

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Утверждено в качестве учебного пособия
Учёным советом федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

Под общей редакцией кандидата технических наук,
профессора А. Р. Куделько

Комсомольск-на-Амуре
2015

УДК 621.3.011(07)
ББК 31.211я7
О-752

Рецензенты:

Кафедра информационной безопасности, информационных систем и физики ФГБОУ ВПО «Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет», заведующий кафедрой кандидат физико-математических наук, доцент А. Н. Анисимов;
Р. Ф. Крупский, кандидат технических наук, доцент, начальник научно-производственного отдела филиала ПАО «Компания «Сухой» «КНААЗ им. Ю. А. Гагарина»

Основные понятия и элементы электрических цепей : учебно-О-752 практическое пособие по курсу «Теоретические основы электротехники» / А. Р. Куделько, В. С. Саяпин, А. Ф. Сочелев, А. Н. Степанов ; под общ. ред. А. Р. Куделько. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. – 55 с.

ISBN 978-5-7765-1143-1

В настоящем пособии кратко представлены значимость и история развития и становления электроэнергетики и электротехники и курса «Теоретические основы электротехники». Рассмотрены структура, типы, основные понятия и элементы электрических цепей. Каждый из разделов заканчивается вопросами и заданиями для самоконтроля обучающихся.

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по программам укрупненных групп направлений подготовки и специальностей 10.00.00 – «Информационная безопасность», 11.00.00 – «Электроника, радиотехника и системы связи», 12.00.00 – «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии», 13.00.00 – «Электро- и теплоэнергетика», 15.00.00 – «Машиностроение», 27.00.00 – «Управление в технических системах».

УДК 621.3.011(07)
ББК 31.211я7

ISBN 978-5-7765-1143-1

© ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»,
2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.....	6
1.1. Статическое и атмосферное электричество	6
1.2. Первые источники тока и опыты с электрическим током.....	7
1.3. Электроэнергия и развитие процессов преобразования энергии.....	8
1.4. Электрическая связь	11
1.5. Фрагменты истории электроэнергетики.....	13
1.6. Развитие теории электрических цепей и курса ТОЭ.....	14
1.7. Вопросы для самоконтроля.....	15
2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ И СХЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ	15
2.1. Электрическая цепь и ее составные части	15
2.2. Схема электрической цепи.....	19
2.3. Вопросы для самоконтроля.....	20
3. ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ	21
3.1. Электрический заряд	21
3.2. Электрический ток	21
3.3. Напряжение (электрическое напряжение)	24
3.4. Электродвижущая сила	26
3.5. Мощность и энергия	26
3.6. Вопросы и задания для самоконтроля	28
4. ИДЕАЛИЗИРОВАННЫЕ ПАССИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ.....	29
4.1. Сопротивление.....	29
4.2. Емкость	32
4.3. Индуктивность	35
4.4. Дуальность идеализированных пассивных элементов.....	39
4.5. Схемы замещения реальных элементов электрических цепей.....	41
4.6. Вопросы и задания для самоконтроля.....	43
5. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ	44
5.1. Схемы замещения источников электрической энергии.....	44
5.2. Условия эквивалентности источников напряжения и источников тока.....	49
5.3. Вопросы и задания для самоконтроля	51
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	53

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач техники и технологий является преобразование природных энергетических ресурсов в непосредственно используемые виды энергии, такие, как механическая, тепловая, световая, звуковая и другие. Следует отметить, что в большинстве случаев области сосредоточения природных энергетических ресурсов не совпадают с местами непосредственного использования энергии, необходимой для обеспечения жизнедеятельности человека. При этом в вопросах практического использования различных видов энергии в повседневной жизнедеятельности человека в нужный период или момент времени в конкретном месте существуют следующие основные проблемы:

- возможность преобразования природных энергетических ресурсов в пригодный или необходимый для практического использования вид энергии с приемлемой эффективностью (коэффициентом полезного действия – КПД);
- возможность передачи энергии на расстояние, в том числе значительное также с приемлемой эффективностью (КПД) с целью обеспечения жизнедеятельности нужным видом энергии в нужном месте;
- преобразование любого (имеющегося) вида энергии в любой другой, необходимый для практического использования здесь и сейчас.

В связи с этим можно выделить электрическую (электромагнитную) энергию, которая в сравнении с другими видами энергии обладает следующими преимуществами:

- сегодня созданы, успешно работают и продолжают совершенствоваться устройства и системы, позволяющие с приемлемой эффективностью получить электрическую (электромагнитную) энергию путем преобразования природных энергетических ресурсов (табл. 1);
- электрическая (электромагнитная) энергия может быть сравнительно просто получена путем преобразования других видов энергии;
- электрическая (электромагнитная) энергия сравнительно просто с высокой эффективностью (коэффициент полезного действия, как правило, не ниже 90 %) может быть передана практически на любые расстояния;
- электрическая (электромагнитная) энергия сравнительно просто и с приемлемой эффективностью преобразуется практически в любые другие виды энергии;
- существуют и широко используются в практике возможности беспроводной передачи электрической (электромагнитной) энергии.

Таблица 1

Основные первичные источники электрической энергии

Виды основных природных энергетических ресурсов	Примеры преобразователей природных энергетических ресурсов в электрическую (электромагнитную) энергию
Уголь, нефть, природный газ	ТЭС – тепловые электрические станции
Ядерное топливо	АЭС – атомные электрические станции
Реки, водопады	ГЭС – гидроэлектростанции, малые ГЭС, микроГЭС
Приливы, отливы	ПЭС – приливные электростанции
Ветер	ВЭС – ветровые электростанции
Свет	СЭС – солнечные электростанции, солнечные (световые) батареи
Тепловые источники земли	ГеоТЭС – геотермальные электростанции
Химические реакции	Аккумуляторы, различные батареи

В результате в настоящее время общепринятым является преобразование природных энергетических запасов с помощью электрических генераторов в электромагнитную энергию, передача ее посредством линий электропередачи (ЛЭП) к месту потребления, где в приемниках она преобразуется в другие нужные виды энергии. Такая схема применяется практически во всех электротехнических системах, начиная с ЛЭП мощностью в миллионы киловатт и заканчивая дистанционным измерением параметров различных технологических установок, например, измерение температуры при помощи термопары. В радиотехнических системах, системах спутниковой связи и других осуществляется беспроводная передача электромагнитной энергии или информации.

Преимущества производства, передачи, распределения и преобразования электромагнитной энергии определили быстрое, эффективное развитие и широкое применение электротехники во всех отраслях промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве, в быту и других сферах жизнедеятельности человека. Кроме того, в рамках развития электротехники формируются и развиваются такие направления науки и техники, как электроника, радиотехника, связь, автоматика, вычислительная техника, информационные и телекоммуникационные технологии и системы и другие отрасли.

Здесь уместно отметить, что электротехникой в широком смысле слова называется обширная область практического применения электромагнитных явлений.

Ввиду того, что отрасли электротехники связаны между собой, в системе высшего электротехнического и смежных с ним областей образования возникла целесообразность создания и существует необходимость изучения курса «Теоретические основы электротехники», который является базой для изучения различных общепрофессиональных и специальных электротехнических дисциплин.

1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

1.1. Статическое и атмосферное электричество

Электротехника – это наука, которая описывает электромагнитные процессы в электротехнических устройствах, осуществляющих получение и/или преобразование энергии электромагнитного поля.

История электротехники более короткая, чем, например, у механики или других разделов классической физики. Можно считать, что электрические и магнитные явления стали систематически изучать, начиная с XVIII в. Именно тогда и появились такие используемые в настоящее время термины, как заряд, разряд, диэлектрик, проводник и другие.

В середине XVIII в. американский учёный Б. Франклин установил электрическую природу молнии, что имело практическое значение, так как позволило в какой-то мере обезопасить людей от поражения атмосферными разрядами во время грозы и защитить деревянные строения от пожаров. В качестве защитного устройства Франклин предложил громоотвод в виде металлического прутка, выведенного одним концом на крышу здания и погружённого достаточно глубоко в грунт другим концом.

Следует отметить, что такие громоотводы использовали ещё в древнем Китае, но европейцам назначение этого устройства было непонятно. Причём, когда Франклин проводил свои опыты по электричеству, далеко не все учёные, его современники, отнеслись к идее громоотвода с пониманием. А в настоящее время молниеотводами (так их теперь называют) защищают все здания и сооружения.

В России одновременно с Б. Франклином атмосферное электричество изучали М. В. Ломоносов и Г. Рихман. Последний погиб от удара молнии во время одного из экспериментов. Ломоносов между тем написал теорию атмосферного электричества, которая не потеряла актуальность и в настоящее время. Он же дал интересное определение: электричество – это вихревое движение эфира. Под эфиром Ломоносов понимал некоторую невидимую и невесомую материю, которая занимает всё пространство.

Вообще в XVIII в. исследователи имело дело со статическим электричеством, так как источников тока тогда не существовало. Были известны электростатические машины с ручным приводом и накопители электрических зарядов – конденсаторы.

В последней четверти XVIII в. французский учёный Ш. Кулон экспериментально смог измерить силу взаимодействия между двумя электрическими зарядами. С тех пор известен закон Кулона: сила взаимодействия между зарядами обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

В конце того же века французский учёный С. Пуассон ввёл понятие электрического потенциала (аналог потенциальной энергии в механике) и предложил способ расчёта электрического поля вблизи заряженных тел вращения.

Следует также отметить, что в XVIII в. электричество уже нашло применение в медицине. Были медицинские процедуры, в которых пациенты получали разряды статического электричества. Некоторые из этих методов лечения дожили и до наших дней. Последствия переломов и ушибов лечат с помощью электрических разрядов.

1.2. Первые источники тока и опыты с электрическим током

В конце XVIII в. итальянский профессор патологической анатомии Л. Гальвани выдвинул предположение о существовании животного электричества. Он провёл много опытов, в результате которых, как он считал, получил доказательства существования такого электричества. Например, он касался различными металлами лапок препарированных лягушек, и те сокращались.

А. Вольта, проанализировав результаты, полученные Л. Гальвани, пришёл к выводу, что мышцы лягушки являются проводником, а основной эффект связан с наличием пары разнородных металлов (контактная разность потенциалов) и сделал первый химический источник тока – вольтов столб. Источник содержал пластины из меди и цинка, между которыми находились прокладки из картона, пропитанного раствором поваренной соли или нашатыря. При замыкании крайних пластин проволокой она заметно нагревалась. Таким образом, впервые был получен постоянный электрический ток в проводнике.

С вольтовым столбом стали проводить опыты. В одном из них удалось разложить воду на кислород и водород. Далее английский учёный Х. Деви получил щелочные металлы путём разложения растворов едких щелочей электрическим током.

В 1802 г. российский учёный В. Петров построил самый большой в Европе вольтов столб и смог зажечь электрическую дугу между угольными

электродами. Позднее в 1812 г. Х. Деви вторично открыл электрическую дугу и назвал её вольтовой.

В 1820 г. датский учёный Г. Х. Эрстед открыл магнитное действие тока. В опыте при протекании тока по проводнику происходило отклонение магнитной стрелки, расположенной рядом с проводником. При этом было установлено, что магнитное поле имеет вихревой характер.

Опыты Эрстеда повторили французские учёные А. М. Ампер и Д. Ф. Араго, которые для усиления магнитного действия тока предложили сворачивать проводник в спираль (такое устройство назвали соленоидом). Ампер как раз и ввёл термин – сила тока. До того движение электрических зарядов в проводниках называли гальвани-вольтовой жидкостью. Он же написал первую научную работу по электродинамике, в которой рассматривалось взаимодействие движущихся зарядов.

В 1825 – 1826 гг. немецкий учёный Г. Ом провёл ряд экспериментов по определению зависимости силы тока в электрической цепи от длины и сечения проводников. Не имея гальванических источников с неизменной электродвижущей силой, Г. Ом в своих опытах использовал источники термо-ЭДС, в которых сплавы различных металлов нагревались с помощью спиртовок. Интересно, что вольтметров в ту пору тоже ещё не было, поэтому электроскопную силу (напряжение) Г. Ом измерял с помощью простого прибора, известного ещё в XVIII в. – электроскопа.

1.3. Электроэнергия и развитие процессов преобразования энергии

Наша цивилизация с момента ее появления использует различные источники энергии как естественного, так и искусственного происхождения. В первую очередь – это тепловая энергия, получаемая в процессе сжигания органического топлива. Сначала костры, очаги и тому подобное использовались для обогрева и приготовления пищи. Затем для обжига глиняных изделий и получения керамики. Затем стала развиваться металлургия и кузнечное дело.

Развитие шло в сторону постоянного увеличения объёма потребляемой энергии. От дров перешли к более калорийным видам топлива: в XVIII в. – это каменный уголь, в XIX в. – нефть, в XX в. – газ. Процесс интенсификации в потреблении органических видов топлива продолжается и в настоящее время.

Несколько тысячелетий назад люди научились использовать энергию водных потоков, в первую очередь для подъёма воды на поля с целью полива. Для этой цели служили так называемые безнапорные водяные колёса, вращающиеся за счёт течения реки. К лопаткам колеса крепились глиняные либо деревянные сосуды, которые зачерпывали воду и поднимали ее до лотка, по которому вода самотёком шла на поле. Такие колёса до сих пор сохранились в Индии.

На следующем этапе появились водяные мельницы, в которых для увеличения напора воды и соответственно увеличения кинетической энергии водного потока стали строить плотины. Такие преобразователи энергии движущейся воды в механическую энергию известны уже более двух тысяч лет. На современных гидроэлектростанциях используется тот же принцип. За счёт высоких плотин повышается уровень воды, которая падает с большой высоты и вращает гидравлические турбины.

К природным источникам энергии можно также отнести воздушные атмосферные потоки. На Земле достаточно много мест, где ветер дует практически постоянно. Ещё в средневековье люди научились использовать преобразование энергии ветра в механическую энергию. Считается, что первые ветряные мельницы появились в Испании в VII или VIII в. нашей эры. В первых таких устройствах ветряное колесо располагалось горизонтально к поверхности земли. Следует отметить, что название ветряная мельница относится не только к механизмам, предназначенным для размола зерна. С помощью подобных механизмов приводили в действие водяные насосы (известный пример – Голландия), распиливали брёвна на доски и совершали другие виды механической работы.

Несмотря на незначительную концентрацию или плотность энергии воздушных потоков, потомки ветряных мельниц – ветросиловые установки – с успехом применяются и в настоящее время. При этом если мощность классической ветряной мельницы составляет несколько лошадиных сил, то используемые в настоящее время ветроэнергетические установки имеют единичную мощность до 6 – 10 МВт. Правда, и размеры их тоже впечатляют. Так, диаметр ветряного колеса достигает 120 м, а высота опоры соответственно составляет от 110 до 125 м. Из таких ветросиловых установок на морском побережье Португалии, Испании, Франции и Голландии построены целые поля. А доля электроэнергии, вырабатываемой за счёт ветра, составляет 10 - 20 % от всей энергии, потребляемой в этих странах.

Гидравлические двигатели применялись долго и использовались широко в производстве, а также на шахтах и рудниках. Однако их основной недостаток – привязка к водным потокам – стал особенно заметен с развитием металлургии, которая требовала всё больше угля и руды. А месторождения природных ископаемых располагаются необязательно на берегах рек.

