

ПРЕДИСЛОВИЕ

Бакалавры, специалисты и магистры неэлектротехнических направлений работают с электротехническими и электронными устройствами, которые применены в разнообразных отраслях промышленности. Не зная основ электротехники и электроники, нельзя решать технологические задачи, обеспечить высокое качество продукции, эффективность процесса ее производства и безопасность. В пособии изложен теоретический материал, необходимый для электротехнической подготовки студентов неэлектротехнических направлений. Даны многочисленные примеры использования устройств, по которым можно судить о возможностях современной электротехники и электроники в любой отрасли.

Пособие состоит из трех частей: I — Электрические и магнитные цепи, II — Основы электроники, III — Электрические машины и аппараты, электропривод и электроснабжение. Главы 9, 10 и приложение написаны Волковым Ю. С. Остальные главы написаны совместно авторами. Для каждой части приведены условные графические и буквенные обозначения. Глава завершается материалами для закрепления и самопроверки. В конце пособия даны список литературы и перечень основных понятий и терминов, в основном тексте выделенных **полужирным шрифтом**.

В результате изучения этой дисциплины студент должен: знать основные понятия, законы, принципы действия, назначение и области применения типовых устройств; приобрести навыки чтения простейших электрических схем; научиться проводить оценки типовых режимов работы установок, принимать решения по практическому применению устройств и технически грамотно ставить задачи специалистам по электротехнике и электронике.

Авторы выражают глубокую признательность проф. Щедрину О. П. за помощь и ценные советы.

ВВЕДЕНИЕ

Предметом дисциплины «Электротехника и электроника» является применение **электромагнитных явлений** для преобразования энергии, информации и вещества.

Магнитные явления, известные с древности, первым начал изучать У. Гильберт (1600). Большой вклад в исследование электрических и магнитных явлений внесли М. В. Ломоносов и Б. Франклайн. В конце XVIII в. Ш. О. Кулон открыл законы взаимодействия электрических зарядов и магнитных полюсов, А. Вольта изобрел гальванический элемент.

В первой половине XIX в. было изучено химическое, световое, тепловое и магнитное действие тока, а также силовое и индукционное действие магнитного поля. Г. Х. Эрстед в 1820 г. показал, что магнитное поле создается током, затем А. М. Ампер установил законы силового взаимодействия токов. Вращающееся магнитное поле наблюдал Д. Ф. Араго (Франция, 1824).

Электротехника как наука родилась в 1831 г., когда М. Фарадей открыл, что изменяющееся магнитное поле создает электрическое, и выявил единство электромагнитных явлений. Дж. Генри (США) исследовал электромагниты, изучил явление самоиндукции. Работы Кулона, Эрстеда, Ампера, Фарадея и других ученых заложили ту экспериментальную основу, на которой была произведена последующая математизация электротехники и созданы математические модели явлений, процессов и устройств.

Г. С. Ом обнаружил линейную связь между напряжением и током для ряда материалов. В 1847 г. Г. Р. Кирхгоф установил законы цепей, носящие его имя. Теорию электромагнетизма в 1873 г. обобщил Дж. К. Максвелл.

Немецкий физик В. Э. Вебер (1804–1891) разработал систему электрических и магнитных единиц. В 1886 г. Г. Герц открыл электромагнитные волны. С. Аррениус объяснил электропроводность раствора тем, что в нем молекулы растворимого вещества распадаются на заряженные ионы.

Практическое применение знаний об электромагнитных явлениях постоянно расширялось. Было установлено, что электрическая энергия способна производить работу, например нагревать материалы или перемещать объекты. Первыми источниками электрической энергии послужили химические батареи. В. В. Петров изучал пробой диэлектрической жидкости и

электрическую дугу, предсказал большое будущее электронагреву. Э. Х. Ленц экспериментально обосновал тепловое действие тока, исследовал явление электромагнитной индукции, открыл обратимость электрических машин.

В 1838 г. Б. С. Якоби с помощью двигателя постоянного тока преобразовал электрическую энергию химической батареи в механическую работу гребного винта шлюпки и тогда же положил начало технологическому применению гальванотехники. З. Т. Грамм в 1870 г. разработал машинный генератор постоянного тока, преобразующий механическую энергию в электрическую.

