и $U_{12} = IR$.

В электротехнике разность потенциалов на концах сопротивления принято называть либо напряжением на сопротивлении, либо падением напряжения.

Рассмотрим электрическую цепь, содержащую сопротивление и ЭДС (рисунок 2, а), б).

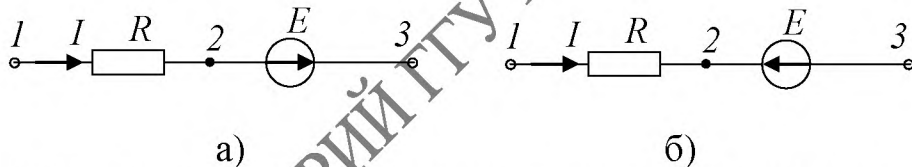


Рисунок 2 – Электрическая цепь, содержащая сопротивление и источник ЭДС

Определим разность потенциалов. По определению разность потенциалов на зажимах 1–3 равна $U_{13} = \varphi_1 - \varphi_3$. Выразим потенциал точки 1 через потенциал точки 3 для электрической цепи рисунка 2 а): потенциал точки 2 ниже, чем потенциал точки 3 на величину ЭДС E , поэтому $\varphi_2 = \varphi_3 - E$.

Для схемы рисунка 2, б): потенциал точки 2 выше потенциала точки 3 на величину ЭДС E , поэтому $\varphi_2 = \varphi_3 + E$. Так как ток течет от более высокого потенциала к более низкому, то потенциал точки 1 выше потенциала точки 2 на величину падения напряжения на сопротивлении R , поэтому $\varphi_1 = \varphi_2 + IR$.

Для схемы рисунка 2, а): $\varphi_1 = \varphi_3 + IR - E$, $U_{13} = \varphi_1 - \varphi_3 = IR - E$.
 Для схемы рисунка 2, б): $\varphi_1 = \varphi_3 + IR + E$, $U_{13} = \varphi_1 - \varphi_3 = IR + E$.

Элементы электрической цепи

Свойство элемента поглощать электрическую энергию из электрической цепи и преобразовывать ее в другие виды энергии, например в тепловую, световую и другие виды, характеризует такой параметр цепи как сопротивление R . Сопротивление это идеализированный элемент цепи, приближенно заменяющий резистор, для которого $R = \frac{U}{I}$. Здесь предполагается, что направления тока и напряжения совпадают, т. е. знаки их одинаковы и $R > 0$. Условное графическое изображение сопротивления показано на рисунке 3.

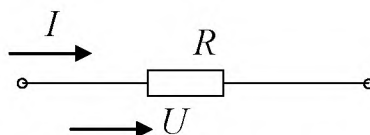


Рисунок 3 – Сопротивление в электрической цепи

Величина $g = I/R$ – называется проводимостью.

Мгновенная мощность, поступающая в сопротивление равна $P_R = ui = Ri^2 = gu^2$.

Свойство элемента, состоящее в возникновении собственного магнитного поля при прохождении через элемент электрического тока, характеризует параметр индуктивность L (рисунок 4).

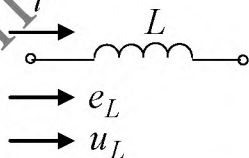


Рисунок 4 – Индуктивность в электрической цепи

ЭДС самоиндукции запишется $e_L = -L \frac{di}{dt}$, а мгновенное значение напряжения на индуктивном элементе имеет вид $u_L = -e_L = L \frac{di}{dt}$.

Свойства элемента накапливать заряды характеризует параметр емкость C (рисунок 5).

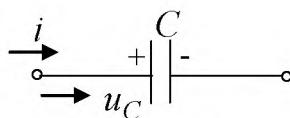


Рисунок 5 – Емкость в электрической цепи

Напряжение и ток на емкостном элементе имеют вид $u_C = \frac{1}{C} \int i dt$;

$$i = C \frac{du_C}{dt}.$$

Если в приемнике отношение напряжения к току есть величина постоянная, т. е. $\frac{u}{I} = R = const$, то приемник является линейным элементом и его вольт-амперная характеристика имеет вид прямой линии 2 на рисунке 6. Если же это отношение непостоянно, то приемник будет нелинейным и его вольт-амперная характеристика изображена линией 1 на рисунке 6.