Поэтому возникла потребность в универсальном механическом двигателе, который должен быть достаточно мобильным, а не привязанным к конкретному месту. Таким двигателем стала паровая машина, в которой тепловая энергия, полученная при сжигании органического топлива, обеспечивает переход воды из жидкого в газообразное состояние. Водяной пар в конечном итоге и совершает механическую работу. При этом первые паровые машины, появившиеся в XVIII в., назывались

пароатмосферными вследствие того, что пар поступал в цилиндр машины под давлением, лишь немного превышающим атмосферное, а работа совершалась при конденсации пара и движении поршня за счёт атмосферного давления.

К концу XVIII в. были разработаны паровые двигатели высокого давления, в которых пар уже толкал поршень в цилиндре. Это дало толчок не только к развитию промышленности, но и способствовало развитию транспорта. Именно с появлением паровых машин высокого давления связано появление паровозов и развитие сети железных дорог в XIX в., а также развитие водного транспорта после установки парового двигателя на речные, а затем и морские суда. Паровые машины непрерывно совершенствовались и способствовали тому, что XIX в. назвали веком пара.

На производстве обычно одна паровая машина приводила в действие цех предприятия, либо, если предприятие было небольшим, одна машина обеспечивала механической энергией все его станки и механизмы. Это требовало развитой сети механических трансмиссий. Станки приводились в действие от общего вала за счёт системы канатных, ремённых, цепных видов передач. Это загромождало территорию цеха, приводило к травматизму среди работников, а также к потерям энергии.

В связи с этим в последней четверти XIX в. на производстве получили распространение пневмо- и гидропередачи. В первом случае паровая машина приводила в действие насос, который закачивал воздух в магистраль, а для привода станков служили пневмодвигатели. Во втором случае паровая машина работала на водяной насос, а станки были снабжены гидродвигателями. Таким образом, для передачи энергии служили либо воздушная магистраль, либо система труб, подающих воду под давлением.

Положение изменилось с началом использования электроэнергии. В этом случае энергия подаётся к каждому станку по проводам, а станок снабжён индивидуальным электродвигателем.

Следует отметить, что электроэнергию трудно назвать самостоятельным видом энергии, так как получают её, опять же преобразуя энергию водных потоков на гидроэлектростанциях, либо за счёт энергии пара под высоким давлением на тепловых станциях и т. п.

В середине XIX в. английский учёный Джоуль дал такую формулировку электричеству: электричество – это агент, который разносит теплоту источника по всей электрической цепи. Тогда ещё не было термина энергия. Сейчас мы бы могли эту формулировку трактовать следующим образом. На электростанциях механическая энергия вращающихся турбин в электромашинных генераторах преобразуется в энергию электромагнитного поля, которая по проводам доставляется к потребителям и там преобразуется в тепло либо в механическую работу.

Другая область использования электрической энергии – это средства коммуникации и связи. Электрическая связь появилась в XIX в. вслед за источниками тока. Сначала это был телеграф, в котором сообщения кодировались с помощью импульсов электрического тока и затем с помощью электромеханического преобразователя переносились на бумажную ленту в виде точек и тире (знаменитая азбука Морзе). Затем были разработаны механические дешифраторы, позволяющие преобразовывать электрические импульсы в текст в виде букв и цифр.

Следующий вид проводной связи – телефон тоже появился в XIX в. Здесь колебания мембраны в микрофоне под действием звуковых волн преобразуются в колебания электрического тока, а затем вновь преобразуются в звуковые волны в приёмном аппарате.

В конце XIX в. появилась беспроводная связь. В этом случае для передачи информации служат электромагнитные волны, модулированные по амплитуде, частоте или фазе. В XX в. этот вид связи очень бурно развивался. В результате появилась радиолокация, телевидение, сотовые (мобильные) телефоны.

С начала XX в. не прекращаются попытки создания устройств, позволяющих передавать без проводов значительные потоки энергии. Выгода при этом очевидна, так как линии передач, которые в настоящее время занимают достаточно большие площади, являются дорогими, сложными и требующими постоянного обслуживания объектами, в этом случае становятся ненужными. Правда, пока им нет реальной альтернативы.

Пока что удалось передавать более или менее значительные мощности без проводов только в пределах объёма устройств, подобных микроволновой печи. Но наука и техника постоянно развиваются, поэтому трудно предположить, какие новшества могут появиться и в этой области даже в ближайшей перспективе.

1.4. Электрическая связь

С конца XVIII в. в Европе получил распространение оптический телеграф, в котором буквы или целые слова кодировались с помощью определённого расположения ярко окрашенных деревянных реек, расположенных на деревянных башнях. Эти башни располагались в пределах прямой видимости друг от друга, и сообщения передавались по цепочке, что было возможно только в светлое время суток и в хорошую погоду. Например, в XIX в. линия такого телеграфа длиной около 2 тыс. км связывала Петербург с Варшавой.

В конце XVIII в. была попытка создания электростатического телеграфа, в котором по проводам предполагалось передавать электрические заряды.

С появлением первых источников тока был изобретён электрохимический телеграф. В этом случае сигналы поступали по проводам на электроды, расположенные в сосудах с разбавленной кислотой. При нажатии клавиши с определённой буквой на одном конце линии – на другом конце в одном из сосудов выделялись пузырьки газа.

В 1827 г. русский изобретатель П. Л. Шиллинг предложил электромагнитный телеграф, в котором основным элементом являлся мультипликатор – катушка, состоящая из одного или двух витков провода с магнитной стрелкой внутри. При подключении катушки к источнику стрелка поворачивалась. Был разработан код, позволяющий использовать 8 проводов и 6 мультипликаторов для передачи всех букв русского алфавита. Пробная линия такого телеграфа действовала в Зимнем дворце в Петербурге.

Затем учёный Б. С. Якоби разработал и построил линию «самоотмечающего» телеграфа между Петербургом и Царским Селом. В телеграфе Якоби требовалось только два провода, а сообщение выглядело изломанной линией, которую вычерчивало перо самописца на экране из матированного стекла.

В 40-е гг. XIX в. Якоби и независимо от него немецкий электротехник В. Сименс создали стрелочный телеграф, который использовался на железных дорогах для связи между станциями. В этом случае на циферблате, подобном циферблату часов, но с буквами по окружности, стрелка указывала на нужную букву сообщения.

Наибольшее распространение получил телеграф С. Морзе благодаря простому коду, содержащему два сигнала – длинный и короткий (азбука Морзе). В 1866 г. заработала телеграфная линия, которая связала материки – Европу и Америку.

Один из первых опытов по телефонии продемонстрировал Ф. Райс в 1861 г. Более успешным в этой области оказался А. Г. Белл, который запатентовал телефон своей конструкции в 1876 г. Этот телефон очень быстро получил распространение в Европе и Америке.

В 1888 г. немецкий учёный Г. Герц экспериментально обнаружил электромагнитные волны. А в 1896 г. А. С. Попов и Г. Маркони независимо друг от друга провели первые сеансы радиотелеграфной связи. С появлением радиоламп, что произошло перед первой мировой войной, стала возможной радиотелефонная связь, а после окончания войны появилось радиовещание.

Дальнейшее развитие радиосвязи привело к появлению телевидения, а в конце XX в. к широкому распространению мобильной (сотовой) связи и Интернета.

1.5. Фрагменты истории электроэнергетики

Электроэнергетика как отдельная отрасль появилась благодаря развитию электрического освещения. В 50-е гг. XIX в. на морских маяках стали устанавливать электродуговые лампы, для питания которых требовались электромашинные генераторы. Такие генераторы постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов были созданы тогда же.

Затем, в 70-е гг. XIX в., благодаря работам П. Н. Яблочкова электродуговые лампы получили довольно широкое распространение для уличного освещения, а также для освещения театров и больших магазинов. При этом мощность небольших электростанций, расположенных прямо в подвалах зданий, не превышала 20 - 25 кВт.

В 1879 г. Т. А. Эдисон создал достаточно надёжную лампу накаливания с угольной нитью. Такие лампы можно было использовать в быту. Поэтому потребовалось увеличение мощности электростанций. Такие центральные электростанции были построены сначала в 1882 г. в Нью-Йорке, а затем и в других крупных городах мира. Например, в Петербурге в 1886 г. были пущены в эксплуатацию две станции мощностью по 200 кВт каждая.

Возникла проблема передачи энергии на расстояние, так как при низком напряжении (110 В постоянного тока) радиус электроснабжения не превышал 800 м. Первый опыт по передаче электроэнергии при постоянном напряжении 1,5 - 2 кВ на расстояние 57 км провёл французский электротехник М. Депре в 1882 г. Затем И. Фонтен и Тюри разработали высоковольтные системы постоянного тока, в которых энергия передавалась на расстояние 10 – 20 км при напряжении в линии до 20 кВ.

Однако более предпочтительным оказалось использование в электроснабжении переменного тока, так как в этом случае возможно преобразование напряжения с помощью трансформаторов.

Первая электростанция однофазного переменного тока была построена в пригороде Лондона в 1885 г. В 1887 г. такие же станции были введены в строй в Одессе и Царском Селе.

Революция в электроснабжении произошла после 1891 г., когда М. О. Доливо-Добровольский продемонстрировал первую опытную трёхфазную систему переменного тока. Трёхфазный ток очень быстро вытеснил постоянный и однофазный переменный. В настоящее время во всём мире работают электростанции трёхфазного переменного тока, а энергия передаётся к потребителям по линиям передач при напряжении от 110 до 1200 кВ.

1.6. Развитие теории электрических цепей и курса ТОЭ

В XIX в. благодаря работам учёных (Фарадея, Максвелла, Вебера, Гаусса и др.) установилась определённая система взглядов на электричество и магнетизм. К 1870 г. была разработана система электрических и магнитных единиц. Однако на практике электротехники ещё в начале XX в. действовали большей частью эмпирически, не полагаясь на теоретические расчёты. К примеру, Эдисон заявлял, что не нуждается в теории и полагается на свою интуицию.

Когда появились электротехнические устройства переменного тока, то оказалось, что в них не всегда выполняется закон Ома. Это и послужило толчком к разработке теории цепей переменного тока. При этом было принято допущение о синусоидальности переменных токов и напряжений, что позволило использовать векторную (комплексно-символическую) интерпретацию синусоидально изменяющихся величин.

В 90-е гг. в работах М.О. Доливо-Добровольского, Ч. Штейнмеца и других были выработаны важные теоретические представления, позволяющие распространить закон Ома на цепи синусоидального переменного тока. При этом были введены такие понятия, как индуктивное и омическое сопротивление, кажущееся (полное) сопротивление, угол сдвига фаз и другие.

В это же время для анализа режимов работы электрических машин переменного тока ученые и специалисты стали использовать круговые диаграммы (К. А. Круг, Г. Н. Петров, А. Блондель и др.).

В 90-е гг. XIX в. Ч. Штейнмец разработал комплексно-символический метод для расчёта цепей переменного тока. В России этот метод ввёл в практику академик В. Ф. Миткевич.

Исторически большое значение имело создание первых научных дисциплин для высшей школы, в которых излагались теоретические проблемы электротехники. В нашей стране в 1904 г. профессор В. Ф. Миткевич в Петербургском политехническом институте начал читать курс «Теория явлений электрических и магнитных», а затем курс «Теория переменных токов». В 1905 г. профессор А. К. Круг начал читать в московском высшем техническом училище курс «Теория переменных токов», а затем курс «Основы электротехники».

Можно считать, что теория электрических цепей, а также в целом курс «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) в основном сложились в 30-е – 40-е гг. XX в.

В дальнейшем в развитие и совершенствование структуры и содержания теории электрических цепей, теории электромагнитного поля, в целом курса «Теоретические основы электротехники» значительный вклад внесли Л. Р. Нейман, П. Л. Калантаров, К. С. Демирчян, А. А. Бессонов, В. Н. Боронин, П. А. Бутырин, Н. В. Коровкин, И. Ф. Кузнецов, В. Г. Миронов, В. Л. Чечурин и другие.

1.7. Вопросы для самоконтроля

- 1) Когда началось систематическое изучение электрических и магнитных явлений?
- 2) Кем и когда установлена электрическая природа молнии? Какое практическое значение имело это открытие?
- 3) Что представлял собой громоотвод (практически – современный молниеотвод), предложенный Б. Франклином?
- 4) Кто из российских исследователей XVIII в. изучал атмосферное электричество? Назовите автора теории атмосферного электричества, которая не потеряла актуальность и в настоящее время.
- 5) Приведите примеры первых источников тока; объясните принципы их работы.
- 6) Назовите основные законы и теории в области электрических и магнитных явлений, сформулированные и/или полученные теоретически или экспериментально, назовите их авторов.
- 7) Назовите основные этапы формирования, развития и практического использования электроэнергетики.
- 8) Приведите примеры получения и/или практического использования электрической энергии.
- 9) Какие области знаний и соответствующие отрасли техники выделились из электротехники в самостоятельные области?
- 10) Что явилось необходимостью и началом формирования дисциплины «Теоретические основы электротехники»?

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ И СХЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

2.1. Электрическая цепь и ее составные части

Электрической цепью называют совокупность объектов и устройств, которая формирует путь для протекания электрического тока, и электромагнитные процессы в которой могут быть описаны с помощью понятий об электродвижущей силе (ЭДС), напряжении и токе.

В структуре электрической цепи (рис. 2.1) можно выделить следующие составные части (элементы):

- источники электрической (электромагнитной) энергии;
- приемники электрической (электромагнитной) энергии (нагрузка);
- вспомогательные элементы.

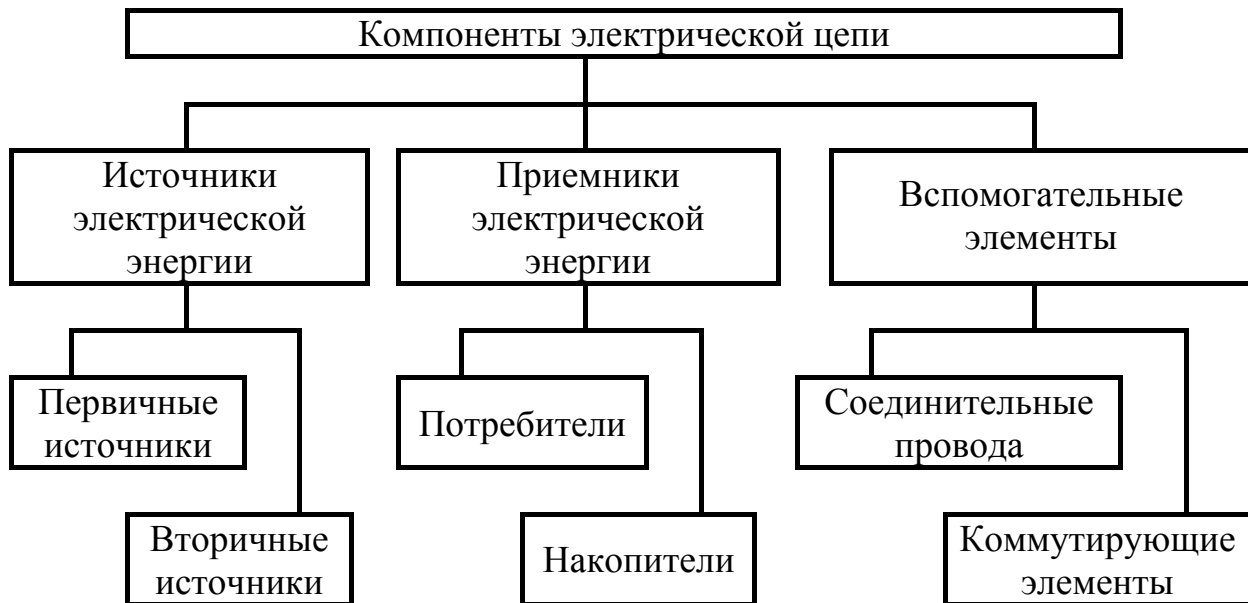


Рис. 2.1. Структура компонентов электрической цепи

К **источникам электрической (электромагнитной) энергии** (*первичным источникам*) относятся устройства, в которых происходит преобразование конкретного вида энергии в электрическую (электромагнитную) энергию. В левой колонке табл. 2.1 приведены примеры основных наиболее распространенных устройств, которые относятся к первичным источникам электрической (электромагнитной) энергии и которые обеспечивают преобразование различных видов энергии, используемых в практике жизнедеятельности человека (средняя колонка таблицы), в электрическую энергию.