Цепи переменного тока в 1876 г. были освоены П. Н. Яблочковым. В этих цепях производилась энергия переменного тока, которая трансформаторами распределялась между лампами.

Позднее трансформаторы были усовершенствованы О. Блати, М. Дерном и др. Изучение ферромагнитных материалов начал А. Г. Столетов. Заметный вклад в развитие средств электроснабжения внесли Ф. А. Пироцкий и Д. А. Лачинов.

В 1888 г. Н. Тесла дал научное описание вращающегося магнитного поля, получил патенты на электрические машины и системы передачи электроэнергии переменного тока. В том же году М. О. Доливо-Добровольский создал первый трехфазный генератор переменного тока с вращающимся магнитным полем, предложил асинхронный трехфазный двигатель с ротором из литого железа с насаженным медным цилиндром. В 1891 г. он построил трехфазную цепь, содержащую генератор, трансформатор, линию передачи и асинхронный двигатель.

Электромагнитные явления стали основой новых технологий. Известны работы П. Н. Яблочкова и А. Н. Лодыгина по осветительным приборам, Н. Н. Бенардоса и Н. Г. Славянова — по электросварке, А. С. Попова — по радиосвязи. По предложению В. Н. Чиколова в России с 1880 г. началось издание журнала «Электричество».

Профессор Санкт-Петербургского технологического института Р. Э. Ленц в 1884 г. выделил электротехнику в самостоятельную дисциплину (до этого она преподавалась в курсе физики). В России преподавание электротехники в вузах началось в 1904–1905 гг. почти одновременно в Санкт-Петербурге (В. Ф. Миткевич) и в Москве (К. А. Круг). Первая отечественная книга по электротехнике — работа К. А. Круга «Основы электротехники» (1916).

Имена великих ученых увековечены в названиях законов, единиц измерения, приборов и устройств.

В начале XX в. родилась электроника, в которой используются электромагнитные явления в различных средах. Производственные задачи стали решаться совместным использованием электрических и электронных устройств.

Электротехника изучает процессы и устройства для производства, передачи, преобразования и применения электрической энергии; представляет математическое описание (математические модели) процессов и устройств. Работа электротехнических устройств основана на процессах, сопровождающих токи в проводниках.

Электроника изучает применение электромагнитных процессов, протекающих в вакууме, газах, полупроводниках и на границах некоторых сред. Эти процессы отличаются быстродействием, высокой управляемостью и возможностью различных взаимных преобразований.

На рубеже XIX–XX вв. завершился начальный этап создания электрических устройств. **Электрическая энергия** стала одним из продуктов производства и товаром. Увеличивалась ее выработка, началась широкая электрификация развитых стран, возрастал выпуск электротехнических и электронных устройств различного назначения. Машинная и автоматическая технология производства потребовала большего количества энергии, которую считают движущей силой народного хозяйства, мерилом технического развития государства. Это объясняется тем, что электрическая энергия по сравнению с другими формами энергии обладает рядом достоинств. Ее передача на расстояние по проводам производится почти мгновенно и не сопровождается дорогостоящим переносом вещества. Устройства для прямого и обратного преобразования электрической энергии в иные формы (механическую, тепловую,лучистую и др.) отличаются простотой, управляемостью, высоким КПД. При потреблении электрической энергии окружающая среда не загрязняется.

Однако при производстве электроэнергии, особенно на тепловых станциях, природе наносится ущерб. Электрическую энергию нельзя накапливать в больших количествах, поэтому равны мощности ее производства и потребления. При использовании электроустановок требуется строго соблюдать технику безопасности. Электрические и электронные устройства создают электромагнитные помехи, осложняющие работу средств связи и управления.

В природе нет естественных источников электрической энергии. В электрическую форму преобразуется кинетическая энергия рабочих сред, в которую переходит химическая энергия топлива, потенциальная энергия воды в поле тяготения Земли, ядерная энергия. Соответственно электроэнергиярабатывается на тепловых электростанциях, гидравлических и атомных. Доля энергии, получаемой из возобновляемых источников (ветра, морских волн, подземного тепла, солнечного излучения), пока невелика.