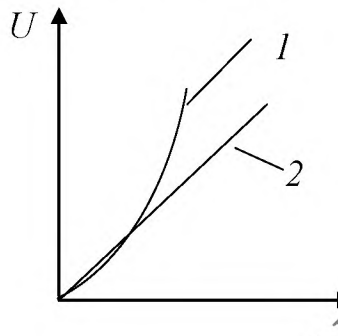


Рисунок 6 – Вольт-амперная характеристика

Электрические цепи, которые состоят только из линейных элементов, называют линейными. Если в цепи имеется хотя бы один нелинейный элемент, то цепь является нелинейной.

Источник ЭДС и источник тока

При анализе и расчете электрических цепей источники питания заменяют эквивалентными идеальными источниками ЭДС или тока.

Идеальный источник ЭДС представляет собой активный элемент с двумя выводами, напряжение на котором не зависит от тока, проходящего через источник, т. е. $E = U = const$. Предполагается, что внутри такого идеального источника пассивные элементы R, L, C отсутствуют и поэтому прохождение через него тока не вызывает падение напряжения. Условное графическое обозначение источника ЭДС показано на рисунке 7.

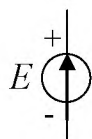


Рисунок 7 – Условное графическое обозначение источника ЭДС

Стрелка указывает положительное направление ЭДС, т. е. направление возрастания потенциала внутри источника.

Идеальным источником тока называют источник с внутренним сопротивлением, равным бесконечности, и током, не зависящим от сопротивления нагрузки цепи, т. е. током, значение которого не зависит от значения напряжения и равно току короткого замыкания I_k источника питания. Условное графическое обозначение источника тока показано на рисунке 8.

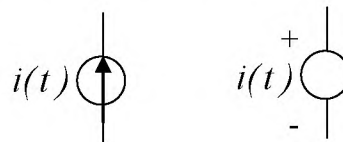


Рисунок 8 – Условное графическое обозначение источника тока

Направление стрелки указывает положительное направление тока.

Вольт-амперная характеристика идеальных источников ЭДС и тока показаны на рисунке 9.



Рисунок 9 – Вольт-амперная характеристика идеальных источников ЭДС и тока

Источники напряжения и тока и их эквивалентность

В зависимости от принципа действия источники электрической энергии можно разделить на источники напряжения (ЭДС) и источники тока. Так, например, химические источники электрической энергии основаны на возникновении разности потенциалов между различными электродами, помещенными в электролит. Эта разность потенциалов, наибольшая при разомкнутой цепи, т. е. при холостом ходе, называется ЭДС и обозначается буквой E . При нагрузке разность потенциалов становится меньше ЭДС E из-за появления встречной ЭДС поляризации и падения напряжения во внутреннем сопротивлении и называется напряжением U .

Индуктивные генераторы основаны на возникновении ЭДС индукции при изменении магнитного поля. При нагрузке их напряжение U также становится меньше ЭДС E холостого хода, в частности из-за падения напряжения во внутреннем сопротивлении.

Таким образом, эти источники являются источниками напряжения; при расчете цепей источники напряжения обычно заменяются эквивалентной схемой (рисунок 10), состоящей из последовательного соединения источника постоянной ЭДС E и внутреннего сопротивления R_B , величина которого учитывает все причины изменения напряжения при нагрузке.

Как было принято, направление напряжения U совпадает с направлением тока I во внешней цепи – от плюса к минусу, что может быть учтено индексом \pm т. е. U_{\pm} . Тогда ЭДС в источнике, также совпадающая по направлению с током, но текущим в источнике от минуса к плюсу, должна быть обозначена E_{\pm} . При холостом ходе

$$U_{x.x\pm} = E_{\pm}.$$

При нагрузке можно применить закон Ома, сложив внешнее R и внутреннее R_B сопротивления:

$$I = \frac{E_{\pm}}{R + R_B},$$

откуда

$$RI = U_{\pm} = E_{\pm} - R_B I.$$

Обычно это соотношение записывают без индексов:

$$U = E - R_B I,$$

но при этом следует помнить о противоположных положительных направлениях U и E .