Особый класс источников представляют собой *вторичные источники* электрической энергии, которые по своей сути и принципам действия являются преобразователями параметров (значений, вида электрического тока, напряжения) электрической энергии. При этом по отношению к первичным источникам они должны рассматриваться как приемники, а по отношению к остальной части электрической цепи они могут рассматриваться как источники энергии.

Примерами вторичных источников электрической энергии могут быть следующие устройства:

- понижающие или повышающие напряжение (ток) трансформаторы;
- преобразователи переменного напряжения (тока) в постоянное напряжение (постоянный ток) – выпрямители;
- преобразователи постоянного напряжения (тока) в переменное напряжение (ток) – инверторы напряжения (инверторы тока);

Таблица 2.1

Преобразователи электрической энергии

Преобразователи различных видов энергии в электрическую (электромагнитную) энергию	Используемые в практике жизнедеятельности человека виды энергии	Преобразователи электрической (электромагнитной) энергии в другие виды энергии для практического использования
Электрические генераторы	Механическая	Электрические двигатели (вращательного, поступательного, колебательного и т.п. движений)
Термопары	Тепловая	Нагревательные элементы различных видов и назначения
Солнечные батареи и другие световые элементы	Световая	Электрические лампы накаливания, дневного света, другие источники света
Микрофон	Звуковая	Динамики радиоприемников, телевизоров, магнитофонов, телефонов и т.п.
Аккумулятор	Химических реакций	Ускорители, катализаторы химических реакций
Антенна	Изображение, звук, информация	Антенна

- преобразователи переменного напряжения одной частоты и действующего значения в переменное напряжение другой частоты и другого действующего значения (в том числе регулируемой частоты и регулируемого действующего значения) – преобразователи частоты;
- регуляторы постоянного или переменного напряжения или тока;
- преобразователи частотных спектров сигналов – модуляторы, демодуляторы, электрические фильтры и другие устройства.

Приемники электрической (электромагнитной) энергии – это элементы электрической цепи, в которых происходит:

- *потребление электрической энергии* с ее преобразованием в другие виды энергии, необходимые в конкретном месте в конкретное время для жизнедеятельности человека. Примеры наиболее распространенных устройств, которые являются *потребителями* (преобразователями) электрической энергии, приведены в правой колонке табл. 2.1;

- *накопление* (запасание) электрической (электромагнитной) энергии. К *накопителям* электромагнитной энергии относятся конденсаторы, катушки индуктивности, а также другие элементы, обладающие свойствами индуктивности и емкости.

Основные элементы электрической цепи, к которым относятся упомянутые источники и приемники электрической энергии, соединяют между собой с помощью **вспомогательных элементов**, образуя пути для протекания электрического тока. К вспомогательным элементам электрических цепей относятся (рис. 2.1) *соединительные проводники*, разъемы, кнопки, ключи, релейные элементы, переключатели и другая *коммутирующая аппаратура*.

Для включения в электрическую цепь каждый из перечисленных и других элементов имеет внешние выводы, которые называют также зажимами или полюсами. По числу внешних выводов различают:

- двухполюсные элементы – резистор, конденсатор, катушка индуктивности, источник постоянного или однофазного переменного напряжения (тока) и т.п.;

- многополюсные элементы – трансформатор, транзистор, электронная лампа, микросхема, различные преобразователи параметров электрической энергии и другие элементы.

В курсе ТОЭ в теории электрических цепей принято, что каждый элемент цепи полностью характеризуется его **вольт-амперной характеристикой** – зависимостью между током и напряжением на его зажимах или семейством таких характеристик для многополюсных элементов. При этом процессы, имеющие место внутри элементов и определяющие формирование их характеристик, как правило, не рассматриваются.

В соответствии с **основным методом теории электрических цепей** реальные элементы цепи заменяются их **моделями** (близкими к реальным или упрощенными), построенными из **идеализированных элементов**. В большинстве случаев используются пять основных идеализированных двухполюсных элементов:

- 1) сопротивление,
- 2) емкость,
- 3) индуктивность,
- 4) идеальный источник напряжения,
- 5) идеальный источник тока.

В некоторых случаях используют многополюсные идеализированные элементы, например, управляемые источники напряжения, управляемые источники тока, идеальные трансформаторы и другие. При формировании модели реального элемента электрической цепи могут быть использованы один или несколько идеализированных элементов.

Если в исходной реальной электрической цепи каждый реальный элемент заменен его моделью, состоящей из идеализированных элементов, то такую цепь называют **моделирующей** или **идеализированной цепью**. Соответствующую схему также называют **моделирующей** или **идеализированной схемой (моделью) электрической цепи**. Необходимо отметить, что одним из предметов теории электрических цепей является исследование процессов, имеющих место именно в таких цепях.

2.2. Схема электрической цепи

Электрическая схема представляет собой условное графическое изображение реальной электрической цепи.

В электроэнергетике, электротехнике, радиотехнике, электронике и т.п. встречаются следующие виды схем электрических цепей:

- принципиальная электрическая схема – графическое изображение реальной электрической цепи, где с помощью условных графических изображений показаны все элементы цепи и все соединения между ними;
- структурная электрическая схема или блок-схема – условное графическое изображение реальной электрической цепи, на котором представлены только важнейшие функциональные компоненты (блоки) цепи и основные связи между ними;
- эквивалентная или расчетная электрическая схема – условное графическое изображение моделирующей цепи (модели реальной электрической цепи), то есть цепи, сформированной из идеализированных элементов и замещающей исследуемую реальную электрическую цепь в рамках решаемой задачи. Как отмечено в разделе 2.1, такую схему можно назвать моделирующей или идеализированной схемой (моделью) электрической цепи.

В зависимости от условий решаемой задачи (требуемая точность расчета, диапазон исследуемых частот токов и напряжений, необходимость учета отдельных эффектов, используемый метод расчета и т.п.) каждому элементу электрической цепи и всей цепи в целом могут соответствовать различные моделирующие цепи и различные эквивалентные электрические схемы. Примерами таких схем могут быть эквивалентные схемы для постоянного и/или переменного тока, для высоких или низких частот, для мгновенных или действующих (или других, преобразованных) токов и напряжений.

Каждому реальному элементу электрической цепи соответствуют условные графические и буквенные обозначения, которые определены действующими стандартами. На рис. 2.2 в качестве примера приведены изображения реальных элементов – резистора (R), электрического конденсатора (C), катушки индуктивности (L).

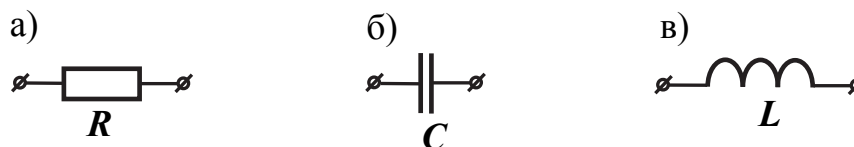


Рис. 2.2. Примеры графических и буквенных обозначений реальных элементов электрических цепей

Каждому идеализированному элементу эквивалентной или моделирующей электрической цепи также присваиваются определенные условные графические и буквенные обозначения, которые не стандартизированы.

2.3. Вопросы для самоконтроля

- 1) Назовите основные компоненты электрической цепи. Поясните назначение каждого из них.
- 2) Дайте определение понятию «вторичные источники электрической энергии». Приведите примеры вторичных источников электроэнергии.
- 3) Назовите наименования двух основных групп приемников электрической энергии. Чем они отличаются?
- 4) В чем состоит необходимость вспомогательных элементов цепи. Какие устройства относятся к вспомогательным элементам?
- 5) Перечислите основные двухполюсные идеализированные элементы электрических цепей.
- 6) Чем структурная схема электрической цепи отличается от принципиальной?
- 7) Что представляет собой эквивалентная или расчётная схема электрической цепи?
- 8) Приведите примеры графических и буквенных обозначений известных Вам реальных элементов электрических цепей.

3. ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Электрические или электромагнитные процессы в электрических цепях и электротехнических устройствах характеризуются значениями электрических величин, основными из которых являются:

- электрический заряд – q, Q ;
- электрический ток – i, I ;
- электрический потенциал – φ, Φ ;
- электрическое напряжение – u, U ;
- электродвижущая сила – e, E ,

а также характеризующие конкретную электрическую цепь или электротехническое устройство энергетические величины: электрическая энергия (w, W) и электрическая мощность (p, P).

В настоящем разделе рассматриваются перечисленные единицы физических величин, характеризующие процессы в электрических цепях.

3.1. Электрический заряд

Электрическим зарядом называют источник электрического (электростатического) поля, посредством которого заряды взаимодействуют друг с другом.

Существуют заряды двух знаков. Так, носителями зарядов в металлах, как известно, являются отрицательно заряженные частицы – электроны. В жидкостях и газах носителями зарядов могут быть как положительно, так и отрицательно заряженные ионы.

Как известно, разноименные заряды (заряды разных знаков $+q_1$ и $-q_2$) притягиваются друг к другу, заряды одинаковых знаков (одноименные $+q_1, +q_2$ или $-q_1, -q_2$) отталкиваются друг от друга.

Значение конкретного заряда q можно определить через силу взаимодействия двух зарядов в соответствии с законом Кулона или через силу, действующую на этот заряд в конкретной точке поля, при известной напряженности поля в этой точке.

При этом в системе МКСА, которая входит в Международную систему единиц (СИ), единица заряда определяется через единицу тока, что для электрических цепей является более удобным и общепринятым.

3.2. Электрический ток

Электрическим током проводимости (в дальнейшем – электрический ток, ток, ток проводимости) называют упорядоченное, направленное перемещение свободных носителей электрических зарядов. Такими свободны-

ми носителями электрических зарядов в металлах являются отрицательно заряженные электроны, в жидкостях и газах – как положительно, так и отрицательно заряженные ионы. Перемещение носителей электрических зарядов осуществляется под действием сил электрического поля в проводящей среде или в среде, обладающей свойствами проводимости. При этом такое перемещение носителей электрических зарядов осуществляется или может осуществляться в одном из двух возможных направлений в зависимости от знака заряда носителей.

Электрические токи являются скалярными величинами, но в ветвях электрической цепи им придается определенное направление. В электротехнике принято, что, **вне зависимости от природы носителей электрических зарядов и их типа, положительным (техническим) направлением тока является направление, в котором перемещаются или могли бы перемещаться носители положительных электрических зарядов** (от зажима или полюса со знаком «+» к зажиму со знаком «-»). В результате в наиболее распространенных проводниковых материалах, к которым относятся металлы, фактическое направление движения свободных носителей электрических зарядов – электронов противоположно положительному или техническому направлению электрического тока.

При анализе процессов в электрических цепях о направлении каждого из токов судят по его знаку, который зависит от того, совпадает или нет техническое направление (далее – направление) тока с направлением, условно принятым как положительное. При этом при расчете электрических цепей условно положительное направление тока может быть принято произвольно. Если в результате расчета значение какого-либо тока получилось отрицательным, то это означает, что положительное или техническое направление этого тока противоположно условно принятому направлению изначально, то есть знак результата расчета определит истинное направление тока.

Количественно значение тока определяется количеством заряда, проходящего через поперечное сечение проводника в единицу времени (рис. 3.1, а):

$$i(t_1) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{q(t_1) - q(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \left. \frac{dq}{dt} \right|_t = i_1.$$

Таким образом, в произвольный момент времени t ток – скалярная величина, равная производной по времени от электрического заряда, проходящего через поперечное сечение рассматриваемого проводника, или скорости изменения заряда во времени. При этом $i = i(t)$ – мгновенное значение тока, которое в общем случае зависит от времени.

В частном случае, когда $q(t)$ – линейная функция (рис. 3.1, б), имеет место постоянный ток:

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{\Delta q}{\Delta t} = I = \text{const.}$$

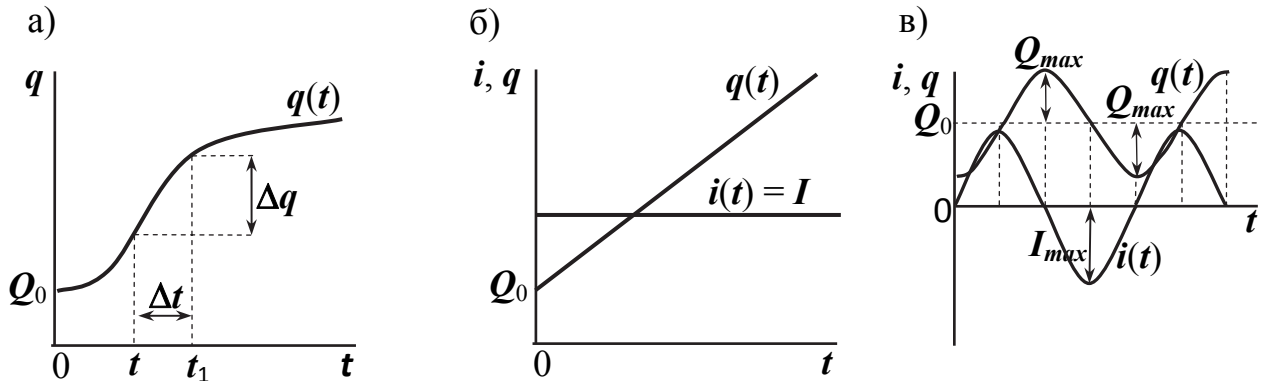


Рис. 3.1. Зависимости $q(t)$ и $i(t)$

В другом случае, как, например, на рис. 3.1, в, где заряд изменяется по гармоническому закону в соответствии с выражением

$$q(t) = Q_0 - Q_{\max} \cos kt,$$

ток является переменным синусоидальным, а его мгновенное значение в конкретный момент времени – зависимость от времени – характеризуется выражением:

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = k Q_{\max} \sin kt = I_{\max} \sin kt,$$

где $I_{\max} = kQ_{\max}$ – амплитуда (максимальное значение) переменного синусоидального тока.