Среди всех энергоресурсов электрическая энергия составляет около 30%. Примерно 70% этой энергии расходуется в промышленных отраслях, 30% — в коммунально-бытовых. Электрическая энергия потребляется во всем народном хозяйстве, но главным образом в металлургии, химической промышленности, машиностроении, на транспорте. Непрерывно растет энергооруженность труда, без чего невозможно повысить производительность. В промышленности более 60% всей электроэнергии приходится на механическую работу, 15% — на нагрев, 10% — на освещение. Около 15% расходуется на технологические процессы, в ряде которых электромагнитные явления действуют непосредственно. Велико значение электромагнитных процессов в преобразовании и перемещении вещества, обработке информации, измерениях, управлении, охране природы...

Без электрификации невозможны механизация, автоматизация, роботизация, информатизация производства. Любая крупная авария в системе электроснабжения напоминает о том, что электрическая энергия — важнейшая из основ современной цивилизации. Электротехнические и электронные устройства просто согласуются друг с другом, причем первые обычно служат средствами преобразования энергии, а вторые — для управления и обработки информации. Применение таких устройств позволяет существенно улучшить условия труда, повысить качество продукции и показатели процессов производства.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
И МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

1.1. ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЦЕПИ. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Электрический заряд — главный «участник» электромагнитных явлений, протекающих в электрических и электронных устройствах.

Количество электрического заряда q , положительного или отрицательного, измеряют в кулонах (Кл). Сокращения единиц измерения, названных в честь великих ученых, пишут с прописной (большой) буквы.

Согласно закону Кулона неподвижные одноименные заряды отталкиваются, а разноименные — притягиваются. Чтобы объяснить такое дальнодействие зарядов, считают, что каждый из них создает вокруг себя электрическое поле. На рис. 1.1 a показаны векторы напряженности \mathbf{E} такого поля от положительного заряда $+q_1$, на рис. 1.1 b — от отрицательного $-q_1$. Векторы напряженности электрического поля \mathbf{E} от положительного заряда радиально расходятся, а к отрицательному заряду сходятся.

На положительный заряд $+q_2$ (рис. 1.1 a) поле действует силой \mathbf{F} , совпадающей с вектором напряженности \mathbf{E} , на отрицательный заряд $-q_3$ — силой, направленной встречно этому вектору.

В равномерном электрическом поле, например в проводе, векторы напряженности \mathbf{E} параллельны друг другу (рис. 1.1 c). Свободные носители зарядов перемещаются в поле под действием сил F : носители положительного заряда $+q$ — в направлении поля \mathbf{E} , носители отрицательного $-q$ — в противоположном.

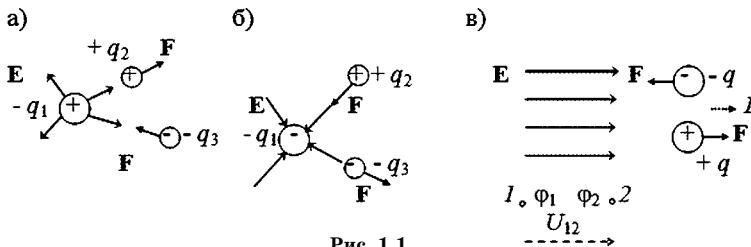


Рис. 1.1
Электрическое поле:

a — радиальное от положительного заряда; b — радиальное от отрицательного; c — равномерное.



Такое направленное движение свободных зарядов создает **ток I** . Если через провод за 1 с переносится заряд 1 Кл, то ток I равен 1 А (амперу).

Согласно стандарту величины не изменяющиеся во времени пишут с прописных букв — например, ток I .

Точкам 1 и 2 поля соответствуют потенциалы φ_1 и φ_2 (рис. 1.1 σ). **Напряжение** между точками $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$. Стрелка напряжения направлена от точки 1 с высоким потенциалом φ_1 к точке 2 с низким потенциалом φ_2 , т. е. совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд. Любое **напряжение** — это отношение работы переноса заряда между точками к самому заряду. Напряжение U_{12} равно 1 В (вольту), если при перемещении между точками заряда 1 Кл работа составляет 1 Дж (дюоуль), т. е.

$$1 \text{ В} = 1 \text{ Дж}/1 \text{ Кл}.$$

Абсолютная величина напряженности поля $|E| = U_{12}/l_{12}$, где l_{12} — расстояние между точками 1 и 2; размерность напряженности В/м.