При внешних сопротивлениях R , много больших, чем внутреннее сопротивление R_B ($R \gg R_B$), напряжение U остается практически постоянным ($U \approx E$) при изменении R .

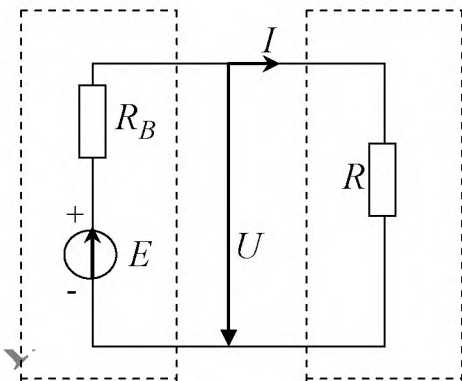


Рисунок 10 – Эквивалентная схема источника ЭДС

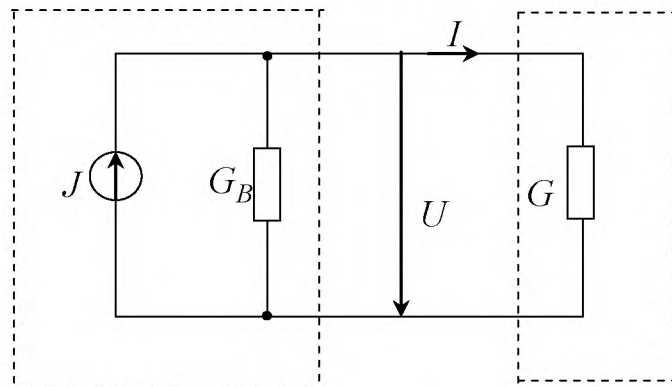


Рисунок 11 – Эквивалентная схема источника тока

Емкостные генераторы основаны на возникновении тока при изменении электрического поля. При коротком замыкании они отдают во внешнюю цепь весь генерируемый ими внутренний ток J .

При нагрузке, т. е. включении сопротивления, появляется напряжение, и ток внешней цепи I становится меньше J , в частности, из-за утечки через несовершенную изоляцию генератора.

Таким образом, этот источник электрической энергии является источником тока. При расчете цепей он обычно заменяется эквивалентной схемой (рисунок 11), состоящей из параллельного соединения источника постоянного внутреннего тока J и внутренней проводимости G_b , величина которой учитывает все причины изменения внешнего тока при нагрузке. Тогда напряжение U и ток I в проводимости G нагрузки будут:

$$U = \frac{I}{G + G_B} \text{ и } I = GU = J - G_B U.$$

При проводимостях G нагрузки, много больших, чем внутренняя проводимость G_B ($G \gg G_B$), ток I нагрузки остается практически неизменным ($I \approx J$) при изменении G .

При расчете цепей принцип действия реальных источников электрической энергии несуществен и источник напряжения может быть заменен источником тока, ему эквивалентным, т. е. таким, который не вызовет изменения напряжений и токов остальных участков цепи. Аналогично всякий источник тока может быть заменен эквивалентным ему источником напряжения. Такие замены в ряде случаев упрощают расчеты. Так как каждый из этих источников определяется двумя параметрами (см. рисунки 11 и 12), условиями эквивалентности должны быть два равенства, например, равенство напряжений при холостом ходе $U_{x.x}$ и токов при коротком замыкании $I_{к.з.}$:

$$U_{x.x} = E = \frac{I}{G_B}, I_{к.з.} = \frac{E}{R_B} = J \text{ и } G_B = \frac{I}{R_B}.$$

Таким образом, источник тока, эквивалентный источнику напряжения, должен генерировать ток, равный току короткого замыкания источника напряжения, и иметь параллельное внутреннее сопротивление, равное последовательному внутреннему сопротивлению источника напряжения. Положительное направление тока J выбирается таким, чтобы направление тока во внешней цепи осталось тем же.