В соответствии с международной системой единиц (СИ) ток измеряется в амперах:

$$[i] = \frac{[q]}{[t]} = \frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \text{А.}$$

Как уже было отмечено, единица измерения электрического заряда определяется через единицу измерения тока:

$$[q] = [i] [t] = \text{А с} = \text{Кл.}$$

3.3. Напряжение (электрическое напряжение)

Если электрический заряд поместить в электрическое поле, то на него действует сила, значение и направление которой определяются значением и направлением напряженности электрического поля, а также значением и знаком заряда. Если носитель заряда является свободным (не закрепленным в фиксированной точке), то под действием этой силы заряд перемещается. При этом перемещение заряда происходит за счет энергии электрического поля. При перемещении единичного положительного заряда между двумя любыми точками A и B электрического поля силами электрического поля затрачивается энергия (совершается работа), которая равна разности потенциалов этих точек. Для произвольной точки, например, точки A ее потенциал φ_A определяется как работа, совершаемая силами электрического поля по перемещению единичного положительного заряда из данной точки поля в точку с потенциалом, равным нулю. Разность потенциалов между точками A и B называется напряжением (электрическим напряжением) между этими точками:

$$u = \varphi_A - \varphi_B = u_{AB}.$$

Напряжение между точками A и B электрической цепи можно определить как предел отношения количества энергии электрического поля w , затрачиваемой на перемещение положительного заряда q из точки A в точку B , к значению этого заряда при значении заряда, стремящемся к нулю:

$$u = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta w}{\Delta q} = \frac{dw}{dq}.$$

Напряжение является скалярной величиной, которой, как и току, приписывают определенное направление. При этом **направление напряжения определяется направлением, в котором под действием сил электрического поля перемещаются (или могли бы перемещаться) свободные носители положительного заряда. То есть, направление напряжения соответствует направлению от точки цепи с большим потенциалом к точке цепи с меньшим потенциалом (от зажима «+» к зажиму «-»)**. В результате в ветвях электрической цепи или на ее участках, где отсутствуют источники энергии, и перемещение заряда осуществляется под действием сил (за счет энергии) электрического поля, направления тока и напряжения совпадают, как это представлено на рис. 3.2.

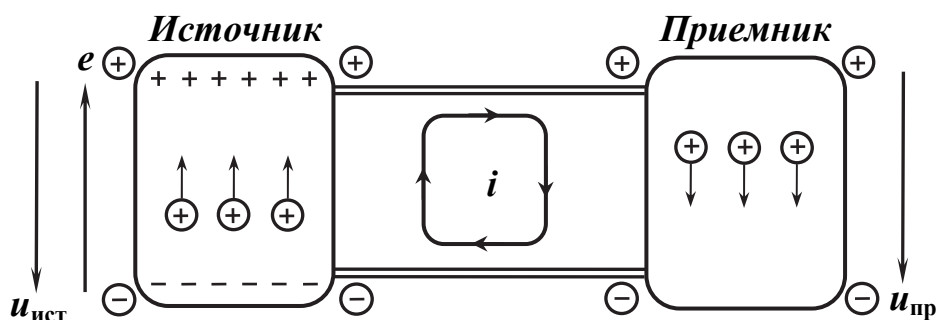


Рис. 3.2. Перемещение положительных электрических зарядов в источнике и приемнике электрической энергии

При расчете электрических цепей о направлении каждого из напряжений судят по его знаку, который зависит от того, совпадает или нет направление напряжения с направлением, условно принятым, как положительное. При этом при расчете электрических цепей условно положительное направление напряжения, как и тока, может быть принято произвольно. Если в результате расчета значение какого-либо напряжения получилось отрицательным, то это означает, что положительное направление этого напряжения противоположно условно принятому направлению изначально, то есть знак результата расчета определит истинное направление напряжения.

Внутри источников энергии перемещение электрических зарядов осуществляется за счет энергии сторонних сил, которые при макроскопическом рассмотрении обусловлены неэлектромагнитными процессами, например, процессами химических реакций, тепловыми процессами, воздействием механических сил. Носители заряда в источнике перемещаются в направлении, противоположном направлению действия сил электрического поля. Например, носители положительного заряда перемещаются от зажима источника с более низким потенциалом (зажима «-») к зажиму с более высоким потенциалом (зажиму «+»), как это изображено на рис. 3.2. В результате направление тока через источник противоположно направлению напряжения источника (см. рис. 3.2).

В соответствии с международной системой единиц (СИ) потенциал и напряжение измеряются в вольтах:

$$[\varphi] = [u] = \frac{[w]}{[q]} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В}.$$

3.4. Электродвижущая сила

Как было отмечено выше, в разделе 3.3, носители электрических зарядов в источнике электрической энергии перемещаются под действием сторонних сил. В результате в источнике энергия процессов, вызывающая эти силы, преобразуется в электрическую энергию.

Источники электрической энергии характеризуются электродвижущей силой (ЭДС), которую можно определить как работу сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда внутри источника (рис. 3.2) от зажима с меньшим потенциалом (обозначен «-») к зажиму с большим потенциалом (обозначен «+»). При этом независимо от природы сторонних сил ЭДС источника численно равна напряжению между зажимами источника электрической энергии при отсутствии тока через него (в режиме холостого хода источника при отсутствии нагрузки, подключенной к его зажимам).

Следует отметить, что ЭДС – скалярная величина, направление которой совпадает с направлением перемещения положительных зарядов внутри источника, то есть совпадает с направлением тока через источник.

Напряжение на участке цепи и ЭДС могут являться функциями времени или сохранять постоянные значения. В первом случае это переменные напряжение и ЭДС, $u = u(t)$, $e = e(t)$ – их мгновенные значения. Постоянные значения напряжения и ЭДС обозначаются как U и E соответственно. ЭДС, как и напряжение, измеряется в вольтах: $[E] = [e] = \text{В}$.

3.5. Мощность и энергия

Как представлено в разделе 3.3, при перемещении элементарного электрического заряда через участок электрической цепи между точками A и B , напряжение между которыми $u = \varphi_A - \varphi_B$, силами электрического поля совершается элементарная работа:

$$dw = u dq = u i dt.$$

Эта работа определяет количество энергии, поступившей в рассматриваемый участок электрической цепи за временной промежуток dt . Эту же энергию к произвольному моменту времени t можно определить как

$$w = w(t) = \int_{-\infty}^t dw = \int_{-\infty}^t u i dt.$$

Нижний предел интегрирования ($-\infty$) позволяет учесть поступление всей энергии в рассматриваемый участок цепи до конкретного момента времени t .

Следует отметить, что, если для любого произвольного момента времени t энергия $w(t) \geq 0$, то рассматриваемый участок (или отдельный элемент) электрической цепи является потребителем электроэнергии. В этом случае такой участок (или отдельный элемент) цепи называют еще пассивным. Если хотя бы в какой-либо момент или промежуток времени $w(t) < 0$, то такой участок цепи является источником энергии или содержит источник (и) энергии. Такой участок (или отдельный элемент) принято называть активным.

Производная энергии $w(t)$ по времени t или скорость изменения энергии в текущий момент времени t определяет мгновенную мощность рассматриваемого участка цепи

$$p = \frac{dw}{dt} = u i.$$

Если в произвольный конкретный момент времени направления напряжения u и тока i совпадают, то мгновенная мощность рассматриваемого участка электрической цепи положительна, $p > 0$. Это означает, что в данный момент времени в рассматриваемый участок поступает электроэнергия из внешней по отношению к нему цепи. Если направления напряжения u и тока i противоположны, то мгновенная мощность отрицательная, $p < 0$, рассматриваемый участок цепи отдает электрическую энергию во внешнюю по отношению к нему цепь. При этом энергия рассматриваемого участка электрической цепи может определяться также выражением:

$$w(t) = \int_{-\infty}^t p dt.$$

Изменение энергии w за конкретный промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$ характеризуется выражением:

$$w = w(t_2) - w(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} p dt.$$

Электрическая энергия измеряется также в джоулях:

$$[w] = [u] [q] = [u] [i] [t] = \text{В Кл} = \text{В А с} = \text{Вт с} = \text{Дж}.$$

Единицей измерения электрической мощности является ватт:

$$[p] = \frac{[w]}{[t]} = [u] [i] = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В А} = \text{Вт}.$$

3.6. Вопросы и задания для самоконтроля

1) Дайте определение понятию «электрический ток» или «ток проводимости».

2) Какое направление принято в качестве технического направления электрического тока?

3) Количество заряда, проходящего через поперечное сечение проводника, характеризуется выражением $q(t) = Q_0 + a t$, где $Q_0 = 3 \cdot 10^{-2}$ Кл, коэффициент $a = 0,02$ Кл/с. Получите выражение для тока $i(t)$ в проводнике. На одном поле постройте графики $q(t)$ и $i(t)$.

4) Количество заряда, проходящего через поперечное сечение проводника, определяется выражением $q(t) = Q_0 + Q_m \sin kt$, где $Q_0 = 10^{-4}$ Кл, $Q_m = 2 \cdot 10^{-4}$ Кл, $k = 10^3$ с⁻¹. Получите выражение для тока $i(t)$ в проводнике. На одном поле постройте графики $q(t)$ и $i(t)$.

5) Сформулируйте три возможных определения напряжения между двумя точками электрической цепи (электрического поля).

6) Под действием каких сил и в каких направлениях перемещаются электрические заряды в источниках и в приемниках электрической энергии?

7) Дайте определение понятию «электродвижущая сила (ЭДС) источника». Чему равно численное значение ЭДС?

8) Чем отличается пассивный участок (пассивный элемент) от активного участка (элемента) электрической цепи?

9) Мгновенные значения энергии и мощности участка электрической цепи в конкретный момент времени $w(t) > 0$, $p(t) > 0$. Что это означает? А если $w(t) < 0$ и $p(t) < 0$?

10) К конденсатору емкостью $C = 20$ мкФ приложено переменное напряжение $u(t) = 300 \sin 314t$. Постройте график зависимости $u(t)$ и определите промежутки времени t , на которых конденсатор запасает энергию (заряжается) и на которых он возвращает ранее затраченную энергию источнику (разряжается). Определите максимальный запас энергии конденсатора.

11) Через индуктивную катушку с индуктивностью $L = 0,6$ Гн протекает переменный ток $i(t) = 2 \sin 31,4t$. Постройте график зависимости $i(t)$ и определите промежутки времени t , на которых индуктивная катушка запасает энергию и на которых она возвращает ранее запасенную энергию источнику. Определите максимальный запас энергии индуктивной катушки.

12) Назовите единицы измерения заряда q , тока i , потенциала ϕ , напряжения u , ЭДС e , электрической энергии w и мощности p .

4. ИДЕАЛИЗИРОВАННЫЕ ПАССИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Из перечня представленных в разделе 2.1 двухполюсных идеализированных элементов электрических цепей к идеализированным пассивным элементам относятся сопротивление, емкость и индуктивность. Ниже рассматриваются основные свойства и характеристика каждого из них.

4.1. Сопротивление

Сопротивлением называют идеализированный пассивный элемент электрической цепи, в котором электрическая энергия необратимо преобразуется в другой конкретный вид энергии – тепловую, механическую, световую или иной необходимый для жизнедеятельности человека вид энергии. При этом сопротивление как идеализированный элемент не обладает свойством запасания энергии электрического или магнитного полей.

Сопротивление по своим свойствам является наиболее близким к реальному элементу электрической цепи – высококачественному резистору. Одновременно сопротивление является основной характеристикой резистора. Следует отметить, что кроме основного процесса потребления электрической энергии и ее преобразования в тепловую энергию (нагрев резистора при протекании по нему электрического тока) в резисторе могут иметь место процессы запасания энергии электрического и/или магнитного полей.

Термин «сопротивление» в практике используется для обозначения реального элемента электрической цепи – резистора (см. на рис. 2.2, а), а также в качестве количественной характеристики способности резистора, любого другого элемента электрической цепи, любого электротехнического устройства потреблять электрическую энергию с преобразованием ее в другой необходимый вид энергии.

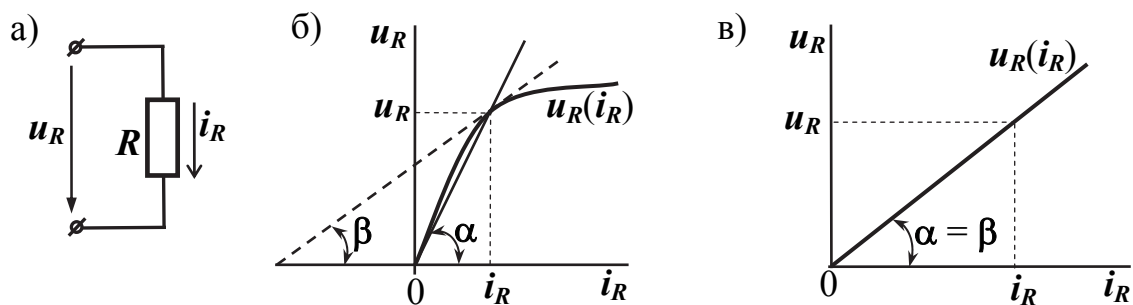


Рис. 4.1. Графическое изображение и вольт-амперные характеристики сопротивления (резистора)

В результате термин «сопротивление» можно использовать:

- как название, графическое изображение идеализированного элемента электрической цепи (рис. 4.1, *a*) и как единственную характеристику этого элемента;
- как основную характеристику и графическое изображение реального элемента электрической цепи – резистора (см. рис. 2.2, *a*);
- как упрощенную модель резистора, в которой учтена его основная характеристика – сопротивление.

Связь между током и напряжением сопротивления (резистора) на рис. 4.1, *a* характеризуется зависимостью $u_R = u_R(i_R)$ или $i_R = i_R(u_R)$, которую называют вольт-амперной характеристикой (ВАХ) сопротивления (резистора). ВАХ резистора в общем случае имеет нелинейный характер (рис. 4.1, *б*). Если такая зависимость получена при постоянных токах и напряжениях, то она носит название статической характеристики. Аналогичная зависимость между мгновенными значениями тока i и напряжения u на зажимах резистора называется динамической ВАХ.

С использованием динамической вольт-амперной характеристики сопротивления или резистора (см. рис. 4.1, *б*) можно определить его статическое и динамическое сопротивление:

$$R_{ст} = \frac{u_R}{i_R}, \quad R_{дин} = \frac{d u_R}{d i_R}.$$

Величину, равную динамическому сопротивлению при бесконечно медленном изменении напряжения и тока, называют дифференциальным сопротивлением $R_{диф}$.

Следует отметить, что статическое сопротивление резистора пропорционально $\operatorname{tg} \alpha$, где α – угол наклона секущей, а динамическое сопротивление – $\operatorname{tg} \beta$, где β – угол наклона касательной в точке ВАХ, для которой определяется сопротивление (рис. 4.1, *б*):

$$R_{ст} = k \operatorname{tg} \alpha, \quad R_{дин} = k \operatorname{tg} \beta,$$

где k – коэффициент пропорциональности, учитывающий масштабы по оси напряжений m_u (В/см, В/мм) и по оси токов m_i (А/см, А/мм) (рис. 4.1, *б*),

$$k = \frac{m_u}{m_i}.$$

Статическое и динамическое сопротивление при нелинейной ВАХ резистора (см. рис. 4.1, *б*) изменяются при изменении тока (напряжения) – мы имеем дело с резисторами с нелинейным сопротивлением. При этом $R_{ст} > 0$ всегда, а $R_{дин}$ может менять знак, например, когда ВАХ характеризуются зависимостями, представленными на рис. 4.2.