В **электрической цепи** постоянный ток сосредоточен в узкой области пространства, где размещены материалы, содержащие свободные заряды. Электрическое поле порождает в этих материалах ток.

Основные части цепи — источники **электрической энергии** (источники питания), ее приемники (нагрузка) и соединяющие их провода.

Источники питания преобразуют энергию иных форм в электрическую, например генераторы — механическую энергию в электрическую, аккумуляторы — химическую в электрическую. В **приемниках** протекают обратные процессы: нагреватель преобразует электрическую энергию в тепловую, осветительная лампа — в лучистую, электродвигатель — в механическую. Все преобразования возможны в цепи, создающей замкнутый путь для тока.

Схема — отображение электроустановки на бумажном, электронном или другом носителе. Установку изображают условными графическими и цифробуквенными обозначениями входящих в нее частей, а также их связей. Такие обозначения заданы стандартами. На структурной схеме показывают только основные части и связи, на монтажной — расположение частей и способы их соединения. Принципиальная (полная) схема содержит все части и связи, что позволяет понять, как действует установка, производить ее наладку, контроль и ремонт. На принципиальной схеме все устройства помечают цифробуквенными обозначениями, три составляющие которых соответствуют типу устройства, его номеру и функции. На простых схемах тип обозначают одной буквой. Номер обязателен, если на схеме есть несколько одинаковых устройств.

Например, на принципиальной схеме цепи (рис. 1.2 a) показаны аккумулятор GB , служащий источником энергии постоянного тока, и лампа накаливания EL , преобразующая электрическую

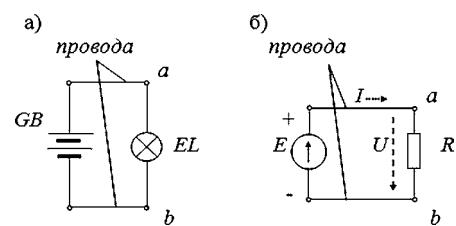


Рис. 1.2
Схемы цепи:
 a — принципиальная; b — замещения.

энергию в лучистую. С помощью разъемных зажимов оба устройства соединены проводами в замкнутую цепь.



На схеме замещения цепь представляют идеальными источниками электродвижущей силы (ЭДС) и резистивными элементами. Конструктивные и прочие особенности устройств не учитывают. Схема замещения служит для расчета цепи, по ней строят математическую модель цепи.

На рис. 1.2б изображена простейшая схема замещения, на которой представлены идеальный источник ЭДС (слева) — аккумуляторная батарея и резистивный элемент (справа) — лампа накаливания.

Процессы в цепи и схеме замещения описывают понятиями *электродвижущая сила, напряжение и ток*.

На зажимах источника ЭДС существуют свободные положительные (+) и отрицательные (−) заряды. Стрелка ЭДС E всегда направлена от отрицательного зажима к положительному (рис. 1.2б). Благодаря этим зарядам на зажимах возникает напряжение U , а во внешней части цепи, т. е. в проводах и резистивном элементе, — электрическое поле и ток проводимости I .



ЭДС способна создать ток в замкнутой цепи. Действительным направлением тока считают направление движения *положительного заряда*, указываемое пунктирной стрелкой.

В идеальном источнике ЭДС не зависит от тока. Стрелка ЭДС E показывает направление сторонней силы (неэлектрического происхождения), действующей на положительный заряд внутри источника. Сторонняя сила, не подчиняющаяся закону Кулона, перемещает положительный заряд в источнике от его отрицательного зажима к положительному. В результате заряд приобретает энергию. Такая энергия, полученная зарядом 1 Кл и представленная в джоулях (Дж), численно равна ЭДС E , которая выражается в вольтах (В).

Отображаемые схемами замещения цепи, которые содержат так называемые источники тока, встречаются редко и потому здесь не рассматриваются.