При равенстве полезных мощностей $P = UI$, отдаваемых эквивалентными источниками во внешнюю цепь, полные мощности (т. е. вместе с потерями в их внутреннем сопротивлении) P_H источника напряжения и P_T источника тока

$$P_H = EI, P_T = JU = \frac{E}{R_B} RI = \frac{R}{R_B} P_H$$

и их КПД, равные отношению полезной мощности к полной их мощности,

$$\eta_H = \frac{P}{P_H}, \eta_T = \frac{P}{P_T} = \frac{R_B}{R} \cdot \frac{P}{P_H} = \frac{R_B}{R} \eta_H$$

в общем случае не равны между собой. КПД $\eta_H > \eta_T$ при $R > R_B$, а $\eta_T > \eta_H$ при $R < R_B$ и лишь при $R = R_B$ полные мощности и КПД эквивалентных источников становятся одинаковыми.

Схемы соединений, схемы замещения электрических цепей и режимы их работы

Графическое изображение электрической цепи с помощью стандартных условных обозначений ее элементов, отражающее характер соединения этих элементов, называется схемой электрической цепи.

Схема электрической цепи, через все участки которой проходит один и тот же ток, представляет собой последовательное соединение приемников. При параллельном соединении приемников они всегда находятся под одним и тем же напряжением. Если приемники соединены последовательно и параллельно, то такая схема называется смешанным соединением приемников. Такую электрическую цепь также называют разветвленной, и она является многоконтурной.

Простейшая электрическая цепь показана на рисунке 12, где источник питания с внутренним сопротивлением R_0 образует так называемый внутренний участок цепи, а соединительные провода с приемником (сопротивление R) – внешнюю часть цепи. Выходные зажимы 1 и 2 источника питания подключены с помощью соединительных проводов к входным зажимам приемника a и b . Таким образом, в электрической цепи можно выделить участки, содержащие как активные, так и пассивные элементы.

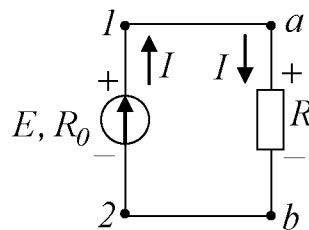


Рисунок 12 – Простейшая электрическая цепь

Для анализа электрической цепи необходимо выделить отдельные ветви и узлы. Ветвь – это участок электрической цепи, вдоль которого протекает один и тот же ток. Узлом называют точку в электрической цепи, в которой соединяются три и более ветвей. Любой замкнутый путь в электрической цепи, состоящий из нескольких ветвей, называют контуром.

На рисунке 13 показаны электрические схемы с обозначениями узлов, ветвей и контуров.

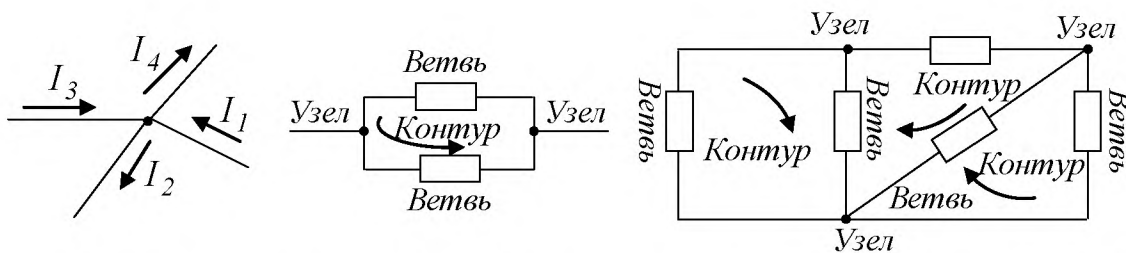


Рисунок 13 – Электрические схемы с обозначениями узлов, ветвей и контуров

При анализе электрических цепей рассматривают не цепи с реальными генераторами, электрическими двигателями, лампами и т. п., а схемы отражающих свойства реальных элементов цепей при определенных условиях, т. е. реальные электрические цепи заменяют схемами замещения или эквивалентными схемами, которые являются идеализированными расчетными моделями реальных цепей. Схема замещения есть графическое изображение реальной цепи с помощью идеализированных элементов, параметры которых отражают параметры замещаемых элементов. Так, источник с ЭДС E и внутренним сопротивлением R_0 можно представить в виде схем замещения, состоящих либо из идеального источника ЭДС и резистивного элемента, либо из идеального источника тока и резистивного элемента.