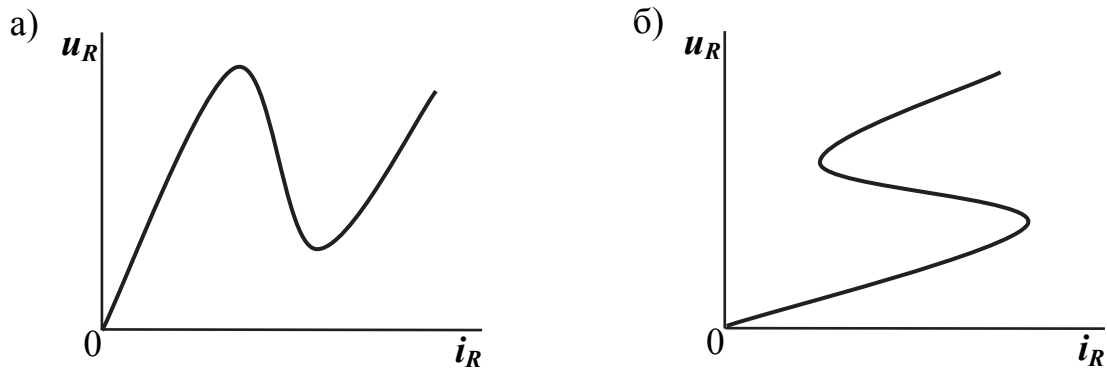


Рис. 4.2. Вольт-амперные характеристики нелинейных сопротивлений

При линейной вольт-амперной характеристике резистора (рис. 4.1, в) статическое и динамическое сопротивления одинаковы и постоянны:

$$R_{ст} = R_{дин} = k \operatorname{tg} \alpha = k \operatorname{tg} \beta = \operatorname{const}.$$

Необходимо отметить, что для большинства резисторов зависимости $u_R = u_R(i_R)$ или $i_R = i_R(u_R)$ в большей или в меньшей степени отличаются от линейной характеристики. При этом в большинстве случаев в ограниченном диапазоне изменения напряжения (тока) нелинейностью ВАХ можно пренебречь и рассматривать сопротивление такого резистора как линейное – постоянное.

Зависимость между напряжениями и токами на зажимах линейного сопротивления (см. рис. 4.1, а) определяется законом Ома:

$$u_R = R i_R, \quad i_R = \frac{u_R}{R} \quad \text{или} \quad u_G = \frac{i_G}{G}, \quad i_G = G u_G,$$

где величина, обратная сопротивлению, $G = \frac{1}{R}$ носит название электрической проводимости или просто проводимости. При этом проводимость можно также рассматривать как идеализированный пассивный элемент электрической цепи.

Следует отметить, что наличие таких элементов в цепи приводит к потерям электрической энергии или к ее необратимому преобразованию в другие виды энергии.

Единицы измерения сопротивления – $[R] = \text{Ом}$, проводимости – $[G] = [R]^{-1} = \text{Ом}^{-1} = \text{См}$ (Сименс). Графические обозначения сопротивления и проводимости как элементов электрической цепи одинаковы (см. рис. 4.1, а).

Мгновенная мощность сопротивления, проводимости определяется выражениями

$$p_R = p_G = u_R i_R = u_G i_G = R i_R^2 = G u_G^2,$$

и при выбранных положительных направлениях напряжения и тока всегда имеет положительное значение, что еще раз подтверждает потребление электрической энергии этими элементами цепи. Электрическая энергия, поступающая в сопротивление (проводимость, потребляемая любым из этих элементов) и/или преобразуемая в нем в другие виды энергии также всегда положительна:

$$w_R = w_G = \int_{-\infty}^t p_R dt = R \int_{-\infty}^t i^2 dt = G \int_{-\infty}^t u^2 dt > 0.$$

Таким образом, в любой момент времени сопротивление или проводимость могут только потреблять энергию от источников (от внешней по отношению к любому из них цепи) и ни в какие моменты времени не могут отдавать энергию другим элементам цепи.

4.2. Емкость

Емкостью называется идеализированный элемент электрической цепи, который обладает свойством запасать энергию электрического поля. При этом запасаения энергии магнитного поля или преобразования электрической энергии в другие виды энергии (потребления электрической энергии) в емкости не происходит.

По своим свойствам к идеализированному пассивному элементу – емкости – наиболее близкими являются реальные элементы электрической цепи – конденсаторы. Основной особенностью конденсатора является его способность запасать энергию электрического поля. Но, в отличие от идеализированного элемента – емкости – в конденсаторе имеют место потери энергии в диэлектрике и обкладках конденсатора (потребление электрической энергии с последующим ее преобразованием в тепловую энергию – конденсатор при протекании по нему тока нагревается), а также происходит запасаение энергии магнитного поля.

Термин «емкость» в практике используется для обозначения реального элемента электрической цепи – конденсатора (см. на рис. 2.2, б), а также в качестве количественной характеристики способности конденсатора, любого другого элемента электрической цепи, любого электротехнического устройства запасать энергию электрического поля.

Таким образом, термин «емкость» можно использовать:

- как название, графическое изображение идеализированного элемента электрической цепи (рис. 4.3, а) и как единственную характеристику этого элемента – емкость;

- как основную характеристику и графическое изображение реального элемента электрической цепи – конденсатора (см. рис. 2.2, б и 4.3, а);
- как упрощенную модель конденсатора, в которой учтена его основная характеристика – емкость.

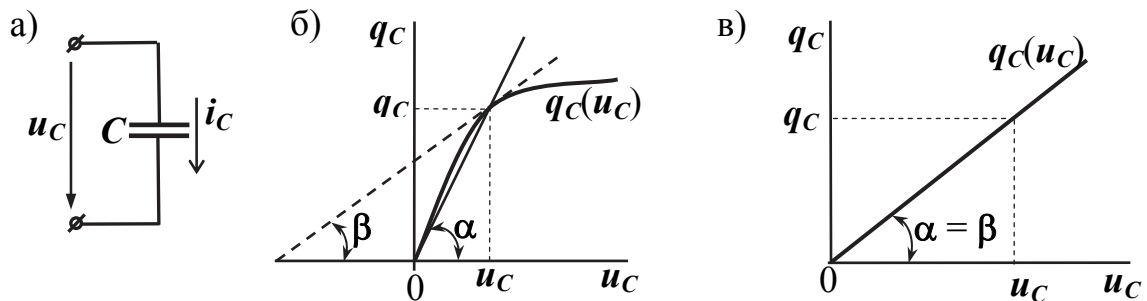


Рис. 4.3. Графическое изображение и кулон-вольтовые характеристики емкости (конденсатора)

Зависимость заряда на обкладках конденсатора (емкости) от напряжения между обкладками $q_c = q_c(u_c)$ носит название кулон-вольтовой характеристики (КВХ), которая может быть нелинейной (рис. 4.3, б) или линейной (рис. 4.3, в). По нелинейной характеристике конденсатора (емкости) можно определить статическую $C_{ст}$ и динамическую $C_{дин}$ емкости нелинейного конденсатора (см. рис. 4.3, б):

$$C_{ст} = \frac{q_c}{u_c} = k \operatorname{tg} \alpha, \quad C_{дин} = \frac{dq_c}{du_c} = k \operatorname{tg} \beta.$$

Здесь k – коэффициент, учитывающий используемые значения масштабов для заряда m_q по оси ординат и для напряжения m_u по оси абсцисс (см. рис. 4.3, б), $k = \frac{m_q}{m_u}$. Углы α и β – углы наклона секущей и касательной к зависимости $q_c = q_c(u_c)$ на рис. 4.3, б. При линейной КВХ (см. рис. 4.3, в) конденсатор является линейным, его емкость постоянна:

$$C = C_{ст} = C_{дин} = \frac{q_c}{u_c} = \operatorname{const}.$$

Единицей измерения емкости является фарада: $[C] = \frac{[q]}{[u]} = \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = \text{Ф}$.

Учитывая, что ток определяется скоростью изменения заряда, связь между током и напряжением емкости определяется выражением:

$$i_C = \frac{dq_C}{dt} = \frac{d}{dt}(Cu_C) = C \frac{du_C}{dt}.$$

В результате ток емкости пропорционален скорости изменения напряжения между обкладками конденсатора. Если напряжение на зажимах емкости не изменяется во времени (постоянное), то ток емкости равен нулю.

Из последнего выражения для тока можно определить напряжение на емкости как

$$u_C = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_C dt,$$

где $t = -\infty$ необходимо для учета возможных изменений заряда емкости и, как следствие, напряжения u_C . При этом предполагается, что при $t = -\infty$ напряжение на емкости равно нулю. Выражение для напряжения на емкости можно также представить в виде:

$$u_C = u_C(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_C dt \quad \text{или} \quad u_C = u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_C dt.$$

Мгновенная мощность емкости определяется выражением:

$$p_C = u_C i_C = Cu_C \frac{du_C}{dt}.$$

Из представленного выражения следует, что, если $u_C > 0$ (его направление совпадает с условно положительным направлением, указанным стрелкой) и продолжает возрастать ($\frac{du_C}{dt} > 0$, конденсатор заряжается), то мгновенная мощность положительна, $p_C > 0$ – энергия поступает в емкость, она заряжается. Если $u_C > 0$ и убывает, то есть $\frac{du_C}{dt} < 0$, то мгновенная мощность емкости отрицательна ($p_C < 0$), емкость разряжается – отдает энергию во внешнюю по отношению к ней цепь.

При $u_C < 0$ и его увеличении ($\frac{du_C}{dt} > 0$) мгновенное значение мощности отрицательно, емкость разряжается. При $u_C < 0$ и его снижении ($\frac{du_C}{dt} < 0$) мгновенное значение мощности положительно, емкость заряжается.

Другими словами, если знаки напряжения на емкости и его производной по времени совпадают, то мгновенное значение мощности положительно, электрическая энергия поступает в емкость, она заряжается.

При несовпадении этих знаков мгновенное значение мощности отрицательно, емкость разряжается, отдавая энергию во внешнюю цепь.

Запасенная емкостью энергия электрического поля в произвольный момент времени t определяется напряжением на емкости или ее зарядом в этот момент времени:

$$w_C(t) = \int_{-\infty}^t p_C dt = C \int_{-\infty}^t u_C \frac{du_C}{dt} dt = C \int_0^{u_C} u_C du_C = \frac{1}{2} C u_C^2 = \frac{1}{2C} q_C^2.$$

Из представленного выражения следует, что запас энергии электрического поля емкости в любой момент времени t является неотрицательной величиной.

Таким образом, емкость является пассивным идеализированным элементом электрической цепи, который в зависимости от режима работы может или запасть энергию электрического поля, получаемую из внешней по отношению к емкости цепи, или отдавать накопленную энергию во внешнюю цепь.

4.3. Индуктивность

Индуктивностью называют идеализированный пассивный элемент электрической цепи, в котором происходит запасание энергии магнитного поля. При этом запасания энергии электрического поля или потребления электрической энергии с ее преобразованием в другие виды энергии в индуктивности не происходит.

Наиболее близким к индуктивности как идеализированному элементу реальным элементом электрической цепи является индуктивная катушка (или катушка индуктивности). Но в отличие от индуктивности в индуктивной катушке происходит потребление электрической энергии с ее последующим преобразованием в тепловую энергию (катушка при протекании по ней тока нагревается), а также запасание энергии электрического поля. Способность реального элемента (индуктивной катушки) и рассматриваемого идеализированного пассивного элемента (индуктивности) электрической цепи запасть энергию магнитного поля количественно характеризуется параметром, который называется индуктивностью.

Термин «индуктивность» в практике используется для обозначения реального элемента электрической цепи – индуктивной катушки (см. рис. 2.2, в), а также в качестве количественной характеристики способности индуктивной катушки, любого другого элемента электрической цепи, любого электротехнического устройства запасть энергию магнитного поля.

В результате термин «индуктивность» можно использовать:

- как название, графическое изображение идеализированного элемента электрической цепи (рис. 4.4, а) и как единственную характеристику этого элемента – индуктивность;
- как основную характеристику и графическое изображение реального элемента электрической цепи – индуктивной катушки (см. рис. 2.2, в и 4.4, а);
- как упрощенную модель индуктивной катушки, в которой учтена только ее основная характеристика – индуктивность.

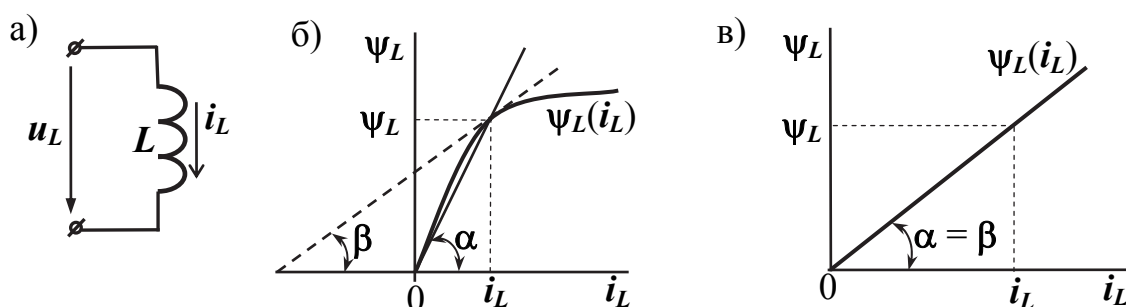


Рис. 4.4. Графическое изображение и вебер-амперные характеристики индуктивности (индуктивной катушки)

Связь между напряжением и током индуктивности (индуктивной катушки) определяется законом электромагнитной индукции: **при изменении во времени магнитного потока $\varphi(t)$, пронизывающего индуктивную катушку, в ней наводится ЭДС $e(t)$, пропорциональная скорости изменения потокосцепления $\psi(t)$ индуктивной катушки и направленная таким образом, что вызываемый этой ЭДС ток стремится воспрепятствовать изменению магнитного потока катушки:**

$$e(t) = - \frac{d\psi(t)}{dt},$$

где потокосцепление $\psi(t)$ определяется как суммарный магнитный поток, пронизывающий все витки индуктивной катушки: $\psi(t) = \sum_{i=1}^n \varphi(t)$. Если все витки индуктивной катушки пронизывает одинаковый магнитный поток, в этом случае: $\psi(t) = w \varphi(t)$, где w – число витков индуктивной катушки. Единицей измерения потокосцепления индуктивности (индуктивной катушки), как и магнитного потока, является $[\psi] = [\varphi] = \text{В с} = \text{Вб}$.

Основной характеристикой индуктивности (индуктивной катушки) является ее вебер-амперная характеристика (ВБАХ), определяющая зависимость между током индуктивности i_L и созданным этим током суммарным магнитным потоком (потокосцеплением) Ψ_L , пронизывающим витки индуктивной катушки $\Psi_L(i_L)$. Это потокосцепление (магнитный поток) называют еще потокосцеплением (магнитным потоком) самоиндукции, а электродвижущую силу, наводимую им, – ЭДС самоиндукции. ЭДС самоиндукции компенсирует приложенное к индуктивности (индуктивной катушке) переменное напряжение, $u_L(t) = -e(t)$.