Резистивный элемент представляет часть цепи, нагреваемую проходящим током. Свечение лампы накаливания (рис. 1.2а) вызвано нагревом ее нити током I , на схеме замещения (рис. 1.2б) лампа обозначена резистивным элементом R . Энергия положительного заряда 1 Кл, полученная в источнике ЭДС, в данном элементе совершает работу, нагревая его. Количество тепла в джоулях, выделенного при переносе заряда 1 Кл через резистивный элемент, численно равно напряжению U в вольтах (В). Это напряжение означает возможность совершения работы.

Итак, в данном случае источник ЭДС — это генератор электрической энергии, а резистивный элемент — приемник (нагрузка), преобразующий ее в тепло. В генераторе совпадают направления ЭДС и действительного тока, а на резистивном элементе — направления тока и напряжения. По закону сохранения энергии для положительного заряда 1 Кл, перенесенного по замк-



Рис. 1.3
Источники ЭДС:
а — аккумуляторы; б — солнечные батареи; в — машинные генераторы постоянного тока.

нутой цепи, энергия E , полученная им в источнике ЭДС, равна его работе U на резисторе:

$$E = U. \quad (1.1)$$



ЭДС возникает при преобразовании в электрическую энергию химической, механической, тепловой или лучистой энергии либо электрической энергии другого вида.

На схемах замещения обозначению источника ЭДС (рис. 1.2б) соответствуют аккумулятор, химическая батарея, топливный элемент, солнечная батарея, машинный генератор постоянного тока, выпрямитель (рис. 1.3).

На ряде производств есть сети постоянного тока, напряжение в них установлено стандартом: 27, 110, 220, 440 В, а также 6, 12, 24 и 36 В.



Резистивным элементом на схемах замещения представляют часть цепи, в которой электрическая энергия преобразуется в тепловую или лучистую, например **резистор**, осветительный либо нагревательный прибор.

Тепловое действие тока объясняется тем, что носители заряда, сталкиваясь с атомами проводящего вещества, передают им свою кинетическую энергию, полученную от поля между двумя столкновениями. Провода обычно не учитывают, резистивными элементами представляют лишь особо длинные из них.

1.2. МАТЕРИАЛЫ И СРЕДЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ И УСТРОЙСТВАХ

В общем случае в цепях (и устройствах) применяют следующие материалы и среды: 1) проводящие; 2) электроизоляционные и диэлектрические; 3) ферромагнитные (см. гл. 2); 4) полупроводниковые (см. ч. II).

Проводящие материалы и среды, содержащие свободные носители заряда, могут быть в твердом, жидком или газообразном состоянии. К твердым материалам относят металлы, сплавы, некоторые виды металлокерамики, графит. В этих материалах заряд переносится свободными электронами, которые заряжены отрицательно и движутся в направлении, обратном току. Способность пропускать ток зависит от количества свободных электронов в единице объема проводника, которое задает удельное сопротивление материала. У большинства металлов удельное сопротивление растет с нагреванием.

Из проводниковых материалов — меди и алюминия, отличающихся низким удельным сопротивлением, изготавливают провода, линии электропередачи, жилы кабелей, обмотки устройств. Части цепи подключают друг к другу *соединительными проводами*. Если они нагреваются незначительно, то на схемах замещения (рис. 1.2б) их изображают отрезками прямых линий. Из сплавов высокого сопротивления (никрома, константана и др.) изготавливают проволочные резисторы, нагревательные приборы. Удельное сопротивление константана и манганина незначительно изменяется с нагревом.

Применяют **резисторы** постоянного и переменного сопротивления. Для больших токов постоянные резисторы изготавливают из проволоки с высоким удельным сопротивлением (верхний прибор на рис. 1.4а). Резистор переменного сопротивления, управляющий током, называется **реостатом**, а изменяющий напряжение, — **потенциометром**. Проволочный реостат содержит неизолированную проволоку с высоким удельным сопротивлением, намотанную спиралью на фарфоровый цилиндр, и движок, скользящий по этой проволоке. Сопротивление между движком и любым концом проволоки зависит от положения движка (рис. 1.4б). При малых токах применяют углеродные постоянные резисторы (два нижних резистора на рис. 1.4а), а также переменные.

