

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

УЧЕБНИК

Под редакцией доктора технических наук,
профессора Ю.М.ИНЬКОВА

Рекомендовано

*Федеральным государственным учреждением
«Федеральный институт развития образования»
в качестве учебника для использования
в учебном процессе образовательных учреждений,
реализующих программы среднего профессионального образования*

*Регистрационный номер рецензии 500
от 2 июля 2009 г. ФГУ «ФИРО»*

9-е издание, стереотипное



Москва
Издательский центр «Академия»
2013

УДК 621.3
ББК 31.2:32.85я723
Э455

Авторы:

Б. И. Петленко — предисловие, гл. 1 и 10; *Ю. М. Иньков* — гл. 7 и 8;
А. В. Крашенинников — гл. 3, 5, 6 и приложение 2; *Р. В. Меркулов* — гл. 9, 11 и 12;
А. Б. Петленко — гл. 2 и 4 и приложение 1

Рецензенты:

академик Академии электротехнических наук Российской Федерации,
д-р техн. наук, проф. РХТУ им. Д.И. Менделеева *Г. Г. Рекус*;
преподаватель ГОУ ММТП, канд. техн. наук, доц. *В. И. Полещук*;
зам. директора КАиР № 27, преподаватель специальных дисциплин *В. П. Петров*

Электротехника и электроника : учебник для студ. учреж-
Э455 дений сред. проф. образования / Б. И. Петленко, Ю. М. Инь-
ков, А. В. Крашенинников и др. ; под ред. Ю. М. Инькова. —
9-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. —
368 с.

ISBN 978-5-4468-0021-6

Рассмотрены физическая сущность процессов, происходящих в электротехнических и электронных устройствах, соответствующих основным разделам курса «Электротехника и электроника»: электрические цепи постоянного и переменного токов; магнитные цепи; переходные процессы в электрических цепях; электрические измерения; трансформаторы и электрические машины; электропривод, электрические и магнитные устройства автоматики; передача и распределение электрической энергии; основы электроники — полупроводниковые приборы и электронные устройства.

Учебник может быть использован при изучении общепрофессиональной дисциплины «Электротехника и электроника» в соответствии с ФГОС СПО для неэлектрических специальностей.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 621.3
ББК 31.2:32.85я723

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение
любым способом без согласия правообладателя запрещается*

© Коллектив авторов, 2003

© Коллектив авторов, 2012, с изменениями

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2012

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2012

ISBN 978-5-4468-0021-6

Настоящий учебник переработан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом для студентов, обучающихся по неэлектротехническим специальностям среднего профессионального образования.

Под электротехникой понимается область науки и техники, использующая электрические и магнитные явления для практических целей. Составной частью электротехники является электроника, использующая для создания разнообразных систем процессы в полупроводниковых и электровакуумных приборах.

По назначению электротехника и электроника подразделяются на три основных направления: энергетическое, технологическое и информационное. Первое направление связано с получением, распределением и преобразованием электрической энергии. Второе направление использует электрические и магнитные явления для разнообразных технологических процессов (сварка, плавка, электролиз, сушка, сепарация различных материалов и др.). Третье направление связано с созданием и использованием разнообразных систем управления, вычислительной техники и связи.

В соответствии с указанными направлениями в курсе «Электротехника и электроника» изучаются общие закономерности электромагнитных процессов в разнообразных электрических и магнитных цепях, устройства для получения (генераторы) и преобразования (электродвигатели и электропривод) электрической энергии в механическую, устройства для преобразования параметров передаваемой электрической энергии — рода тока, частоты и величины напряжения и тока (выпрямители, трансформаторы и др.), а также общие принципы передачи и распределения электрической энергии. Кроме того, рассматриваются принципы работы информационно-измерительных, электронных и микроэлектронных приборов и систем (электроизмерительных и полупроводниковых приборов, систем индикации информации, интегральных микросхем, усилителей и генераторов).

Невозможно в настоящее время представить себе какую-либо отрасль общественного производства, где бы не использовалась

электрическая энергия. Без электрификации немислимы промышленность, сельское хозяйство, транспорт и быт. Даже в таких областях, как геология, медицина, биология, астрономия и другие, передовые достижения основываются на базе электрической энергии.

Огромное значение электрической энергии в жизни современного общества объясняется целым рядом ее преимуществ перед другими видами энергии. Главное преимущество электрической энергии заключается в ее универсальности — она сравнительно легко преобразуется в другие виды энергии: механическую, тепловую, лучистую, химическую — и наоборот. Кроме того, ее можно передавать на огромные расстояния при сравнительно небольших потерях.

Поэтому для того чтобы стать хорошим специалистом в своем деле: электротехником, механиком, технологом или строителем, — необходимо знать основные положения дисциплины «Электротехника и электроника», которые базируются на курсах физики, математики и механики, и уметь на практике грамотно применять электротехнические и электронные устройства.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

1.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Электрическая энергия представляет собой энергию электромагнитного поля, являющегося видом материи. Поле имеет электрическую и магнитную составляющие, которые можно рассматривать на примере линии передачи постоянного тока (рис. 1.1). При передаче электроэнергии между изолированными проводами возникает электрическое поле, показанное пунктирными линиями. В проводах, по которым протекает ток при передаче энергии и вне их, создается магнитное поле, показанное сплошными линиями.