В общем случае ВБАХ индуктивной катушки (индуктивности) является нелинейной характеристикой (рис. 4.4, б). По нелинейной характеристике индуктивной катушки (индуктивности) можно определить статическую $L_{ст}$ и динамическую $L_{дин}$ емкости нелинейной индуктивной катушки (см. рис. 4.4, б):

$$L_{ст} = \frac{\Psi_L}{i_L} = k \operatorname{tg} \alpha, \quad L_{дин} = \frac{d\Psi_L}{di_L} = k \operatorname{tg} \beta.$$

Здесь k – коэффициент, учитывающий используемые значения масштабов для потокосцепления m_Ψ по оси ординат и для тока m_i по оси

абсцисс (см. рис. 4.4, б), $k = \frac{m_\Psi}{m_i}$. Углы α и β – углы наклона секущей и касательной к зависимости $\Psi_L = \Psi_L(i_L)$ на рис. 4.4, б. При линейной ВБАХ (рис. 4.4, в) индуктивная катушка является линейной, ее индуктивность постоянна:

$$L = L_{ст} = L_{дин} = \frac{\Psi_L}{i_L} = \operatorname{const}.$$

Единицей измерения индуктивности является генри (Гн):

$$[L] = \frac{[\Psi]}{[i]} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}} = \text{Ом} \cdot \text{с} = \text{Гн}.$$

Для линейной индуктивной катушки ($L = \operatorname{const}$) напряжение на индуктивности u_L (напряжение самоиндукции), совпадающее по направлению с током i_L (рис. 4.4, а), определяется выражением:

$$u_L = -e_L = \frac{d\Psi_L}{dt} = \frac{d}{dx}(L \cdot i_L) = L \frac{di_L}{dt}.$$

Напряжение на индуктивности u_L пропорционально скорости изменения тока i_L . При протекании через индуктивность постоянного тока напряжение на ее зажимах равно нулю, то есть сопротивление индуктивности постоянному току также равно нулю (отсутствует ЭДС самоиндукции).

Ток индуктивности (индуктивной катушки) определяется выражением:

$$i_L = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u_L dt, \quad \text{или} \quad i_L = i_L(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u_L dt = i_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u_L dt.$$

Мгновенная мощность индуктивности:

$$p_L = u_L i_L = L i_L \frac{di_L}{dt}.$$

Из выражения для p_L следует, что, если $i_L > 0$ (его направление совпадает с условно положительным направлением, указанным стрелкой) и продолжает возрастать ($\frac{di_L}{dt} > 0$), то мгновенная мощность положительна,

$p_L > 0$ – энергия поступает в индуктивность из внешней по отношению к ней цепи, индуктивность запасает энергию. Если $i_L > 0$ и убывает, то есть $\frac{di_L}{dt} < 0$, то мгновенная мощность индуктивности отрицательна ($p_L < 0$),

индуктивность возвращает ранее запасенную энергию во внешнюю по отношению к ней цепь.

При $i_L < 0$ и его увеличении ($\frac{di_L}{dt} > 0$) мгновенное значение мощности отрицательно, индуктивность отдает энергию во внешнюю цепь. При $i_L < 0$ и его снижении ($\frac{di_L}{dt} < 0$) мгновенное значение мощности положительно, энергия поступает в индуктивность из внешней цепи.

Другими словами, если знаки тока индуктивности и его производной по времени совпадают, то мгновенное значение мощности положительно, индуктивность запасает электрическую энергию (энергию магнитного поля). При несовпадении этих знаков мгновенное значение мощности отрицательно, индуктивность возвращает ранее запасенную энергию во внешнюю по отношению к ней цепь.

Запасенная индуктивностью энергия магнитного поля в произвольный момент времени t определяется током индуктивности или ее потокосцеплением в этот момент времени:

$$w_L(t) = \int_{-\infty}^t p_L dt = L \int_{-\infty}^t i_L \frac{di_L}{dt} dt = L \int_0^{i_L} i_L di_L = \frac{1}{2} L i_L^2 = \frac{1}{2L} \Psi_L^2.$$

Из представленного выражения следует, что запас энергии магнитного поля индуктивности в любой момент времени t является неотрицательной величиной.

Учитывая способности индуктивности и емкости запасать электрическую энергию и отсутствие у них способности потреблять энергию, их еще называют энергоемкими или реактивными элементами электрических цепей.

4.4. Дуальность идеализированных пассивных элементов

В табл. 4.1 представлены выражения для основных электрических величин, характеризующих рассмотренные идеализированные пассивные элементы.

Приведенные в таблице соотношения позволяют установить определенную аналогию между ними. Например, сравнивая выражения для напряжения на индуктивности и тока емкости, тока индуктивности и напряжения на емкости, мгновенной мощности индуктивности и емкости или выражения запаса энергии этих элементов, можно убедиться в их одинаковой структуре. Если в первых из перечисленных пар выражениях (напряжение на индуктивности, ток индуктивности, ее мгновенная мощность, запас энергии индуктивности) заменить напряжение u током i , ток i – напряжением u , а индуктивность – емкостью, то каждое из них перейдет во второе (ток емкости, напряжение на емкости, ее мгновенная мощность, запас энергии емкости соответственно). И наоборот, если аналогичную замену с заменой емкости на индуктивность реализовать во вторых выражениях, то они перейдут в первые выражения. Аналогично переходят друг в друга соотношения для сопротивления и проводимости при дополнительной взаимной замене R и G .

Два выражения, обладающие рассмотренным свойством взаимного перехода друг в друга, называются **дуальными**. При этом взаимно заменяемые величины являются **дуальными величинами**, а элементы, которые характеризуются дуальными соотношениями для основных электрических величин, называют **дуальными элементами**.

Таким образом, **элементы, для которых основные соотношения имеют одинаковую структуру и могут быть получены одно из другого путем соответствующих (рассмотренных) замен, называются дуальными**. В результате сопротивление и проводимость, емкость и индуктивность (попарно) являются дуальными элементами.

Свойство дуальности характерно не только для рассмотренных идеализированных пассивных элементов. Дуальными могут быть идеализированные активные элементы, а также электрические цепи, состоящие из идеализированных активных и пассивных элементов. В ряде случаев использование принципа дуальности позволяет облегчить исследование процессов в цепи. Так, если известны основные соотношения, описывающие процессы в некоторой цепи, то соответствующие соотношения для дуальной цепи могут быть получены без вывода, на основании использования свойства дуальности.

Таблица 4.1

Дуальность идеализированных пассивных элементов

Типы идеализированных элементов	Основные соотношения для:				энергии
	тока	напряжения	мощности		
Сопrotивление $R = \frac{u_R}{i_R}$	$i_R = \frac{u_R}{R}$	$u_R = R i_R$	$p_R = R i_R^2 = \frac{u_R^2}{R}$	$w_R = \int p_R dt = \int R i^2 dt$	
Проводимость $G = \frac{i_G}{u_G}$	$i_G = G u_G$	$u_G = \frac{i_G}{G}$	$p_G = G u_G^2 = \frac{i_G^2}{G}$	$w_G = \int p_G dt = \int G u_G^2 dt$	
Емкость $C = \frac{q_C}{u_C}$	$i_C = C \frac{du_C}{dt}$	$u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt$	$p_C = C u_C \frac{du_C}{dt}$	$w_C = \frac{1}{2} C u_C^2$	
Индуктивность $L = \frac{\Psi_L}{i_L}$	$i_L = \frac{1}{L} \int u_L dt$	$u_L = L \frac{di}{dt}$	$p_L = L i_L \frac{di_L}{dt}$	$w_L = \frac{1}{2} L i_L^2$	

4.5. Схемы замещения реальных элементов электрических цепей

Как уже отмечалось, идеализированные пассивные элементы, являясь основными параметрами соответствующих реальных элементов электрических цепей, используются для формирования схем замещения (моделей) реальных элементов и состоящих из них электрических цепей. Ниже представлены общие соображения о соответствиях между реальными элементами электрических цепей и их моделями (схемами замещения), составленными из идеализированных пассивных элементов – сопротивления R или проводимости G , индуктивности L , емкости C .

Формируя схему замещения реального элемента из идеализированных элементов, можно с большей точностью представить характеристику поведения любого реального устройства по отношению к интересующим нас внешним выводам. Увеличение числа входящих в схему замещения идеальных элементов, каждый из которых учитывает характерные для него электромагнитные процессы, одновременно свойственные анализируемому реальному элементу, повышает точность схемы замещения, но усложняет ее исследование. Формирование схемы замещения реальных элементов или устройств является в общем случае достаточно сложным и трудным делом, требующим знания процессов и возможных режимов работы исследуемого устройства, учета целей исследования и требований к точности расчетов.

В настоящем разделе в качестве простых примеров рассмотрены применяемые иногда схемы замещения достаточно распространенных реальных элементов электрических цепей: резистора, индуктивной катушки и конденсатора. Так, на рис. 4.5 представлена достаточно полная схема замещения резистора, где R – сопротивление токонесущего слоя (основной параметр резистора), L_R – индуктивность токонесущего слоя, R_K – сопротивление контактов токонесущего слоя, $R_{ИЗ}$ – сопротивление изоляции, C_B – емкость между выводами, R_B – сопротивление выводов, L_B – индуктивность выводов.

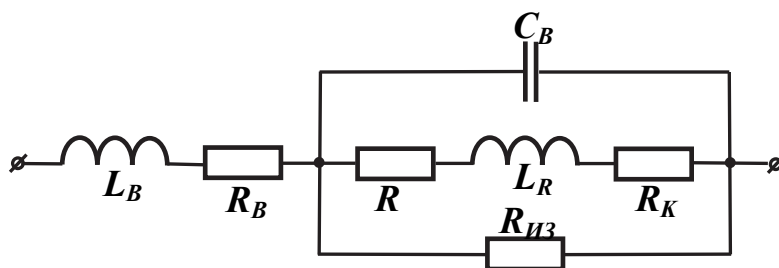


Рис. 4.5. Схема замещения резистора

На рис. 4.6 изображены упрощенные схемы замещения резистора (рис. 4.6, а), конденсатора (рис. 4.6, б) и индуктивной катушки (рис. 4.6, в), структура и состав элементов которых позволяют учесть процессы, наиболее характерные для перечисленных элементов. При этом обозначения и характеристики элементов на рис. 4.6, а, соответствуют аналогичным элементам, представленным на рис. 4.5. На рис. 4.6, б C – емкость конденсатора (основной параметр), R_Y – сопротивление утечки (учитывает неидеальность слоя изоляции между обкладками конденсатора, что приводит к появлению тока утечки, в том числе и при постоянном напряжении на конденсаторе), R_B и L_B – также сопротивление и индуктивность выводов. В схеме замещения индуктивной катушки (см. рис. 4.6, в) L – индуктивность катушки (основной параметр), R_L – сопротивление проводов катушки, $R_{ИЗ}$ – сопротивление изоляции проводов, C_L – емкость, учитывающая межвитковую емкость и емкость между контактами катушки.

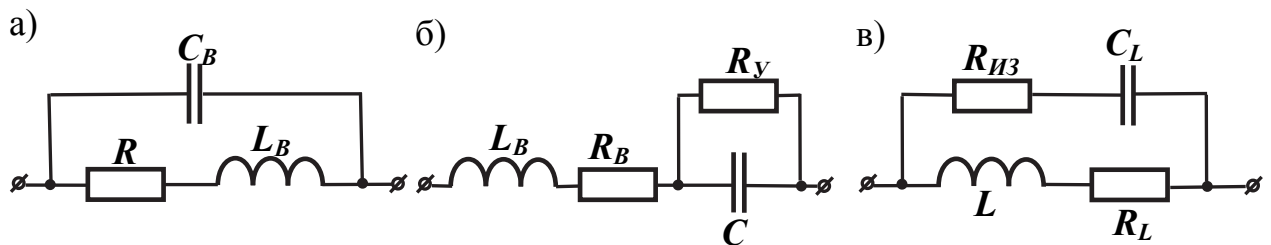


Рис. 4.6. Упрощенные схемы замещения реальных элементов

В качестве примера на рис. 4.7 представлены схемы замещения конденсатора для различных частот тока, протекающего по нему или приложенного к нему напряжения. Схема замещения на рис. 4.7, а используется при низких частотах питающего напряжения, на рис. 4.7, б – при средних частотах. Схема замещения, представленная на рис. 4.7, в, предназначена для высоких частот приложенного к конденсатору напряжения. Обозначения и характеристики элементов схем (рис. 4.7) соответствуют аналогичным элементам на схеме замещения конденсатора на рис. 4.6, б.

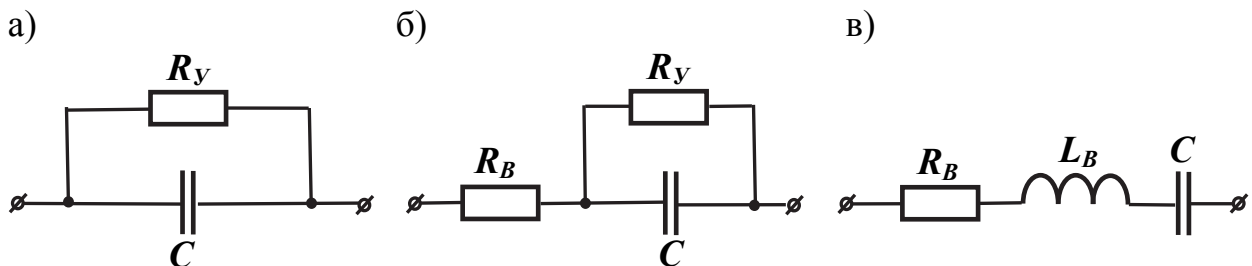


Рис. 4.7. Схемы замещения конденсатора для различных частот

Рассматривая представленные здесь схемы, можно заметить, что совершенно разные устройства могут иметь близкие по внешнему виду схемы замещения. При этом количественные значения параметров их элементов существенно отличаются.

Наконец, необходимо подчеркнуть, что схемы замещения передают поведение устройств только по отношению к их внешним выводам, но, как правило, не могут в полном объеме передавать содержание внутренних процессов.

4.6. Вопросы и задания для самоконтроля

1) Связи между какими электрическими величинами характеризуют сопротивление, емкость, индуктивность? Какие характеристики связывают эти величины?

2) Сформулируйте определения для статических и динамических сопротивлений, емкостей, индуктивностей.

3) Вольт-амперная характеристика резистора $u_R(i_R)$ представлена приведенными в табл. 4.2 соответствующими значениями i_R и u_R .

Таблица 4.2

Вольт-амперная характеристика резистора

$i_R, \text{ A}$	0	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8
$u_R, \text{ В}$	0	20	40	70	90	100

Необходимо по данным табл. 4.2 построить вольт-амперную характеристику резистора $u_R(i_R)$. Для указанных в таблице значений тока рассчитать статическое $R_{ст}$ и динамическое $R_{дин}$ сопротивления резистора. На одном поле с вольт-амперной характеристикой резистора построить зависимости от тока статического $R_{ст}(i_R)$ и динамического $R_{дин}(i_R)$ сопротивлений.

4) Кулон-вольтная характеристика конденсатора $q_C(u_C)$ представлена приведенными в табл. 4.3 соответствующими значениями u_C и q_C . По данным в табл. 4.3 постройте кулон-вольтную характеристику конденсатора. Для указанных в табл. 4.3 значений напряжения на конденсаторе рассчитать его статическую $C_{ст}$ и динамическую $C_{дин}$ емкости. На одном поле с кулон-вольтной характеристикой конденсатора построить зависимости от напряжения статической $C_{ст}(u_C)$ и динамической $C_{дин}(u_C)$ емкостей конденсатора.