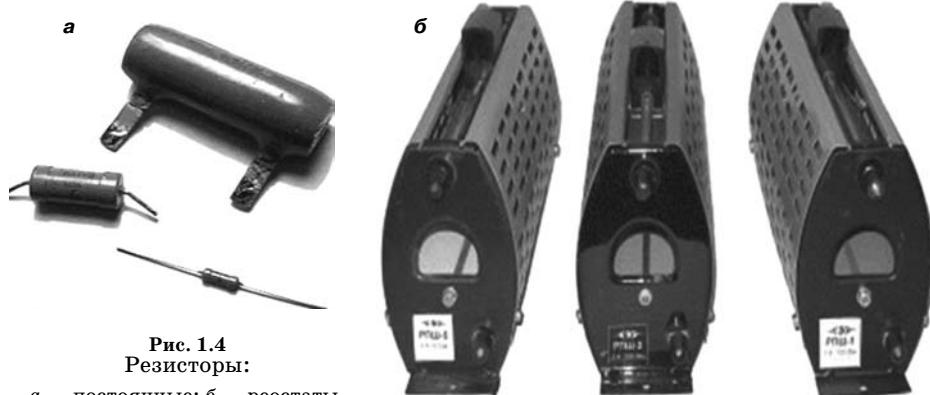


Рис. 1.4
Резисторы:

а — постоянные; б — реостаты.

Номинальные значения сопротивлений и мощности, при которых резисторы не выходят из строя из-за перегрева, стандартизованы.

Электропроводность растворов обеспечена движением в электрическом поле ионов, несущих положительные или отрицательные заряды. На такие ионы в растворителе распадаются молекулы растворенного вещества. Положительный и отрицательный зажимы химических источников питания соединены с электродами из разных материалов, погруженных в растворы. К таким источникам питания, которые работают в переносных устройствах, относят батареи, используемые однократно, и перезаряжаемые аккумуляторы.

Плазма — это горячая газообразная проводящая среда, в которой атомы ионизованы, например после электрического пробоя газа. При подаче электрического поля заряд в плазме переносится свободными электронами и положительно заряженными ионами. Плазменное состояние вещества широко используется в технологических процессах, например при электросварке.

В **диэлектриках** отсутствуют свободные носители заряда, при подаче поля ток не возникает, поэтому такие материалы служат для **изоляции**. У диэлектрических и электроизоляционных материалов удельное сопротивление очень велико. Электрической прочностью материала или среды названа пробивная напряженность поля $U_{\text{пр}}/h$, где $U_{\text{пр}}$ — напряжение, при котором наступает электрический пробой и теряются изолирующие свойства материала; h — его толщина. Эти свойства сохраняются при нагреве до определенной температуры. Ухудшение свойств изоляции — частая причина отказа оборудования.

В качестве электроизоляционных сред и материалов используют:

- вакуум и газы;
- минеральные и растительные масла, синтетические жидкости;
- волокнистые (бумага, картон) и слоистые (текстолит) материалы;
- резину, полимеры, пластмассы и изоляторы, пропитанные реактивными смолами;
- лаки и эмали;
- неэлектропроводную керамику;
- материалы на основе слюды.

Твердым изолятором обычно покрыты соединительные провода.

1.3. РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Состояние электрической цепи характеризуется *режимом* работы, т. е. ЭДС, напряжением и током на всех участках цепи.

Если в цепи долгое время не было никаких изменений, то возникает *установившийся режим*. ЭДС E , напряжение U и ток I от времени не зависят. В переходном режиме эти величины изменяются от исходного установившегося состояния до конечного.

Различают также рабочий (нормальный) и аварийный режимы цепи. В последнем напряжение или ток выходит за установленные пределы, что вызвано, в частности, обрывами проводов либо короткими замыканиями.

Короткое замыкание — недопустимое перемыкание цепи, например, при случайном касании двух питающих проводов, повреждении изоляции в приемнике, из-за ошибок при работе с оборудованием. Если не отключить источник питания, то ток в цепи многократно возрастает, что приводит к перегреву, порче установки, возгоранию, пожару.