Рассмотрим, например, электрическую схему на рисунке 12 и представим ее двумя эквивалентными схемами. Из уравнения $E = U_0 + U = I(R_0 + R)$ следует, что ток в цепи ограничен сопротивлением источника питания R_0 и сопротивлением приемника R , поэтому источник питания может быть заменен источником ЭДС E (рисунок 14, а) и последовательно включенным сопротивлением R_0 , которое равно внутреннему сопротивлению реального источника, или источником тока с параллельно включенным сопротивлением R_0 (рисунок 14, б). Рассмотрим баланс мощностей источников питания для схем, приведенных на рисунках 14, а), б).

Для схемы рисунка 14, а) имеем

$$EI = I^2 R_0 + UI, \quad (1)$$

а для схемы рисунка 14, б)

$$UI_k = \frac{U^2}{R_0} + UI, \quad (2)$$

где EI – мощность источника напряжения; $I^2 R_0$ – мощность потерь в источнике напряжения; UI – мощность нагрузки или мощность, отдаваемая

источником во внешнюю цепь; UI_k – мощность источника тока; $\frac{U^2}{R_0}$ – мощность потерь в источнике тока.

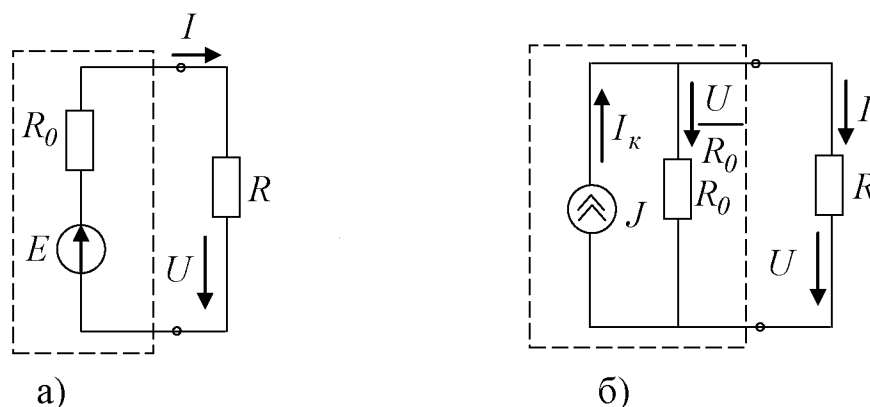


Рисунок 14 – Эквивалентные схемы, электрической цепи изображенной на рисунке 12, в которых источник питания заменен: а) – источником ЭДС E и последовательно включенным сопротивлением R_0 ; б) – источником тока с параллельно включенным сопротивлением R_0

Если $I_k = \frac{E}{R_0}$, то, согласно уравнениям (1) и (2), источники напря-

жения и тока создают одинаковые напряжения, токи и мощности, отдаваемые во внешнюю цепь. Следовательно, теоретически безразлично, с каким из идеальных источников питания использовать схему замещения. Однако на практике реальный источник питания обычно заменяют источником ЭДС, так как в этом случае через все элементы схемы замещения проходит реальный ток и идеальный источник развивает мощность $P = EI$, соответствующую мощности действительного источника. В самом деле, действительные источники питания работают в режимах, близких к режиму идеального источника ЭДС ($E \approx U$), если их внутренние сопротивления достаточно малы в сравнении с сопротивлением нагрузки. В режимах же идеального источника тока действительные источники питания могут работать тогда, когда имеют дело с режимами короткого замыкания или близкими к ним.

Электрическая цепь и ее элементы могут работать в различных режимах. В зависимости от частоты токов и напряжений различают режимы работы электрических цепей при постоянных и переменных ЭДС и токах, а также импульсные режимы, когда воздействие электрических сигналов не непрерывно в течение времени работы устройства. В зависимости от характера электромагнитных процессов, имеющих место в электрических

цепях, различают стационарные (установившиеся) и нестационарные (переходные) режимы. В зависимости от нагрузки режимы могут быть номинальными, согласованными, холостого хода и короткого замыкания.

Номинальный режим характеризуется тем, что все элементы цепи работают при условиях, указанных в паспорте данного элемента. Работа устройства при номинальном режиме гарантирует наиболее длительную безотказную его работу и экономичность. Поэтому при расчете электрических цепей за основу берут именно номинальные значения параметров элементов, основными из которых являются напряжения $U_{ном}$, токи $I_{ном}$ и мощность $P_{ном}$. Чрезмерное и длительное превышение номинальных значений может привести к перегрузке цепи и выводу устройства из строя, т. е. может возникнуть аварийный режим. О нагрузке можно судить по току I_n , проходящему через нее или по ее сопротивлению R . Например, для неразветвленной цепи (см. рисунок 12) ток нагрузки $I_n = \frac{E}{(R_0 + R)}$ будет

тем больше, чем меньше сопротивление приемника R .

Согласованный режим характеризуется тем, что источник питания отдает приемнику наибольшее количество энергии, что возможно при определенном соотношении (согласовании) между параметрами элемента цепи. Для цепи на рисунке 12 это осуществляется при $R = R_0$.

Режим, когда через источник питания и приемники не протекает ток, т. е. когда нагрузка отключена, называется холостым ходом. При холостом ходе напряжение на зажимах источника питания максимально и равно ЭДС источника: $U_{xx} = E$ (рисунок 15).

Режим короткого замыкания – это режим, при котором сопротивление внешней цепи и напряжение между зажимами источника питания равны нулю: $R = 0$; $U_k = 0$ (рисунок 16).

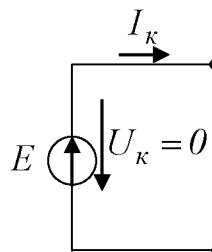
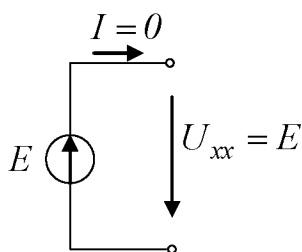


Рисунок 15 – Режим холостым ходом Рисунок 16 – Режим короткого замыкания

Режим короткого замыкания может возникнуть в электрической цепи при соединении накоротко разнопотенциальных зажимов источников питания проводником с нулевым сопротивлением. При коротком замыкании ток I_k максимален и во много раз превышает номинальный. Поэтому в

энергетических цепях режим короткого замыкания обычно является аварийным.

Двухполюсники

При анализе сложных электрических цепей иногда бывает необходимо более детально рассмотреть какие-либо из ее отдельных участков. В простейшем случае такой участок можно представить в виде двухполюсника.

Двухполюсником называется часть сложной электрической цепи, которая имеет два зажима (входной и выходной), называемых полюсами.

Часть цепи, выделяемая в виде двухполюсника, может иметь сложную конфигурацию. Двухполюсники можно классифицировать по различным признакам, например по линейности и нелинейности элементов, входящих в двухполюсник, по числу элементов, из которых он состоит. Двухполюсники бывают пассивные и активные.

Двухполюсник, не содержащий источника энергии, называется пассивным. Линейным пассивный двухполюсник будет и тогда, когда в нем будут содержаться источники энергии, ЭДС которых взаимно компенсируются, т. е. направлены навстречу друг другу и равны по значению. Двухполюсники условно изображают в виде прямоугольника, при этом для обозначения пассивного двухполюсника в прямоугольнике либо ставят букву Π , либо не ставят никакой буквы (рисунок 17, а).

В схеме нескомпенсированные двухполюсники, в которых содержатся источники электрической энергии, называются активными (рисунок 17, б). В этом случае при обозначении двухполюсника в прямоугольнике ставят букву A .

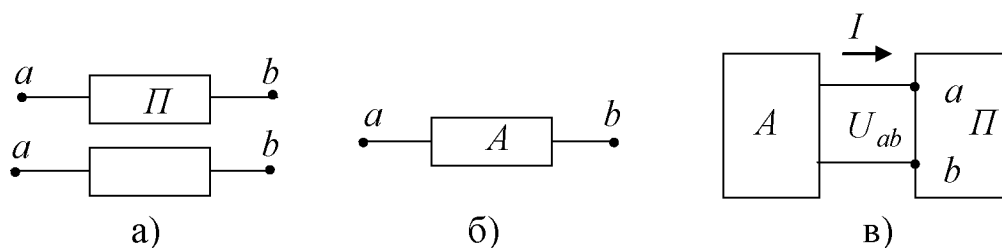


Рисунок 17 – Условно-графическое обозначение двухполюсников

При анализе электрической цепи, в которую входит пассивный двухполюсник, достаточно знать его характеристику. Так как пассивный двухполюсник является потребителем энергии, то в качестве характеристики можно взять его сопротивление, которое в этом случае называется внутренним или входным. Следовательно, на схеме замещения пассивный двухполюсник можно представить в виде одного элемента с сопротивлением, равным входному сопротивлению двухполюсника. Для активного

двухполюсника наряду с сопротивлением важной характеристикой является внешняя, или вольтамперная характеристика, которая полностью определяет его свойства.

Для любого активного двухполюсника произведение $U_{ab}I$ (рисунок 17, в) выражает мощность P , отдаваемую во внешнюю цепь с его зажимов:

$$P = U_{ab}I = EI - I^2R_0 = I^2R$$

где EI – мощность, развиваемая источником энергии двухполюсника; I^2R_0 – мощность, теряемая (рассеиваемая) на внутреннем сопротивлении двухполюсника; R – сопротивление приемника.

Когда ток проходит через двухполюсник навстречу направлению его ЭДС, это значит, что к активному двухполюснику поступает энергия из внешней цепи. Такой процесс наблюдается, например, при зарядке аккумулятора. Таким образом, в подобных случаях активный двухполюсник оказывается фактически потребителем электрической энергии.

Основные законы электрических цепей

Основными законами электрических цепей, устанавливающими соотношения между ЭДС, напряжениями, токами и сопротивлениями, являются закон Ома и правила Кирхгофа. Закона Ома и правилами Кирхгофа можно провести анализ и расчет любых электрических цепей. Так, в неразветвленной замкнутой электрической цепи (см. рисунок 12) под действием ЭДС E будет возникать ток I , значение которого определяется законом Ома:

$$I = \frac{E}{(R_0 + R)}, \quad (3)$$

где $R_0 + R$ – полное сопротивление замкнутой цепи; R_0 – внутреннее сопротивление источника; R – сопротивление приемника (нагрузки).

Для участка электрической цепи, сопротивление которого R и напряжение на котором U , закон Ома можно записать в виде

$$I = \frac{U}{R} \text{ или } U = IR. \quad (4)$$

Произведение IR называют падением напряжения, причем под напряжением на любом участке электрической цепи понимают разность потенциалов между крайними точками этого участка. Например, в схеме, если через участок ab с сопротивлением R , не имеющий источника ЭДС, ток проходит от точки a к точке b (ток на участке цепи без ЭДС всегда проходит от точки более высокого потенциала к точке с более низким потенциалом), потенциал φ_a точки a будет всегда выше потенциала φ_b точки b на значение падения напряжения на сопротивлении R :

$$\varphi_a - \varphi_b = IR, \quad (5)$$

а напряжение между точками a и b

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = IR. \quad (6)$$

Таким образом, напряжение на любом участке электрической цепи, не содержащем источника ЭДС, равно произведению тока, протекающего через участок, на сопротивление этого участка.

Рассмотрим Закон Ома для участка цепи, изображённого на рисунке 18.

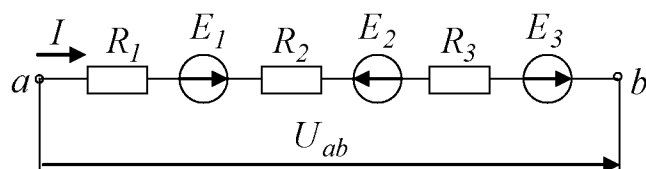


Рисунок 18 – Участок электрической цепи

Если положительное направление тока I на участке ab принять от точки a к точке b , то потенциал φ_b , выраженный через потенциал φ_a , определяется как

$$\varphi_b = \varphi_a - IR_1 + E_1 - IR_2 - E_2 - IR_3 + E_3.$$

Из этого выражения следует, что

$$I = \frac{(\varphi_a - \varphi_b) + E_1 - E_2 + E_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{U_{ab} \pm \sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n R_i}, \quad (7)$$

где $\sum_{i=1}^n E_i = E_1 - E_2 + E_3$ – алгебраическая сумма ЭДС, действующая на участке ab , причем, ЭДС записывается со знаком плюс, если она совпадает по направлению с направлением тока и со знаком минус – если не совпадает; $\sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + R_3$ – сопротивление участка; $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ – напряжение между зажимами a и b . Выражение (7) называют обобщенным законом Ома.

В цепях постоянного тока величину, обратную сопротивлению, называют электрической проводимостью:

$$g = \frac{I}{R}. \quad (8)$$

Анализ и расчет разветвленных цепей обычно проводят с помощью правил Кирхгофа. Первое правило Кирхгофа можно сформулировать следующим образом: сумма всех токов, приходящих к узлу электрической цепи, равна сумме всех токов, выходящих из этого узла или алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum I = 0. \quad (9)$$

Второе правило Кирхгофа применяют к замкнутым контурам. Оно может быть сформулировано следующим образом: алгебраическая сумма напряжений на сопротивлениях участков замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС источников, входящих в контур:

$$\sum IR = \sum E. \quad (10)$$

В уравнении (10) ЭДС записываются со знаком плюс, если их направления совпадают с направлением обхода контура, и со знаком минус, если их направления противоположны направлению обхода.

Основной единицей проводимости в СИ является сименс (См). Величина, обратная удельному сопротивлению, называется удельной электропроводимостью. Зависимость сопротивления от температуры приближенно описывается формулой

$$R = R_0 [1 + \alpha(t - t_0)], \quad (11)$$

где R_0 – сопротивление проводника при начальной температуре t_0 (Ом); α – температурный коэффициент сопротивления, равный отношению изменению сопротивления при изменении температуры на 1°C ; t – конечная температура ($^\circ\text{C}$).

Баланс мощностей

Из закона сохранения энергии для любой электрической цепи следует условие баланса мощностей: суммарная мощность источников цепи равна суммарной мощности, потребляемой приемниками.

Знак мощности будет положителен при совпадении направлений ЭДС E и тока I , проходящего через источник, и отрицателен при взаимно противоположных направлениях ЭДС и тока. Когда направления тока и ЭДС совпадают, от источника за единицу времени в электрическую цепь поступает мощность, равная EI . Эта мощность в уравнение баланса мощностей входит с положительным знаком. При встречном направлении ЭДС и тока источник ЭДС потребляет мощность из цепи. Например, когда источником является аккумулятор, который заряжается, или генератор, работающий в режиме двигателя, мощность EI расходуется на “химическую” или механическую работу соответственно. В этом случае мощность входит в уравнение баланса с отрицательным знаком. Уравнение баланса мощностей при питании цепи от источников ЭДС имеет вид

$$\sum EI = \sum I^2 R. \quad (12)$$

Если в электрической цепи содержатся не только источники ЭДС, но и источники тока, то при составлении уравнения баланса мощностей необходимо учитывать энергию, поступающую от источников тока.