Таблица 4.3

Кулон-вольтная характеристика конденсатора

$u_C, \text{ В}$	0	5	10	20	50	75
$q_C, 10^{-6} \text{ Кл}$	0	20	40	55	70	75

5) Вебер-амперная характеристика индуктивной катушки $\psi_L(i_L)$ представлена приведенными в табл. 4.4 соответствующими значениями i_L и ψ_L . По данным в табл. 4.4 необходимо построить вебер-амперную характеристику индуктивной катушки. Для указанных в табл. 4.4 значений тока катушки рассчитать ее статическую $L_{ст}$ и динамическую $L_{дин}$ индуктивности. На одном поле с вебер-амперной характеристикой индуктивной катушки построить зависимости от тока катушки статической $L_{ст}(i_L)$ и динамической $L_{дин}(i_L)$ индуктивностей катушки.

Таблица 4.4

Вебер-амперная характеристика индуктивной катушки

i_L, A	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1,0
$\psi_L, 10^{-3} \text{ Вб}$	0	2	10	30	50	60	65	70

6) К конденсатору емкостью $C = 20$ мкФ приложено переменное напряжение $u(t) = 300\sin 314t$. Постройте график зависимости $u(t)$ и определите промежутки времени t , на которых конденсатор запасает энергию (заряжается) и на которых он возвращает ранее затраченную энергию источнику (разряжается). Определите максимальный запас энергии конденсатора.

7) Через индуктивную катушку с индуктивностью $L = 0,6$ Гн протекает переменный ток $i(t) = 2\sin 31,4t$. Постройте график зависимости $i(t)$ и определите промежутки времени t , на которых индуктивная катушка запасает энергию и на которых она возвращает ранее запасенную энергию источнику. Определите максимальный запас энергии индуктивной катушки.

8) Дайте определение понятию «дуальные элементы». Приведите примеры пар дуальных элементов из числа идеализированных пассивных элементов электрических цепей.

9) Сформулируйте определения и приведите примеры дуальных величин, дуальных выражений.

10) Приведите примеры схем замещения реальных элементов электрических цепей. Объясните назначение каждого из используемых в конкретной схеме замещения идеализированных пассивных элементов.

5. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

5.1. Схемы замещения источников электрической энергии

Напряжение на зажимах источника в режиме холостого хода (при отсутствии нагрузки, подключенной к зажимам источника) численно равно ЭДС источника (рис. 5.1, а):

$$U = U_V = -E = |E|.$$

При подключении сопротивления нагрузки R к зажимам источника (рис. 5.1, б) в цепи появляется ток, а напряжение на его зажимах становится меньше ЭДС:

$$U = U_V < E.$$

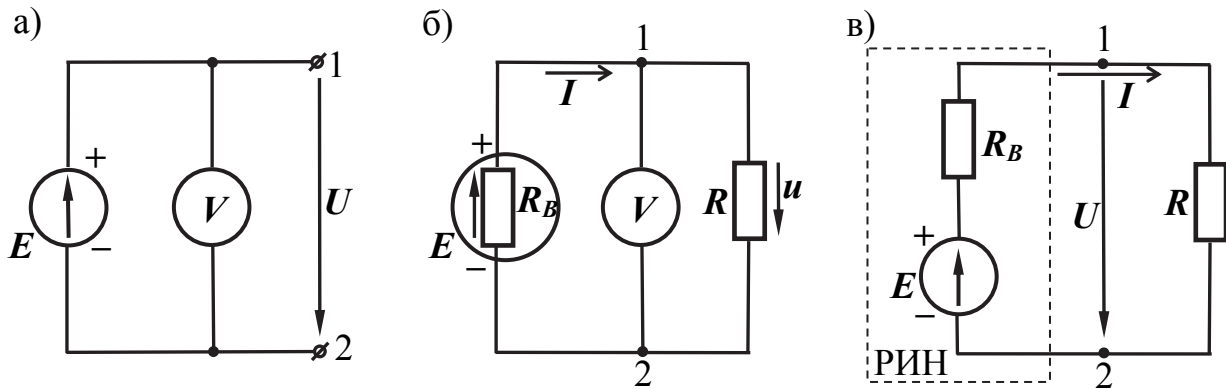


Рис. 5.1. Реальный источник напряжения

Кроме того, при протекании через источник электрического тока он нагревается. Это указывает на то, что при протекании через источник тока часть энергии, генерируемой источником, потребляется самим источником, что можно характеризовать наличием в структуре источника элемента, способного потреблять электроэнергию и преобразовывать ее в тепловую энергию – сопротивления (рис. 5.1, б). В результате эффекты снижения напряжения и потребления части генерируемой энергии можно учесть введением в схему (рис. 5.1, в) последовательно включенного внутреннего сопротивления R_B источника. В результате на рис. 5.1, в представлена схема замещения реального источника напряжения (РИН) с нагрузкой R . При этом направление ЭДС E всегда указывается от меньшего потенциала («-») к большему («+»), U – напряжение на зажимах источника (на сопротивлении нагрузки R), которое в общем случае зависит от сопротивления нагрузки R и, как следствие, от протекающего в цепи тока I , совпадает по направлению с током и направлено, как и ток, от большего потенциала («+») к меньшему («-»).

На рис. 5.1, в напряжение U – напряжение на зажимах источника напряжения (напряжение на сопротивлении нагрузки R), которое меньше ЭДС E на значение падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника:

$$U = I R = \varphi_1 - \varphi_2 = E - R_B I.$$

Выражение $U = E - R_B I$ представляет собой **уравнение внешней характеристики реального источника напряжения – зависимость напряжения на зажимах источника (на нагрузке) от тока, протекающего через источник (тока нагрузки)**. Внешняя характеристика реального источника напряжения при

$$E = \text{const} \quad \text{и} \quad R_B = \text{const}$$

представлена соответствующим графиком на рис. 5.2. Как следует из выражения внешней характеристики и представленной на рис. 5.2 графической зависимости, с ростом тока источника (тока нагрузки) напряжение на зажимах источника (на нагрузке) уменьшается за счет увеличения падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника.

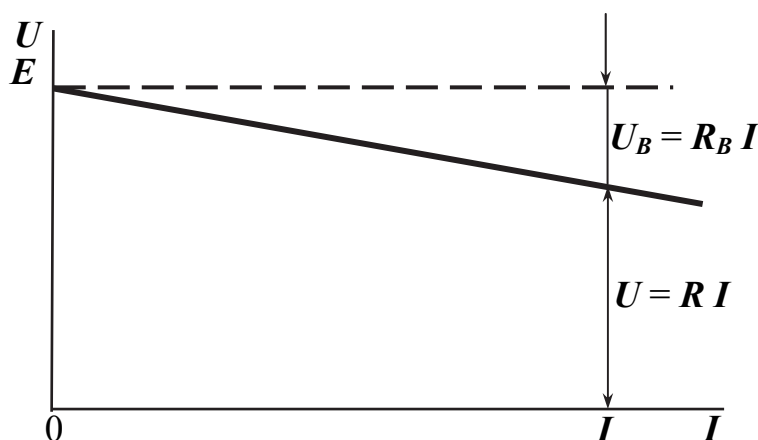


Рис. 5.2. Внешняя характеристика реального источника напряжения

Можно отметить, что, как следует из графика на рис. 5.2, сумма падений напряжения на внутреннем сопротивлении R_B источника и на сопротивлении нагрузки R равна ЭДС E источника:

$$E = R_B I + R I = R_B I + U.$$

Из этого уравнения следует, что ток источника или ток нагрузки (ток в цепи на рис. 5.1, в) определяется выражением:

$$I = \frac{E}{R + R_B}.$$

Если внутреннее сопротивление источника напряжения значительно меньше сопротивления нагрузки ($R_B \ll R$), то при каждом значении тока в цепи (рис. 5.1, в) $U_B = R_B I \ll U = R I$. В этом случае внутренним сопротивлением и падением напряжения на нем можно пренебречь ($R_B \approx 0$,

$U_B = R_B I \approx 0$), схема, представленная на рис. 5.1, в, упрощается – получаем идеальный источник напряжения (ИИН) с $U = E$. На рис. 5.3 приведены схема (рис. 5.3, а) и внешняя характеристика (рис. 5.3, б) идеального источника напряжения.

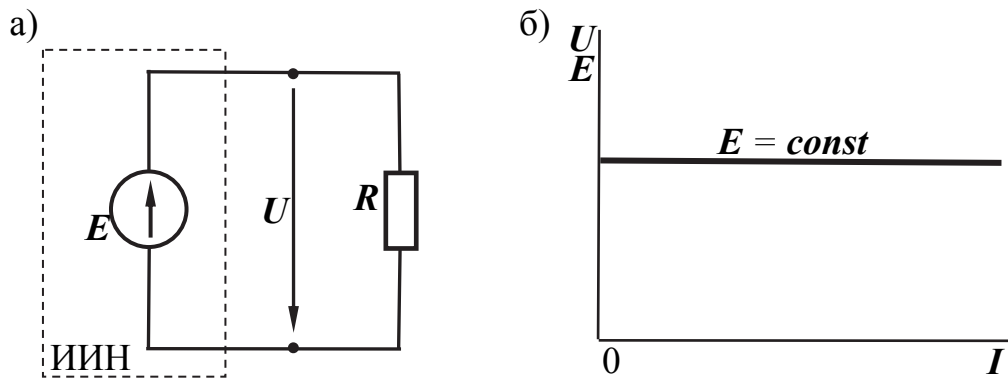


Рис. 5.3. Схема и внешняя характеристика ИИН

Для получения другой эквивалентной схемы замещения источника электрической энергии разделим приведенное выше выражение для ЭДС источника напряжения на его внутреннее сопротивление:

$$\frac{E = R_B I + U}{R_B}.$$

После деления имеем:

$$\frac{E}{R_B} = I + \frac{U}{R_B} = I + U G_B \quad \text{или} \quad J = I + I_B,$$

где $G_B = \frac{1}{R_B} = R_B^{-1}$ – внутренняя проводимость источника электрической

энергии; $J = \frac{E}{R_B}$ – ток при коротком замыкании реального источника

напряжения, назовем его внутренним током эквивалентного источника тока;

$I_B = U G_B$; $I = \frac{U}{R} = U G$ – ток сопротивления (проводимости) нагрузки;

$G = \frac{1}{R}$ – проводимость нагрузки. Полученным выражениям соответствует

схема замещения с реальным источником тока (РИТ) с внутренним током J и параллельно включенной внутренней проводимостью G_B , которая изображена на рис. 5.4, а. Уравнение внешней характеристики реального источника тока имеет вид:

$$I = J - I_B = J - U G_B,$$

а ее общий вид представлен на рис. 5.4, б.

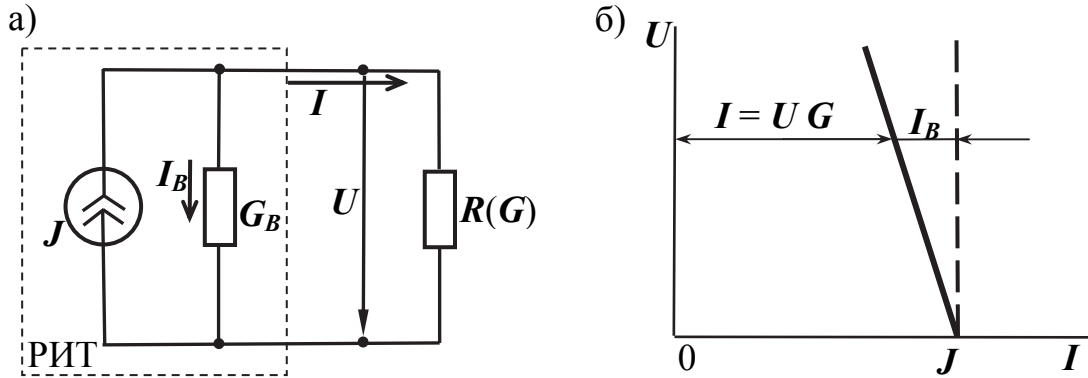


Рис. 5.4. Схема замещения и внешняя характеристика РИТ

Если внутренняя проводимость источника тока намного меньше проводимости нагрузки ($G_B \ll G$), то $I_B = U G_B \ll I = U G$. Тогда можно принять, что $G_B \approx 0$, $I_B \approx 0$ – получаем схему с идеальным источником тока (ИИТ), которая вместе с внешней характеристикой ИИТ представлена на рис. 5.5.

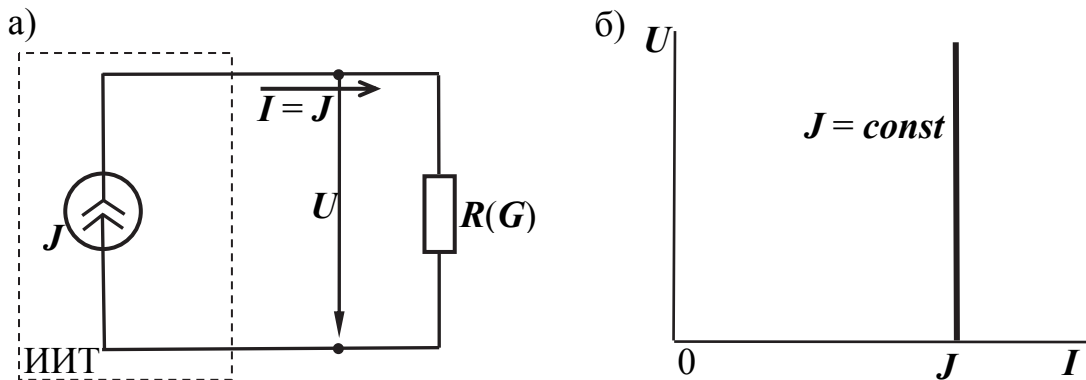


Рис. 5.5. Схема замещения и внешняя характеристика ИИТ

Следует отметить, что внешняя характеристика большинства реальных источников электроэнергии имеет вид, представленный на рис. 5.6.

На рис. 5.6 показано, что в области, близкой к режимам холостого хода, источник электрической энергии работает как реальный источник напряжения с ЭДС, равной напряжению холостого хода $U_{ХХ}$ источника.

В области, близкой к режиму короткого замыкания, источник электроэнергии ведет себя как реальный источник тока с внутренним током, равным току короткого замыкания $I_{кз}$ источника.