На холостом ходу источник питания разомкнут, а ток в цепи равен нулю. Такой режим возникает при отключении нагрузки или обрыве проводов.

Величины, описывающие режим, изменяются в широких пределах. От основных единиц измерения (ампер А и вольт В) с помощью приставок образуют кратные единицы. Основную единицу приставкой к (кило) увеличивают в тысячу раз, приставкой М (мега) — в миллион раз. Приставкой м (милли) основную единицу уменьшают в тысячу раз, приставкой мк (микро) — в миллион раз. Малые токи действуют в измерительных и управляющих цепях, большие — в **силовых**. Цепи с напряжением ниже 1 кВ считаются низковольтными.

Чтобы включать и отключать устройства, следить за их состоянием и защищать оборудование от аварийных режимов, цепь оснащают дополнительными приборами и аппаратами.

1.4. ЛИНЕЙНЫЕ РЕЗИСТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Большинство устройств и частей цепи представляют на схемах замещения такими резистивными элементами, для которых справедлив закон Ома:

$$U = RI, \quad (1.2)$$

где $R = \text{const}$ — **сопротивление** элемента, выраженное в омах (Ом).



Закон Ома утверждает линейную зависимость напряжения от тока.

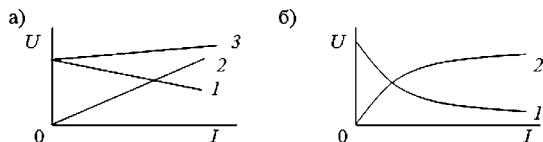
Этот элемент считают **линейным** (рис. 1.5а, прямая 2). Такие же элементы содержат участки цепи, которым свойственны линейные **вольт-амперные характеристики** (рис. 1.5а, прямые 1 и 3). **Нелинейные элементы** (рис. 1.5б) описывают криволинейными зависимостями $U = f(I)$.

Нагревательные приборы, провода, проволочные и углеродные резисторы соответствуют линейным элементам. С учетом выражений (1.1) и (1.2) ток для линейной схемы замещения (рис. 1.2б)

$$I = U/R = E/R. \quad (1.3)$$

Если выражение (1.1) умножить на ток I , то в левой части образуется произведение EI — **мощность** производства энергии источником ЭДС, а в правой произведение UI — мощность потребления энергии резистивным элементом. Мощность выражается в Вт (ватах) и более крупных единицах —

Рис. 1.5
Вольт-амперные
характеристики элементов:
а — линейных 1, 2, 3; б — нелиней-
ных 1, 2.



кВт, МВт и других — и измеряется ваттметром. Средняя мощность осветительных приборов — 20...100 Вт, стиральной машины — 2 кВт, двигателя троллейбуса — 50 кВт.

Если напряжение U выразить по закону Ома (2.2), то мощность преобразования в резисторе электрической энергии в теплоту

$$P = UI = RI^2. \quad (1.4)$$

Энергия, потребленная за время Δt , по закону Джоуля—Ленца

$$W = P\Delta t = RI^2\Delta t. \quad (1.5)$$

Если мощность дана в ваттах, а время в секундах, то размерность энергии — джоуль (Дж). Применяют более крупные единицы: кДж, МДж, а также Вт·ч, кВт·ч и др. Электрическую энергию измеряют счетчиком. Энергией 1 кВт·ч обладает вода массой 10 т, поднятая на высоту 40 м, или 200 г условного топлива; 1 кВт·ч требуется для выпечки 30 кг хлеба и выплавки 1,5 кг стали.

1.5. АНАЛИЗ ЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ЭДС. ЗАКОНЫ КИРХГОФА



Цепи, отображаемые схемами, в состав которых входят только линейные резистивные элементы, называются **линейными**.

Цепи (схемы), которые содержат один источник ЭДС, вырабатывающий энергию, и любое количество линейных резистивных приемников, могут быть разветвленными или неразветвленными.

В состав *разветвленной цепи* входят узлы и ветви. В **узле** сходятся более двух проводов. **Ветвь** — часть цепи, соединяющая два соседних узла, но сама не содержащая узлов.