На рис. 1.1 можно увидеть различие между электрическим и магнитным полем: электрические силовые линии незамкнуты, они начинаются и заканчиваются на заряженных проводах, в то время как магнитные силовые линии всегда замкнуты, т. е. не имеют ни начала, ни конца.

Из курса физики известно, что электрическое поле в каждой точке характеризуется вектором напряженности \vec{E} , равным силе, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в эту точку, и вектором электрического смещения $\vec{D} = \epsilon_a \vec{E}$, где ϵ_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды.

Электрическое поле в проводящей среде создает ток — упорядоченное движение свободных электрических зарядов.

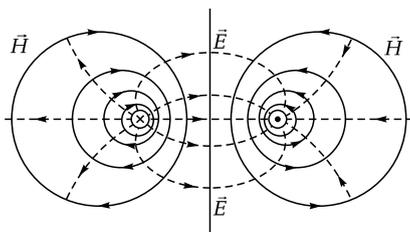


Рис. 1.1. Электрическое и магнитное поле линии передачи постоянного тока

Этот ток характеризуется в каждой точке поля вектором плотности тока $\vec{J} = \gamma \vec{E}$, где γ — удельная проводимость среды.

Ток сопровождается появлением магнитного поля и переходом части энергии электромагнитного поля в теплоту, причем мощность этого процесса в единице объема $P_0 = |\vec{E}|J = \gamma|\vec{E}|^2$.

Магнитное поле в каждой точке характеризуется вектором магнитной индукции \vec{B} , величина которого равна силе, действующей на единичный положительный заряд, движущийся со скоростью, равной единице.

Направление \vec{B} перпендикулярно силе и скорости. Кроме \vec{B} магнитное поле характеризуют вектором напряженности $\vec{H} = \vec{B}/\mu_a$, где μ_a — абсолютная магнитная проницаемость среды.

Передача, генерирование, преобразование и потребление электрической энергии возможны лишь при наличии электрического и магнитного полей, т. е. при наличии электромагнитного поля.

Все электротехнические устройства основаны на использовании электромагнитного поля, создаваемого их системами, которые состоят из заряженных тел и контуров с токами. Поэтому для решения многих задач расчета разнообразных устройств необходимо использовать теорию электромагнитного поля со сложными математическими зависимостями, что часто весьма затруднительно.

Однако в большинстве устройств используются ограниченные пути электрического тока и магнитного потока — изолированные проводники малого сопротивления и магнитопроводы из материала с высокой магнитной проницаемостью, называемые электрическими и магнитными цепями. Их расчеты могут быть значительно упрощены, так как не требуют знания составляющих поля в каждой точке устройств.

Теория электрических и магнитных цепей основана на использовании вместо величин \vec{E} , \vec{D} , \vec{J} , \vec{H} и \vec{B} , характеризующих поле, следующих интегральных величин:

напряжения	$U = \int \vec{E}d\vec{l};$	
заряда	$q = \int \vec{D}d\vec{S};$	(1.1)
тока	$I = \int \vec{J}d\vec{S};$	
магнитного потока	$\Phi = \int \vec{B}d\vec{S}$ и др.	

Здесь l — длина; S — площадь.

Вместо характеристик среды ϵ_a , μ_a и γ используются интегральные характеристики носителей полей: электрического — емкость C , магнитного — индуктивность L , а также преобразователя энер-

гии поля в тепловую энергию — сопротивление $R = U/I$. Эти величины называются параметрами электрических цепей.

Если эти параметры не зависят от тока и напряжения, то уравнения теории цепей, связывающих интегральные величины, будут линейными. Такие цепи называются линейными.

В ряде важных для практики случаев R , C или L являются функциями тока и напряжения. Тогда уравнения и цепи становятся нелинейными.

Параметрами R , C , L обладают все элементы цепей, однако в некоторых устройствах основным является только один из них. Так, в резистивном элементе основным параметром является сопротивление R , в конденсаторе — емкость C , в катушке индуктивности — индуктивность L .

При подключении цепи к источнику постоянного напряжения в течение короткого времени потребляется энергия на создание электромагнитного поля. После этого запасенная энергия сохраняет свою величину неизменной и не отражается на работе цепи, а источники доставляют энергию только на покрытие тепловых потерь в сопротивлениях. Поэтому при расчете цепей постоянного тока следует учитывать только сопротивление R . В цепях с изменяющимися токами запасаемая энергия и мощность потерь непрерывно изменяются. Поэтому при расчете таких цепей необходимо учитывать все три параметра.

1.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.2.1. Основные понятия теории электрических цепей. Закон Ома

Свободные электроны в металлическом проводнике и ионы в электролите находятся в состоянии беспорядочного движения. Количество электричества, которое переносится при этом через любое поперечное сечение проводника, в среднем равно нулю.

Если проводник поместить в электрическое поле, то свободные электроны будут перемещаться в направлении силы, действующей со стороны поля. В этом случае через любое поперечное сечение проводника проходит определенный заряд, т. е. в проводнике возникает электрический ток — упорядоченное движение электрических зарядов.

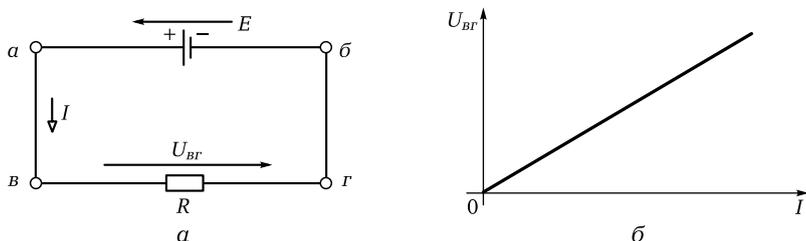


Рис. 1.2. Схема электрической цепи (а) и вольт-амперная характеристика линейного резистора (б)

Для существования электрического тока необходима замкнутая электрическая цепь для протекания электрических зарядов. Электрическая цепь образуется из источников энергии и приемников энергии, соединенных между собой (рис. 1.2, а).

В источниках электрической энергии возбуждается электродвижущая сила (ЭДС) за счет преобразования различных видов энергии (механической, химической, световой, тепловой и др.) в электрическую.

В приемниках происходит обратное преобразование электрической энергии в другие виды энергии: механическую — в двигателях, тепловую — в нагревательных устройствах, световую — в источниках света, химическую — в аккумуляторах.

Мерой электрического тока служит величина, измеряемая количеством электричества (зарядом), протекающим через поперечное сечение проводника за 1 с. Если величина тока не изменяется во времени, такой ток называется постоянным и обозначается прописной буквой I :

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

где q — заряд, протекающий через поперечное сечение проводника за время t .

Изменяющийся ток в отличие от постоянного обозначается строчной буквой i . За бесконечно малый промежуток времени dt изменение заряда также мало, и для определения тока можно пользоваться аналогичной формулой:

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

В Международной системе единиц (СИ) единицей тока является ампер (А), а единицей заряда — кулон (Кл).

За направление тока принимается направление, в котором перемещаются положительно заряженные частицы, т. е. направление, противоположное движению электронов. Участки цепи, содержащие ЭДС, называются активными, а без них — пассивными.

Одной из основных характеристик электрической цепи является напряжение U , которое в соответствии с выражением (1.1) равно работе по перемещению заряда в 1 Кл между двумя точками (v и $г$ на рис. 1.2, a):

$$U_{вг} = \frac{A_{вг}}{q}, \quad (1.2)$$

где $A_{вг}$ — работа на перемещение заряда; q — перемещаемый заряд, Кл.

В СИ работа измеряется в джоулях (Дж), напряжение и ЭДС — в вольтах (В).

При изучении электрических процессов широко применяется также понятие «потенциал». Находясь у положительного зажима источника, положительный заряд q обладает некоторой потенциальной энергией. Если он переместится из точки v в точку $г$ (см. рис. 1.2, a), то потенциальная энергия заряда уменьшится на величину работы, затраченной на его перемещение:

$$A_{вг} = q(\varphi_v - \varphi_г), \quad (1.3)$$

где φ_v и $\varphi_г$ — потенциалы точек v и $г$.

Но эта работа может быть определена и через напряжение между точками v и $г$ из формулы (1.2):

$$A_{вг} = qU_{вг}. \quad (1.4)$$

Отсюда

$$U_{вг} = \varphi_v - \varphi_г,$$

т. е. потенциал измеряется в тех же единицах, что и напряжение, — в вольтах (В).

Из выражения (1.3) следует, что потенциал численно равен работе, совершаемой силой поля, на перемещение единицы положительного заряда из рассматриваемой точки в точку, потенциал которой равен нулю. В электротехнике нулевым потенциалом принято считать потенциал Земли. Работа, затрачиваемая на перемещение заряда в 1 Кл по всей цепи, численно равна ЭДС:

$$E = \frac{A}{q}. \quad (1.5)$$

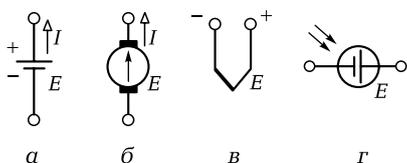


Рис. 1.3. Условные обозначения источников постоянного тока на схемах:

a — гальванический элемент и аккумулятор; *б* — генератор постоянного тока; *в* — термопара; *г* — фотоэлемент

ЭДС заставляет положительные заряды перемещаться от точек низшего потенциала к точкам высшего потенциала. Источники постоянной ЭДС условно обозначаются, как показано на рис. 1.3.

На участках цепи, не содержащих ЭДС, заряды движутся от точек высшего потенциала к точкам низшего потенциала, поэтому положительное направление тока совпадает с направлением убывания потенциала.

Электрический ток в цепи определяется не только действующей в ней ЭДС, но и зависит от электрического сопротивления. Связь между указанными величинами устанавливается законом Ома и для участка *в*—*г* (см. рис. 1.2, *a*), имеющего сопротивление *R*, ток определяется по формуле

$$I = \frac{U_{вг}}{R}. \quad (1.6)$$

Выражение (1.6) определяет вольт-амперную характеристику (ВАХ) резистора, которая для случая $R = \text{const}$ (т.е. линейного резистора) показана на рис. 1.2, *б*.

Сопротивление измеряется в омах (Ом), а величина, обратная ему, — $1/R$, называется проводимостью и измеряется в сименсах (См). Если сопротивление внешней цепи *R*, то с учетом внутреннего сопротивления источника $R_{в}$ закон Ома для всей цепи имеет вид

$$I = \frac{E}{R + R_{в}}.$$

В другом виде это выражение может быть записано следующим образом:

$$E = IR_{в} + IR = IR_{в} + U_{вг}.$$

Учитывая, что $U_{вг}$ на рис. 1.2 есть напряжение нагрузки (приемника) $U_{вг} = U$, имеем

$$U = E - IR_{в}. \quad (1.7)$$

Это уравнение электрического состояния простейшей цепи.

Заметим, что при $I = 0$ (цепь разомкнута) $E = U$, т.е. при холостом ходе ЭДС равна напряжению на зажимах источника.

Реальные источники электрической энергии обладают некоторым внутренним сопротивлением $R_{в}$. Однако в ряде случаев источники идеализируют и принимают их внутреннее сопротивление либо очень малым, либо очень большим. В первом случае говорят об идеализированном источнике ЭДС, у которого напряжение на зажимах не изменяется при изменении сопротивления приемника. Во втором случае получается идеализированный источник тока, и изменение сопротивления приемника не изменяет ток источника.

Приемники электрической энергии отличаются большим разнообразием. Как отмечалось, в них происходят необратимые преобразования электрической энергии в другие виды энергии. Так, аккумулятор становится приемником в процессе его зарядки (рис. 1.4, *а*), когда электрическая энергия преобразуется в химическую. В электродвигателе (рис. 1.4, *б*) электрическая энергия превращается в механическую, в электрической печи (рис. 1.4, *в*) или в резисторе (рис. 1.4, *г*) — в тепловую, а в лампе накаливания (рис. 1.4, *г*) — в световую.

В электрические цепи кроме источников и приемников, соединенных проводами, включаются вспомогательные и измерительные устройства.

Вспомогательные устройства служат для управления режимом электрической сети и ее защиты. Некоторые из вспомогательных элементов электрической цепи показаны на рис. 1.5.

В качестве измерительных устройств используют амперметры и вольтметры, предназначенные для измерения токов и напряжений в (на) участках электрической цепи. Амперметры, сопротивление которых пренебрежимо мало, последовательно включают в цепь, в которой измеряется ток. Вольтметры, сопротивление ко-

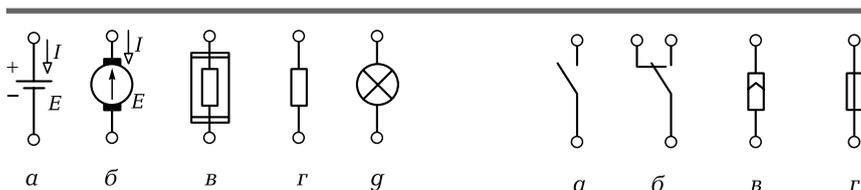


Рис. 1.4. Условные обозначения приемников электрической энергии на схемах:

а — аккумулятор при зарядке; *б* — двигатель постоянного тока; *в* — электрическая печь; *г* — резистор; *д* — лампа накаливания

Рис. 1.5. Вспомогательные элементы электрической цепи:

а — выключатель; *б* — переключатель; *в* — штепсельный разъем; *г* — плавкий предохранитель

торых очень велико, включают параллельно участкам цепи, на которых измеряется напряжение.

В электрических схемах электрических цепей выделяют ветвь, узел и контур. Под ветвью понимается участок электрической цепи с одним и тем же током. Узлом называют место соединения более двух ветвей. Контур образует замкнутый путь, проходящий через несколько ветвей и узлов разветвленной электрической цепи.

1.2.2. Эквивалентные преобразования пассивных участков электрической цепи

При последовательном соединении элементов электрической цепи ток в каждом элементе одинаков (рис. 1.6, а). Мощность и ток в цепи не изменятся, если последовательные элементы заменить одним эквивалентным (рис. 1.6, б) с сопротивлением $R_{\text{эк}}$, равным сумме сопротивлений отдельных элементов R_i , т. е.

$$R_{\text{эк}} = \sum_{i=1}^n R_i.$$

При параллельном соединении участков электрической цепи все они присоединяются к одной паре узлов, т. е. находятся под воздействием одного и того же напряжения (рис. 1.7, а). Такая схема может быть заменена эквивалентной (рис. 1.7, б), проводимость которой равна сумме проводимостей всех параллельных участков G_i :

$$G_{\text{эк}} = \sum_{i=1}^n G_i = \frac{1}{R_{\text{эк}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}.$$

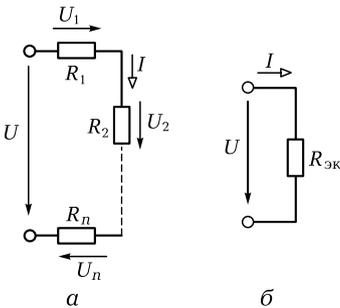


Рис. 1.6. Цепь с последовательным соединением элементов (а) и ее эквивалентная схема (б)

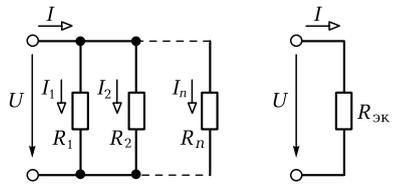


Рис. 1.7. Цепь с параллельным соединением элементов (а) и ее эквивалентная схема (б)

При смешанном соединении элементов сочетаются их последовательное и параллельное соединения. В этом случае эквивалентное сопротивление всей цепи может быть найдено суммированием эквивалентных сопротивлений участков с параллельным и последовательным соединением элементов.

1.2.3. Работа и мощность электрического тока

Используя рассмотренные ранее понятия, можно подсчитать работу и мощность источника во всей цепи и на отдельном ее участке. Действительно, из выражений (1.4) и (1.5) для всей цепи $A = Eq = EIt$ и на отдельном участке $v - \Gamma$ (см. рис. 1.2)

$$A_{v\Gamma} = U_{v\Gamma} \cdot q = U_{v\Gamma} It.$$

Мощность, развиваемая источником во всей цепи:

$$P = \frac{A}{t} = EI, \quad (1.8)$$

а на участке $v - \Gamma$ (см. рис. 1.2)

$$P_{v\Gamma} = \frac{A_{v\Gamma}}{t} = U_{v\Gamma} I. \quad (1.9)$$

В системе СИ единицей мощности является ватт (Вт).

Из выражения (1.9) мощность может быть определена как скорость преобразования электрической энергии в другой вид энергии, так как работа $A_{v\Gamma}$ совершается за счет источника, энергия которого уменьшается на эту же величину. В данной цепи (см. рис. 1.2) на участке $v - \Gamma$ электрическая энергия преобразуется в тепло.

Аналогично по формуле (1.8) мощность в источнике питания может быть охарактеризована как скорость преобразования какой-либо энергии в электрическую, так как энергия, сообщаемая источнику, рассеивается во всей электрической цепи.

Если на участке цепи не содержится ЭДС, формулы для работы и мощности участка цепи можно записать следующим образом:

$$A_{v\Gamma} = R_{v\Gamma} I^2 t = \frac{U_{v\Gamma}^2}{R_{v\Gamma}} t;$$

$$P_{v\Gamma} = R_{v\Gamma} I^2 = \frac{U_{v\Gamma}^2}{R_{v\Gamma}}.$$

Рассмотрим особенности работы электрических цепей.

1.2.4. Режимы работы электрической цепи

Из всех возможных режимов работы электрической цепи и ее элементов наиболее характерными являются номинальный режим, режим холостого хода, режим короткого замыкания и согласованный режим.

Номинальный режим источников и приемников в цепи характеризуется тем, что токи, напряжения и мощности их соответствуют тем значениям, на которые они рассчитаны заводами-изготовителями. При этом гарантируются наилучшие условия работы (экономичность, долговечность и т. д.).

Режим холостого хода — режим электрической цепи или отдельных источников или приемников, при котором ток в них равен нулю. Для практического осуществления такого режима достаточно отключить один из проводов этой цепи. Режим холостого хода источника может быть использован для измерения его ЭДС. Действительно, из выражения (1.7) $U_{x,x} = E$ при $I_{x,x} = 0$.

Режим короткого замыкания — уменьшение сопротивления между двумя точками, к которым подключен какой-либо участок цепи, во много раз меньше номинального, практически до нуля. При этом $U_{к.з} = 0$. При коротком замыкании источника

$$I_{к.з} = \frac{E}{R_b}$$

Согласованный режим — это режим, при котором сопротивление внешней цепи равно внутреннему сопротивлению источника. При согласованном режиме во внешней цепи развивается наибольшая мощность, возможная при данном источнике.

1.2.5. Энергетические соотношения в цепях постоянного тока

Рассмотрим простейшую цепь, состоящую из источника ЭДС с внутренним сопротивлением R_b и приемника с сопротивлением R (рис. 1.8, а).

Умножением всех членов выражения (1.7) на I получим уравнение баланса мощностей

$$EI = UI + I^2 R_b,$$

или

$$P_1 = P_2 + P_3.$$

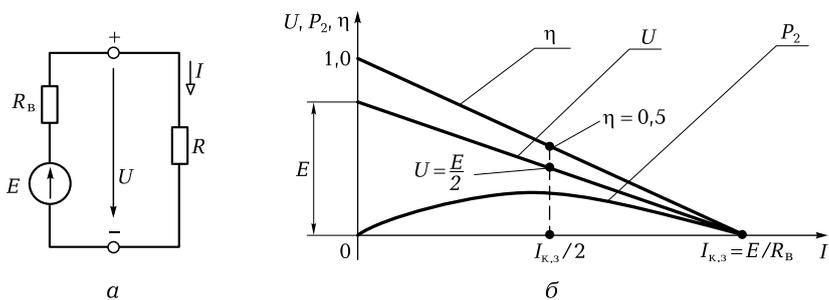


Рис. 1.8. Схема электрической цепи (а) и зависимость КПД, напряжения и мощности на приемнике от режимов работы электрической цепи (б)

Согласно этим уравнениям, вся развиваемая источником мощность $P_1 = IE$ состоит из мощности, отдаваемой источником энергии во внешнюю цепь $P_2 = IU$, и потерь мощности внутри источника $P_3 = I^2 R_B$.

При холостом ходе ток нагрузки равен нулю, а при коротком замыкании имеет максимальное значение.

Мощность, развиваемая источником, $P_1 = IE$ при изменении сопротивления нагрузки растет пропорционально току и достигает наибольшего значения при коротком замыкании.

Мощность внешней цепи:

$$P_2 = I^2 R = \frac{E^2}{(R_B + R)^2} R,$$

равна нулю при холостом ходе и при коротком замыкании. Эта мощность имеет максимальное значение, когда величина дроби

$$\frac{R}{(R_B + R)^2} \text{ максимальна.}$$

Анализ показывает, что это обеспечивается при $R = R_B$.

Следовательно, мощность внешней цепи максимальна, когда сопротивление внешней цепи равно внутреннему сопротивлению источника, т. е. когда внешняя цепь и источник работают в согласованном режиме.

При этом половина мощности теряется внутри источника:

$$I^2 R_B = I^2 R = \frac{EI}{2}.$$

Коэффициент полезного действия источника равен отношению мощности во внешней цепи P_2 к мощности P_1 , развиваемой источником:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I^2 R}{I^2 (R + R_B)} = \frac{R}{R + R_B} = \frac{1}{1 + R/R_B}. \quad (1.10)$$

Из выражения (1.10) видно, что при $R = \infty$, т. е. при холостом ходе КПД $\eta_{x.x} = 0$, а при коротком замыкании, когда $R = 0$, $\eta_{к.з} = 0$.

Если $R = R_B$ (согласованный режим), $\eta_{\text{согл}} = 0,5$.

На рис. 1.8, б приведены зависимости: η , U , $P_2 = f(I)$.

Когда необходимо обеспечить максимальную мощность независимо от экономических затрат (значения КПД), источники работают в согласованном режиме. Такой режим характерен для устройств автоматики, где мощности управляемых сигналов малы. Для силовых установок, которые работают в режимах $R \gg R_B$, т. е. близких к режиму холостого хода, важен КПД.

1.3. ЗАКОНЫ КИРХГОФА. РАСЧЕТ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

1.3.1. Законы Кирхгофа

Состояние электрической цепи полностью определяется двумя законами Кирхгофа. По *первому закону Кирхгофа* алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в любом узле электрической цепи, равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (1.11)$$

При этом токи, направленные к узлу, берутся с одним произвольно взятым знаком, а от узла — с другим. Например, для узла, изображенного на рис. 1.9, $I_2 + I_4 + I_5 - I_3 - I_1 = 0$.

Это выражение может быть записано по-другому:

$$I_2 + I_4 + I_5 = I_1 + I_3,$$

т. е. сумма токов, направленных к узлу, равна сумме токов, направленных от узла.

Первый закон Кирхгофа является следствием непрерывности тока и неизменности зарядов в узлах электрической цепи.

Согласно *второму закону Кирхгофа* в любом замкнутом контуре алгебраическая сум-

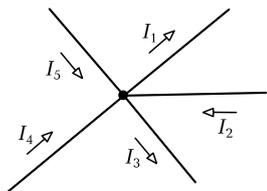


Рис. 1.9. Узел электрической цепи для пояснения первого закона Кирхгофа

ма напряжений на элементах контура равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре:

$$\sum_{k=1}^{k=m} I_k R_k = \sum_{k=1}^{k=n} E_k. \quad (1.12)$$

При этом положительными ЭДС и напряжениями считаются те, которые совпадают с произвольно выбранным направлением обхода контура. Так, для контура, представленного на рис. 1.10, при его обходе по направлению движения часовой стрелки имеем

$$-I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 - I_4 R_4 = E_1 - E_3.$$

Приведенные законы Кирхгофа позволяют рассчитать любую электрическую цепь.

1.3.2. Расчет электрических цепей постоянного тока

Задачей расчета электрической цепи обычно является определение токов, напряжений и мощностей всех или части ветвей цепи при известных элементах, составляющих цепь, и ее конфигурации. Классическим приемом расчета сложных электрических цепей является непосредственное применение законов Кирхгофа. Все остальные методы расчета основаны на этих фундаментальных законах электротехники.

Расчет цепей с помощью законов Кирхгофа. Рассмотрим применение законов Кирхгофа для расчета схемы, приведенной на рис. 1.11. Сопротивления и ЭДС, входящие в нее, известны. Выберем произвольно направления токов в ветвях так, как это показано на рис. 1.11.

Для определения всех токов по законам Кирхгофа необходимо составить столько уравнений, сколько существует неизвестных токов. В приведенной на рис. 1.11

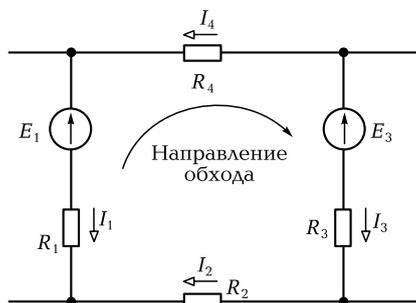


Рис. 1.10. Контур электрической цепи для пояснения второго закона Кирхгофа

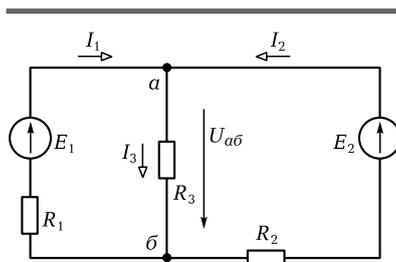


Рис. 1.11. Схема для расчета цепи с помощью законов Кирхгофа

схеме их три. Однако число уравнений, которые можно составить по законам Кирхгофа, всегда больше числа неизвестных токов, т. е. часть уравнений является следствием остальных.

Установим, какое число уравнений системы можно составить, пользуясь первым законом Кирхгофа. Для этого зададим произвольное направление токов отдельных ветвей схемы, считая положительными токи, направленные к узлам, а отрицательными — от узлов. Для узлов схемы a и b запишем:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0; \quad (1.13)$$

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0. \quad (1.14)$$

На основании второго закона для трех контуров, обходя их по направлению движения часовой стрелки, можно записать:

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = E_1; \quad (1.15)$$

$$-I_2 R_2 - I_3 R_3 = -E_2; \quad (1.16)$$

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 = E_1 - E_2. \quad (1.17)$$

Но правильно составленные уравнения для всех узлов и контуров не дают решения задачи: уравнение (1.14) получается умножением уравнения (1.13) на -1 , а уравнение (1.17) — сложением уравнений (1.15) и (1.16).

Для того чтобы расчетные уравнения были независимыми, при их составлении необходимо выполнить два условия.

1. Число уравнений по первому закону Кирхгофа должно быть на единицу меньше числа узлов, так как значения тока каждой ветви схемы дважды входят в уравнение узлов. Поэтому уравнение для последнего узла будет содержать уже все вошедшие ранее значения токов.

2. Недостающие уравнения составляют по второму закону Кирхгофа. При этом следует выбирать наиболее простые контуры в таком порядке, чтобы в каждом новом контуре содержалась по крайней мере одна ветвь, не входившая в контуры, для которых уже составлены уравнения.

Совместное решение полученных трех уравнений позволяет определить токи схемы, а затем и напряжения на отдельных участках. Если значение какого-либо тока окажется отрицательным, из этого следует, что действительное направление тока противоположно предполагаемому в начале расчета направлению.

Для проверки правильности расчетов можно использовать условие баланса мощностей: алгебраическая сумма мощностей, развиваемая источниками, должна быть равна мощности всех приемников:

$$\sum_{k=1}^n E_k I_k = \sum_{k=1}^n I_k^2 R_k.$$

Если у какого-либо источника электрической энергии действительное направление тока противоположно направлению ЭДС, мощность такого источника следует считать отрицательной — он является не источником, а приемником энергии (например, аккумулятор).

Законы Кирхгофа позволяют рассчитать любую электрическую цепь, но при этом число решаемых уравнений может быть велико. Число уравнений может быть сокращено применением специальных расчетных приемов — методов контурных токов, двух узлов и др.

Метод контурных токов. Этот метод основан на применении второго закона Кирхгофа. Под контурными токами понимаются условные токи для каждого контура, где имеется ветвь, входящая только в данный контур. Для этих условных токов в схеме произвольно выбирают направления и составляют уравнения по второму закону Кирхгофа. Число уравнений сокращается до числа рассматриваемых контуров. Действительные токи ветвей определяются через контурные токи смежных контуров.

Метод двух узлов. Этот метод применяется для схем, в которых несколько источников и приемников электрической энергии включаются параллельно и имеется только два узла, например, *a* и *b* на рис. 1.11.

По этому методу по известным параметрам ветвей определяют напряжение U_{ab} между узлами и находят токи ветвей.

Напряжение между узлами при наличии m ветвей определяют по формуле

$$U_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{E_i}{R_i}}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{R_i}},$$

где E_i , R_i — ЭДС и сопротивления i -х ветвей.

При этом ЭДС E_i берутся со знаком плюс, если они направлены к узлу *a*.

Токи ветвей I_i определяют по закону Ома через напряжение между узлами:

$$I_i = \frac{E_i - U_{ab}}{R_i}.$$

Метод двух узлов широко используется для практических расчетов.

1.4. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.4.1. Общие положения

Нелинейными электрическими цепями называются цепи, в которых содержится хотя бы один нелинейный элемент. Как отмечалось в подразд. 1.1, нелинейными являются такие элементы, параметры которых зависят от тока, напряжения и др. Их вольт-амперные характеристики $I(U)$ отличаются от прямой линии. Практически все элементы электрических цепей являются нелинейными. Однако параметры R , L , C могут считаться линейными в ограниченных пределах изменения температуры, напряжений и токов.

Различают неуправляемые нелинейные элементы (лампы накаливания, газотроны, полупроводниковые диоды и др.), которые характеризуются одной вольт-амперной характеристикой $I(U)$, и управляемые. У последних (многоэлектродные лампы, транзисторы, тиристоры и др.) имеется семейство характеристик $I(U)$, зависящих не только от тока и напряжения, но и от управляющего воздействия. Заметную группу среди нелинейных элементов занимают управляемые и неуправляемые полупроводниковые приборы.

Использование нелинейных элементов в электрических цепях позволяет получить в них явления, невозможные в линейных цепях: автоколебания, модуляцию и демодуляцию сигналов, умножение и деление частот, преобразование рода тока (переменного в постоянный, и наоборот), стабилизацию напряжения и тока и т. д.

Нелинейный резистивный элемент обозначается на схемах так, как это показано на рис. 1.12, а. Его сопротивление зависит от напряжения или тока. Различают статическое сопротивление $R_{ст} = \frac{U}{I}$ и динамическое сопротивление $R_d = \frac{dU}{dI}$ нелинейного элемента. Из рис. 1.12, б видно, что $R_{ст}$ определяется тангенсом угла α , а R_d — тангенсом угла β .

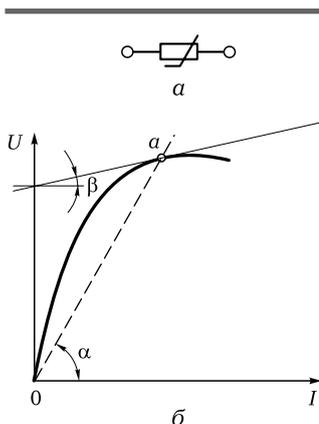


Рис. 1.12. Нелинейный элемент:

а — графическое изображение; б — определение статического и динамического сопротивлений

1.4.2. Расчет нелинейных цепей постоянного тока

Законы Кирхгофа справедливы для линейных и нелинейных цепей, поэтому они могут быть использованы и для расчета нелинейных цепей. Однако к нелинейным цепям не может быть применен принцип наложения (суперпозиции). Поэтому к ним нельзя применять методы расчета линейных цепей постоянного тока, которые используют этот принцип, в том числе метод контурных токов.

Обычно расчет нелинейных цепей постоянного тока осуществляют графоаналитическими способами. В последовательных (рис. 1.13, а) и параллельных (рис. 1.13, б) нелинейных цепях для расчета токов и напряжений на отдельных участках по известным вольт-амперным характеристикам (рис. 1.13, в и г) элементов строится результирующая вольт-амперная характеристика всей цепи. При этом в последовательной цепи результирующая характеристика $I(U)$ получается суммированием значений абсцисс (напря-

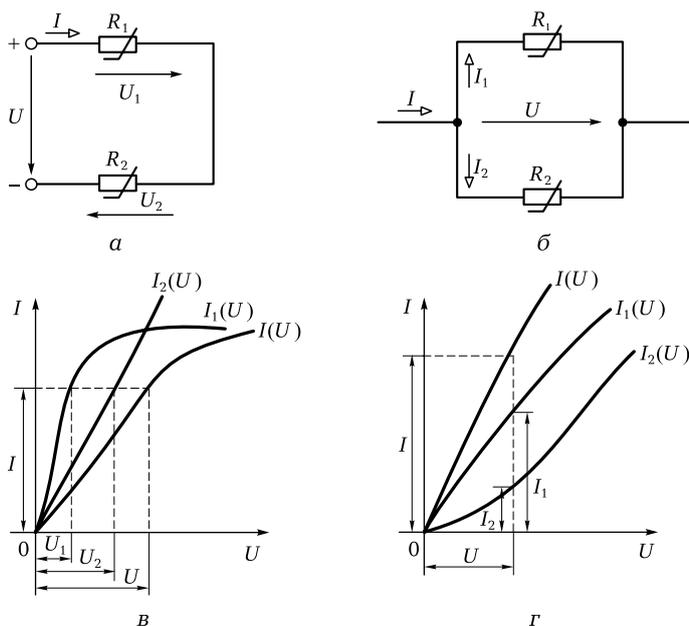


Рис. 1.13. Нелинейные цепи постоянного тока и их вольт-амперные характеристики:

а — последовательная цепь; б — параллельная цепь; в и г — результирующие вольт-амперные характеристики

жений) при последовательно задаваемых произвольных токах (см. рис. 1.13, *в*), так как во всех элементах цепи протекает один и тот же ток. В параллельном соединении при нахождении результирующей зависимости $I(U)$ — наоборот (см. рис. 1.13, *г*), так как к каждому элементу прикладывается одно и то же напряжение. Токи и напряжения в элементах цепи определяются по результирующим характеристикам $I(U)$ и заданному напряжению цепи (см. рис. 1.13, *а...г*).

При расчете нелинейных цепей со смешанным (последовательно-параллельным) соединением элементов вначале строят вольт-амперную характеристику параллельного участка цепи. В результате образуется нелинейная цепь с последовательным соединением элементов, для которой строят результирующую характеристику $I(U)$ всей цепи так, как было описано ранее. По ней и приложенному к цепи напряжению определяют напряжения на последовательных элементах и все токи.