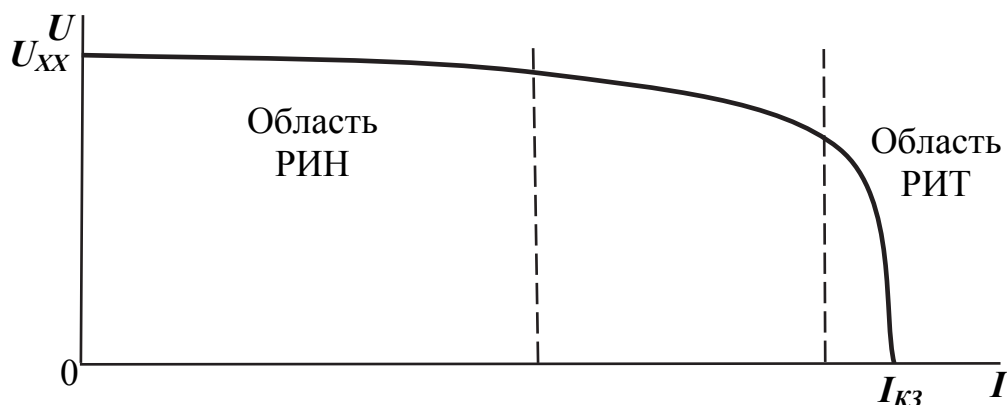


Рис. 5.6. Внешняя характеристика реального источника электроэнергии

Следует отметить, что большинство первичных источников электрической энергии работают в режимах, близких к режимам холостого хода, то есть как реальные источники напряжения. Это обеспечивает достаточно высокий коэффициент полезного действия (как правило, не ниже 90 %) как самого источника, так и линии электропередачи.

5.2. Условия эквивалентности источников напряжения и источников тока

Для получения условий эквивалентности реальных источников тока и напряжения воспользуемся сравнением значений параметров источников в режимах холостого хода и короткого замыкания.

Так, в режиме холостого хода (рис. 5.7) напряжения холостого хода реальных источников напряжения (рис. 5.7, а) и тока (рис. 5.7, б) соответственно равны:

$$U_{xx \text{ рин}} = E, \quad U_{xx \text{ рит}} = \frac{J}{G_B} = J R_B.$$

В режиме короткого замыкания (рис. 5.8) токи короткого замыкания реальных источников напряжения (рис. 5.8, а) и тока (рис. 5.8, б) соответственно равны:

$$I_{кз \text{ рин}} = \frac{E}{R_B}, \quad I_{кз \text{ рит}} = J.$$

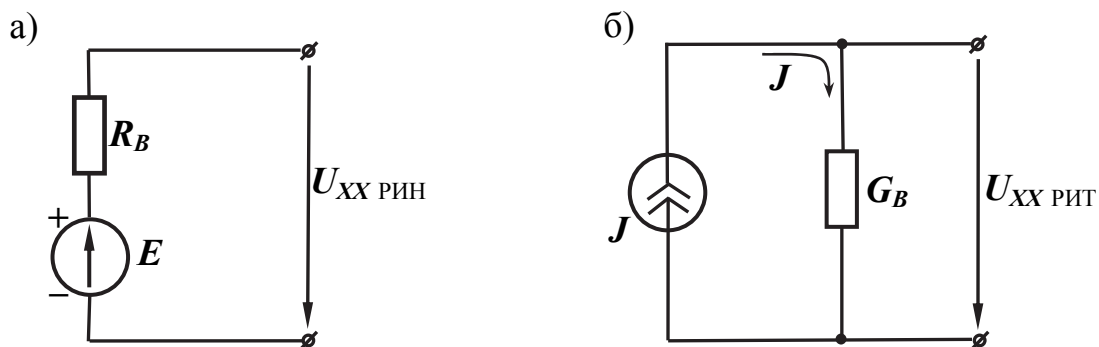


Рис. 5.7. Схемы режимов холостого хода источников

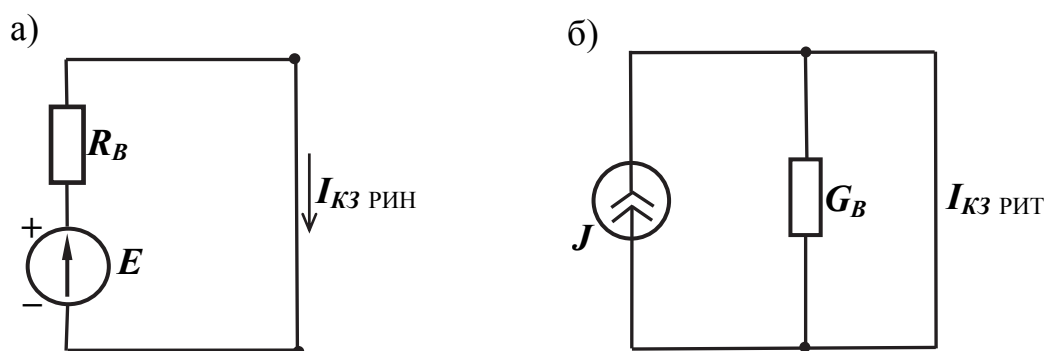


Рис. 5.8. Схемы режимов короткого замыкания источников

В результате для преобразования реального источника напряжения в эквивалентный источник тока (рис. 5.9) можно использовать следующие соотношения:

$$G_B = \frac{1}{R_B}, \quad J = \frac{E}{R_B}.$$

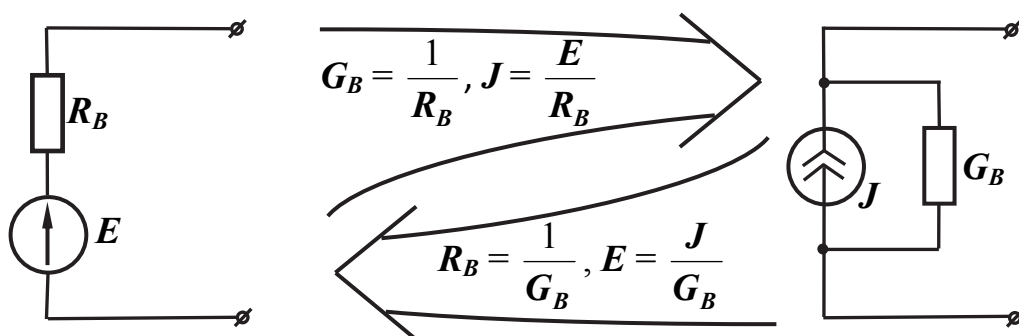


Рис. 5.9. Условия эквивалентности источников напряжения и тока

Для обратного преобразования реального источника тока в эквивалентный реальный источник напряжения (см. рис. 5.9) используются выражения:

$$R_B = \frac{1}{G_B}, \quad E = \frac{J}{G_B}.$$

Таким образом, источник напряжения с ЭДС E и последовательно включенным внутренним сопротивлением R_B эквивалентен источнику тока с внутренним током J , равным току короткого замыкания источника напряжения ($J = I_{KЗ \text{ рин}} = \frac{E}{R_B}$), и параллельно включенной внутренней проводимостью G_B , равной обратному значению последовательно включенного внутреннего сопротивления ($G_B = \frac{1}{R_B}$) источника напряжения.

С другой стороны – источник тока с внутренним током J и параллельно включенной внутренней проводимостью G_B эквивалентен источнику напряжения с ЭДС, равной напряжению холостого хода источника тока ($E = U_{ХХ \text{ рит}} = \frac{J}{G_B}$), и последовательно включенным внутренним сопротивлением R_B , равным обратному значению параллельно включенной проводимости ($R_B = \frac{1}{G_B}$) источника тока.

Рассмотренные условия эквивалентности источников электрической энергии достаточно широко используются при анализе и расчете электрических цепей различной степени сложности. Так, например, преобразование реального источника тока в эквивалентный источник напряжения или источника напряжения в эквивалентный источник тока может способствовать упрощению процессов анализа и/или расчета цепи, применению более целесообразного в конкретном случае метода расчета цепи.

5.3. Вопросы и задания для самоконтроля

1) ЭДС реального источника напряжения $E = 24$ В, внутреннее сопротивление источника $R_B = 2$ Ом. Рассчитайте и постройте внешнюю характеристику источника при изменении тока от 0 до 2 А. При каком значении тока напряжение на нагрузке уменьшится на 10 % от значения ЭДС? Чему при этом равно сопротивление нагрузки?

2) Внешняя характеристика реального источника напряжения представлена зависимостью на рис. 5.10, а. Чему равно внутреннее сопротивление источника? При каком сопротивлении нагрузки ток источника (и последовательно включенной нагрузки) равен 2 А, 3 А? Чему в этих режимах

равно напряжение на нагрузке и падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника? Определите значения параметров (внутренний ток J и параллельно включенную внутреннюю проводимость G_B) эквивалентного источника тока.

3) Определите значения параметров (внутренний ток J и параллельно включенную внутреннюю проводимость G_B) источника тока, внешняя характеристика которого изображена на рис. 5.10, б. Чему равны ток нагрузки и ток внутренней проводимости источника при напряжении на нагрузке, равном 20 В, 40 В? Чему равны сопротивления нагрузки в этих режимах работы? Определите значения параметров (ЭДС E и последовательно включенного внутреннего сопротивления R_B) эквивалентного источника напряжения.

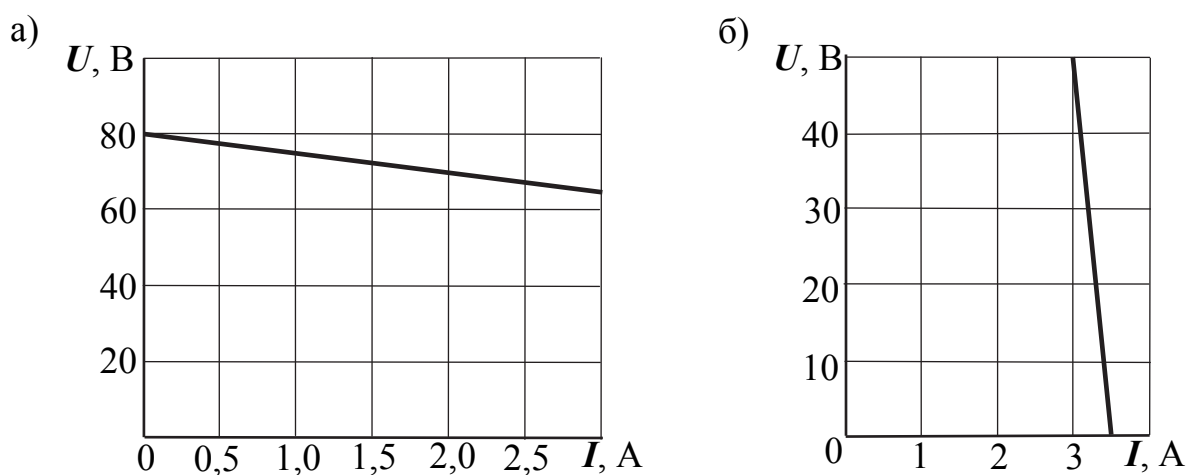


Рис. 5.10. Внешние характеристики источников электроэнергии

4) Представьте схемы замещения и внешние характеристики реальных и идеальных источников напряжения и источников тока. Объясните назначения элементов, входящих в схемы замещения источников. Обоснуйте ход зависимостей, характеризующих внешние характеристики источников.

5) Сформулируйте определение внешней характеристики источника электрической энергии.

6) Охарактеризуйте основные особенности и принципиальные отличия реальных и идеальных источников напряжения и источников тока.

7) Сформулируйте условия эквивалентности реальных источников напряжения и источников тока. Представьте аналитические выражения, определяющие условия эквивалентности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Башарин, С. А. Теоретические основы электротехники : учебник для вузов / С. А. Башарин, В. В. Федоров. – М. : Академия, 2014. – 384 с.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник для вузов (бакалавриата) / Л. А. Бессонов. – М. : Юрайт, 2014. – 701 с.
3. Бессонов, Л. А. Сборник задач по теоретическим основам электротехники / Л. А. Бессонов, И. Г. Демидова, М. Е. Зарудий [и др.] ; под ред. Л. А. Бессонова. – М. : Высш. шк., 1980. – 472 с.
4. Бирюков, В. Н. Сборник задач по теории цепей / В. Н. Бирюков, В. П. Попов, В. И. Семенов. – М. : Высш. шк., 1985. – 239 с.
5. Сборник задач по теории электрических цепей : учеб. пособие для вузов / Л. В. Данилов, П. Н. Матханов, Ю. Б. Мерзлютин [и др.] ; под ред. П. Н. Матханова и Л. В. Данилова. – М. : Высш. шк., 1980. – 224 с.
6. Данилов, Л. В. Теория нелинейных электрических цепей / Л. В. Данилов, П. Н. Матханов, Е. С. Филиппов. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1990. – 256 с.
7. Теоретические основы электротехники : учебник для вузов. В 3 т. Т. 1 / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – 4-е изд. – СПб. : Питер, 2004. – 463 с.
8. Теоретические основы электротехники : учебник для вузов. В 3 т. Т. 2 / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – 4-е изд. – СПб. : Питер, 2004. – 486 с.
9. Демирчян, К. С. Моделирование и машинный расчет электрических цепей : учеб. пособие для электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов / К. С. Демирчян, П. А. Бутырин. – М. : Высш. шк., 1988. – 335 с.
10. Зайчик, М. Ю. Сборник учебно-контрольных задач по теории электрических цепей : учеб. пособие для вузов / М. Ю. Зайчик, П. Н. Овсянников, С. А. Шевчук. – М. : Энергоиздат, 1981. – 296 с.
11. Основы теории цепей : учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
12. Каплянский, А. Е. Теоретические основы электротехники : учеб. пособие для электротехнических и энергетических специальностей вузов / А. Е. Каплянский, А. П. Лысенко, Л. С. Полотовский. – М. : Высш. шк., 1972. – 488 с.
13. Электрические цепи : лабораторный практикум / А. Р. Куделько, В. С. Саяпин, А. Ф. Сочелев, А. Н. Степанов. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. – 69 с.
14. Лосев, А. К. Теория линейных электрических цепей : учебник для вузов / А. К. Лосев. – М. : Высш. шк., 1987. – 512 с.

15. Мартынов, Б. А. Элементы электрических цепей : учеб. пособие по курсу «Основы теории цепей» / Б. А. Мартынов. – Л. : ЛПИ им. М. И. Калинина, 1974. – 50 с.
16. Матханов, П. Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи : учебник для электротехнических и радиотехнических специальностей вузов / П. Н. Матханов. – М. : Высш. шк., 1990. – 400 с.
17. Новгородцев, А. Б. 30 лекций по теории электрических цепей : учебник для вузов / А. Б. Новгородцев. – СПб. : Политехника, 1995. – 519 с.
18. Попов, В. П. Основы теории цепей: учебник для вузов / В. П. Попов. – М. : Высш. шк., 1985. – 496 с.
19. Прянишников, В. А. Теоретические основы электротехники. Курс лекций / В. А. Прянишников. – СПб. : КОРОНА принт, 2000. – 368 с.
20. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники : учеб. пособие для вузов / под ред. проф. П. А. Ионкина. – М. : Энергоиздат, 1982. – 768 с.
21. Толстов, Ю. Г. Теория линейных электрических цепей : учеб. пособие для вузов / Ю. Г. Толстов. – М. : Высш. шк., 1978. – 279 с.

Учебное издание

Куделько Анатолий Романович
Саяпин Владимир Степанович
Сочелев Анатолий Федорович
Степанов Анатолий Николаевич

**ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЭЛЕМЕНТЫ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

Учебно-практическое пособие

Под общей редакцией кандидата технических наук,
профессора А. Р. Куделько

Подписано в печать 11.11.2015.

Формат 60 × 84 1/16. Бумага 80 г/м². Ризограф EZ570E.

Усл. печ. л. 3,49. Уч.-изд. л. 3,29. Тираж 100 экз. Заказ 27519.

Редакционно-издательский отдел
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

Полиграфическая лаборатория
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»
681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.