На рис. 1.6 дан пример схемы разветвленной цепи. В ней на одно и то же напряжение U , т. е. к паре узлов a и b , параллельно подключены резистивные элементы $R_1, R_2, \dots, R_n, \dots, R_N$, на которых одинаковое напряжение U .



Реальный источник ЭДС (рис. 1.6) представлен схемой замещения, содержащей идеальный источник E и последовательный резистивный элемент $R_{\text{вн}}$, отображающий внутреннее сопротивление реального источника.

Между узлами a и b в ветвях с резисторами протекает соответственно ток $I_1, I_2, \dots, I_n, \dots, I_N$. Если принять, что напряжение U между узлами известно, то этот ток рассчитывают по закону Ома, например: $I_n = U/R_n$.



Ток I в источнике ЭДС можно найти по **первому закону Кирхгофа**.

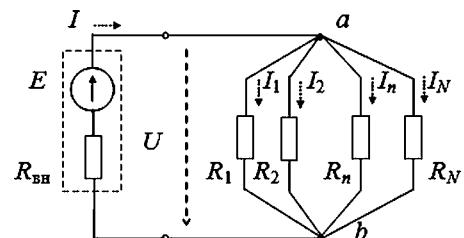


Рис. 1.6
Разветвленная цепь с одним источником ЭДС

Алгебраическая сумма всех N токов I_n , сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_1^N I_n = 0. \quad (1.6)$$

Это следует из закона сохранения электрического заряда. Ток, направленный к узлу, считают положительным, а от узла — отрицательным. Иными словами, сумма втекающих токов равна сумме вытекающих, например для узла a (рис. 1.6)

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n + \dots + I_N.$$

Если в последнее равенство подставить токи ветвей, выраженные по закону Ома, то

$$\begin{aligned} I &= U/R_1 + U/R_2 + \dots + U/R_n + \dots + U/R_N = \\ &= U(1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n + \dots + 1/R_N) = U/R_{\text{экв}}. \end{aligned}$$

Ток в источнике ЭДС не изменится, если все резистивные элементы заменить одним эквивалентным, сопротивление которого определяется выражением

$$1/R_{\text{экв}} = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n + \dots + 1/R_N. \quad (1.7)$$

При двух параллельных ветвях с резистивными элементами R_1 и R_2

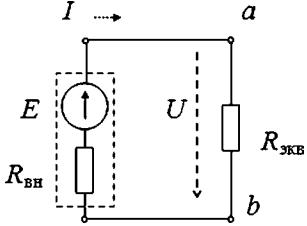


Рис. 1.7
Упрощенная схема

$$R_{\text{экв}} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2).$$

Если оба сопротивления равны $R_1 = R_2 = R$, то $R_{\text{экв}} = R/2$. При параллельном соединении N одинаковых резисторов $R_{\text{экв}} = R/N$.

Упрощенная схема (рис. 1.7) содержит источник ЭДС E и замещающий элемент $R_{\text{экв}}$. При этом ток

$$I = E / (R_{\text{вн}} + R_{\text{экв}}). \quad (1.8)$$

Напряжение на эквивалентном элементе $U = R_{\text{экв}}I$, и тогда

$$U = E - R_{\text{вн}}I. \quad (1.9)$$

Это уравнение определяет **внешнюю характеристику** источника питания — зависимость выходного напряжения U от тока I . Такую характеристику можно снять экспериментально, если в качестве нагрузки применить реостат R_h (рис. 1.8а). При снижении его сопротивления R_h растет ток I , а напряжение U падает, и тем сильнее, чем больше внутреннее сопротивление $R_{\text{вн}}$ (рис. 1.8б). Только при идеальном источнике ($R_{\text{вн}} = 0$) напряжение на нагрузке не зависит от тока. При малом внутреннем сопротивлении источник ЭДС, например в сети постоянного тока, представляют напряжением U на зажимах (рис. 1.8в).

В общем случае при некотором токе напряжение на нагрузке U меньше напряжения U_0 , измеренного на холостом ходу при $I = 0$ и равного ЭДС E (рис. 1.8б). Чрезмерное снижение напряжения может нарушить работу приемников, рассчитанных на определенный номинальный режим при $I_{\text{ном}}$ и $U_{\text{ном}}$.

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru