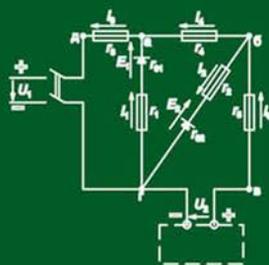
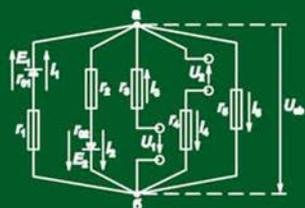
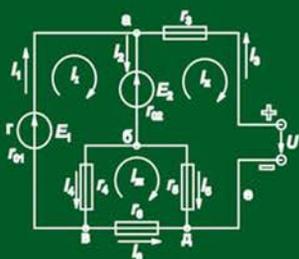
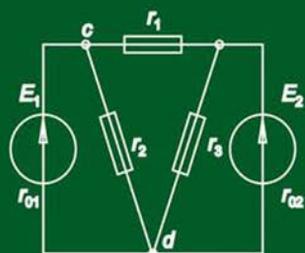


Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов, Ю. Н. Зорин

# Электротехника



bhv®

**Ю. М. Борисов  
Д. Н. Липатов  
Ю. Н. Зорин**

# **Электротехника**

**3-е издание,  
стереотипное**

Допущено Учебно-методическим объединением вузов по университетскому политехническому образованию в качестве учебника по курсу «Общая электротехника» для студентов неэлектротехнических специальностей

Санкт-Петербург  
«БХВ-Петербург»  
2012

УДК 537.0  
ББК 32  
Б82

**Борисов, Ю. М.**

Б82 Электротехника : учебник / Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов, Ю. Н. Зорин. — 3 изд., стереотипное. — СПб.: БХВ-Петербург, 2012. — 592 с.: ил. — (Учебная литература для вузов)

ISBN 978-5-9775-0723-3

Рассматриваются свойства, методы анализа и расчета электрических цепей постоянного и переменного тока, магнитных цепей, электрические приборы и измерения, трансформаторы и электрические машины, а также принципы выбора электродвигателя и аппаратуры управления и защиты электротехнических устройств.

В книге учтен опыт преподавания с использованием элементов программированного обучения в МГТУ им. Н. Э. Баумана для студентов неэлектротехнических специальностей.

*Для студентов неэлектротехнических специальностей  
технических вузов*

УДК 537.0  
ББК 32

*Фото Кирилла Сергеева*

Подписано в печать 31.05.12.  
Формат 60×90<sup>1/16</sup>. Печать офсетная. Усл. печ. л. 37.  
Тираж 1300 экз. Заказ №  
"БХВ-Петербург", 190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.  
Первая Академическая типография "Наука"  
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12/28

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемый учебник написан в соответствии с программой курса «Электротехника» для студентов машиностроительных, горных, металлургических и теплоэнергетических специальностей вузов. В нем учтен опыт преподавания в МВТУ им. Н. Э. Баумана на факультетах автоматизации и механизации промышленности, а также конструкторском и энергомашиностроительном, где изучение этого курса ведется с использованием элементов программированного обучения.

Основа глубоких знаний — это систематическая самостоятельная работа студента над курсом и умение применять теорию к решению практических задач. Для активизации работы над курсом учебник снабжен примерами и задачами, которые студент должен рассмотреть после проработки соответствующего раздела курса. Для самостоятельного решения задач рекомендуется использовать учебное пособие Д. Н. Липатова «Вопросы и задачи по электротехнике для программированного обучения» издания 1973, 1977, 1984 гг. Оно может служить также для контроля знаний студентов с помощью технических средств.

Работа по написанию учебника распределена между авторами следующим образом.

Главы 1 (кроме § 1.5), 3, 6 (кроме п. 6.5.5, § 6.6 и 6.10), 9 (кроме § 9.23) и 11 (кроме § 11.13) написаны канд. техн. наук, доц. Ю. М. Борисовым.

Главы 2, 4, 7 (кроме § 7.7 и 7.8), 10 и 12 написаны канд. техн. наук, и. о. проф. Д. Н. Липатовым.

Введение, гл. 5, § 7.7, 7.8, 9.23 и 11.13 написаны канд. техн. наук, доц. Ю. Н. Зориным.

Глава 8 написана совместно Д. Н. Липатовым и Ю. Н. Зориным, п. 6.5.5, § 6.6 и 6.10 написаны совместно Ю. М. Борисовым и Ю. Н. Зориным, § 1.5 написан совместно Ю. М. Борисовым и Д. Н. Липатовым.

Авторы благодарны преподавателям кафедры электротехники, электроники и электрооборудования МВТУ им. Н. Э. Баумана за сделанные ими замечания по первому изданию книги.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность рецензенту проф. Б. Г. Меньшову за ряд полезных замечаний, что несомненно способствовало улучшению учебника.

Особенно признательны авторы доц. Л. Е. Алекину, проделавшему огромную работу по редактированию рукописи учебника.

Замечания по учебнику авторы просят направлять по адресу 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

*Авторы*

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений научно-технического прогресса является электрификация народного хозяйства. Она имеет огромное социальное и экономическое значение. Только при электрификации производства возможен рост производительности труда, повышение эффективности всех отраслей народного хозяйства, улучшение культуры производства и условий труда. В настоящее время невозможно дальнейшее развитие промышленности, сельского хозяйства, транспорта и т. д., а также улучшение бытовых условий трудящихся без расширения использования электрической энергии.

Электротехника является наукой о техническом использовании электричества и магнетизма в народном хозяйстве. Без достаточно глубокого знания электротехники невозможно представить себе инженеров — создателей и руководителей современного высокоразвитого производства.

Интенсивное использование электрической энергии связано со следующими ее особенностями: возможностью достаточно легкого преобразования в другие виды энергии (механическую, тепловую, лучистую и т. д.); возможностью централизованного и экономичного получения на различных электростанциях; простотой передачи с помощью линий электропередачи с малыми потерями на большие расстояния к потребителям.

Только после Великой Октябрьской социалистической революции стала осуществляться плановая электрификация нашей страны. В первые годы Советской власти В. И. Ленин говорил о том, что широкое использование электрической энергии является одной из предпосылок осуществления коренных революционных преобразований в экономике страны, а также создания материально-технической базы социализма и коммунизма. Это было высказано в его гениальной, ставшей впоследствии крылатой фразе: «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны».

План ГОЭЛРО, созданный под непосредственным руководством В. И. Ленина, был утвержден VIII Всероссийским съездом

Советов в декабре 1920 г. Ему придавалось настолько большое значение, что он рассматривался как вторая программа партии.

В плане предусматривалась программа-минимум электрификации страны. При этом учитывались как существующие, так и вновь строящиеся электростанции, а также основные линии электропередачи. План ГОЭЛРО предусматривал опережающее развитие электроэнергетики, т. е. создание энергетической базы индустриального развития страны. Он предполагал грандиозное по тем временам для нашей страны строительство 10 гидростанций и 20 тепловых электростанций общей мощностью 1,5 млн. кВт. Интересно отметить, что в Государственной комиссии по электрификации России делались предложения о возможном энергетическом использовании таких великих рек России, как Волга и Ангара. План ГОЭЛРО, рассчитанный на 10–15 лет, был не только выполнен, но и перевыполнен.

В настоящее время благодаря повседневной заботе Партии и Правительства в нашей стране достигнуты значительные успехи в электрификации народного хозяйства. По производству электроэнергии Советский Союз занимает первое место в Европе и второе место в мире. В 1983 г. в стране было произведено 1416 млрд кВт·ч электроэнергии, что превысило уровень 1940 г. в 29,5 раза. В том же году выработка электроэнергии на душу населения составила 5181,6 кВт·ч, что почти в 21,2 раза больше в сравнении с 1940 г. Значительно, а именно в 7,7 раза, повысилась энерговооруженность труда в промышленности.

Успешно развивается Единая энергосистема страны. В настоящее время она объединяет более 900 электростанций, которые имеют суммарную установленную мощность около 83% мощности всех электростанций страны. Единая энергосистема страны продолжает развиваться. Она связана линиями электропередачи с МНР, Финляндией, Норвегией и Турцией. Развивается энергосистема «Мир» стран СЭВ. Единая энергосистема значительно повысила надежность и эффективность энергоснабжения страны.

XXVI съезд КПСС поставил задачу дальнейшей, последовательной электрификации народного хозяйства. При этом было подчеркнуто, что электрификация является важным фактором научно-технического прогресса, повышения качества общественного труда и народного благосостояния. В Энергетической программе СССР на длительную перспективу предусматривается опе-

режающее развитие атомной энергетики. В европейской части страны прирост выработки электроэнергии предусматривается в основном за счет атомных электростанций. В Сибири, на Дальнем Востоке и в Средней Азии будет продолжено строительство мощных тепловых и гидроэлектростанций.

В настоящее время жизненные интересы требуют разработки принципиально новых источников электрической энергии. В связи с этим ведутся научно-исследовательские и практические работы по проектированию атомных реакторов на быстрых нейтронах, использованию энергии прилива и отлива, по более полному освоению солнечной и геотермальной энергии и т. д.

С целью передачи электроэнергии в центральные районы страны с меньшими потерями осуществляется строительство уникальных линий электропередачи сверхвысоких напряжений. Так, к концу 80-х годов будет введена в действие первая очередь линии электропередачи постоянного тока напряжением 1500 кВ Сибирь — Казахстан — Урал и линия электропередачи переменного тока напряжением 1150 кВ Экибастуз — Центр.

В одиннадцатой пятилетке предусматривается дальнейшее усовершенствование и развитие Единой энергосистемы страны, повышение надежности и качества электроснабжения народного хозяйства.

Научно-технический прогресс предусматривает широкую механизацию и автоматизацию производственных процессов. При высоком уровне энерговооруженности современных предприятий создание автоматизированных систем управления производственными процессами невозможно без значительного использования электротехнической аппаратуры и электрооборудования. В современных производственных машинах с помощью электротехнической аппаратуры осуществляется управление ее механизмами, автоматизация их работы, контроль за ведением производственного процесса, обеспечивается безопасность обслуживания и т. д. Следовательно, функции электротехнических устройств машин настолько значительны по сравнению с их механической частью, что именно они во многом определяют такие важные показатели, как производительность, качество и надежность создаваемой продукции.

Инженер-механик не должен заниматься проектированием и созданием электротехнической части производственных машин, однако он должен уметь квалифицированно эксплуатировать автоматизированные установки, принимать участие в разработке систем

автоматизированного управления производственными процессами, грамотно использовать электротехническую аппаратуру и электрооборудование при проведении научных исследований. Все это возможно лишь в том случае, если инженер-механик имеет хорошую электротехническую подготовку.

В курсе «Электротехника» осуществляется анализ явлений, происходящих в электрических и магнитных цепях. Изучаются вопросы, связанные с установившимися и переходными процессами, периодическими несинусоидальными токами в линейных электрических цепях. Определенное внимание уделено электрическим измерениям и электроизмерительным приборам. Изучается устройство, принцип действия трансформаторов и электрических машин. Рассматриваются пуск, регулирование частоты вращения, реверс, тормозные режимы, механические и электромеханические характеристики двигателей постоянного и переменного тока. Излагаются вопросы электропривода, аппаратуры управления, защиты электротехнических устройств.

Знание перечисленного материала дает возможность будущим специалистам не только свободно разбираться в устройстве и принципе действия разнообразной электротехнической аппаратуры, электрических машин и оборудования, но и грамотно использовать их на практике.

Особое внимание будущих инженеров хотелось бы обратить на возникшее противоречие между техническим прогрессом и окружающей средой, так как многие отходы производства в значительной степени стали оказывать отрицательное влияние на почву, воду, атмосферу и космос, что в то же время отражается на всех живых организмах и, конечно, на человеке.

К сожалению, приходится констатировать, что производство электрической энергии и ее преобразование в другие виды энергии могут приносить и приносят вред окружающей среде. Так, тепловые электростанции при сжигании топлива выбрасывают в атмосферу окись азота и углерода, двуокись серы и т. д. Эти электростанции требуют больших земельных площадей для золоотвалов (шлаков).

Работа самих гидроэлектростанций для окружающей среды безвредна. Однако создание значительных водохранилищ сказывается на микроклимате, т. е. может повыситься влажность, могут чаще наблюдаться туманы. Оказывается негативное влияние на рыбное хозяйство, а замедление течения рек приводит к загрязнению воды.

Атомные электростанции практически относятся к чистым предприятиям, однако необходимо решение очень важного вопроса — безопасного хранения их отходов.

Источники энергии прилива и отлива, солнечной и геотермальной энергии, энергии ветра относятся к чистым и безвредным источникам.

Заметим, что значительное выделение теплоты при производстве и потреблении электроэнергии может оказывать влияние на изменение климата.

В настоящее время изучается вопрос о физическом воздействии как на живые организмы, так и на атмосферу электромагнитных полей, образующихся вдоль воздушных ЛЭП, так как радиус воздействия подобных полей достигает нескольких десятков метров.

В СССР и социалистических странах вопросам экологии уделяется большое внимание. Так, для борьбы с загрязнением атмосферы на электрических станциях, промышленных предприятиях и транспорте используются очистительные фильтры, механические золоуловители и т. п. Осуществляется переход на центральное теплоснабжение, производится электрификация быта, повышается безотходность в промышленности, создаются мощные очистительные сооружения, замкнутые циклы использования воды, ведутся разработки сверхпроводящих и криогенных ЛЭП. С учетом загрязнения окружающей среды выхлопными газами двигателей внутреннего сгорания просматривается замена их на транспорте электрическими двигателями. Вопросы охраны окружающей среды должны постоянно находиться в поле зрения будущих инженеров.

## Глава первая

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **1.1. ПОЛУЧЕНИЕ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Постоянным называется ток, значение и направление которого при неизменных параметрах электротехнической установки остаются постоянными. В отличие от этого под переменным понимается обычно ток, значение и направление которого периодически изменяются.

На основе технико-экономических соображений электрическая энергия вырабатывается на электростанциях, распределяется между приемниками и потребляется последними преимущественно в виде энергии переменного тока (см. гл. 2). Однако широкое применение имеет в настоящее время также и постоянный ток.

Для некоторых приемников постоянный ток является единственным возможным родом тока, а иногда его применение позволяет существенно улучшить технические и эксплуатационные свойства установок.

Электрическая энергия постоянного тока используется, например, для питания электролитических ванн, двигателей постоянного тока многих производственных машин и механизмов, различных устройств промышленной электроники, автоматики и т. д.

Электрическую энергию постоянного тока получают в настоящее время чаще всего из электрической энергии переменного тока с помощью полупроводниковых преобразовательных устройств. Реже для этой цели используют генераторы, приводимые во вращение электрическими и неэлектрическими двигателями, аккумуляторы, гальванические элементы и термогенераторы.

### **1.2. ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СХЕМЫ**

Основными элементами электротехнических установок являются источники и приемники электрической энергии, а также преобразовательные устройства.

С помощью источников тот или иной вид энергии (энергия сжигаемого топлива, падающей воды, атомная и химическая энергия и т. д.) преобразуется в электрическую энергию. Приемники, наоборот, преобразуют электрическую энергию в другие ее виды (механическую, тепловую, химическую, энергию светового излучения и т. д.). С помощью преобразовательных установок электрическая энергия одного вида преобразуется в электрическую энергию другого вида (энергия переменного тока — в энергию постоянного тока, энергия переменного тока одной частоты — в энергию переменного тока других частот и т. д.).

Кроме основных элементов электротехнические установки содержат большое число вспомогательных элементов, выполняющих разнообразные функции. К ним относятся, например, выключатели и переключатели различного назначения, аппараты автоматизированного управления, электроизмерительные приборы, резисторы для регулирования тока, напряжения и мощности приемников, защитные устройства.

Вспомогательные элементы, не являясь в прямом смысле приемниками, потребляют некоторое количество энергии, что ухудшает коэффициент полезного действия (КПД) установок.

Основные и вспомогательные элементы соединяются между собой с помощью проводов и образуют в совокупности электрическую цепь установки.

Различные элементы электрических цепей обозначаются в технической документации и литературе согласно ГОСТ с помощью условных обозначений, некоторые из которых будут приведены по мере изложения материала книги.

Графическое изображение электрической цепи с помощью условных обозначений ее элементов называется электрической схемой цепи.

### **1.3. ЗАДАЧИ РАСЧЕТА И АНАЛИЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ. ПАРАМЕТРЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ РАСЧЕТЕ И АНАЛИЗЕ**

Задачи, возникающие при расчете электрических цепей, бывают весьма разнообразными. Одной из наиболее часто встречающихся задач расчета является определение напряжений, токов и мощностей различных элементов цепей при заданных их параметрах. Нередко возникает и другая задача, когда бывает необходимо найти значения параметров тех или иных элементов, например электродвижущих сил (ЭДС) источников, обеспечивающих получение требуемых напряжений, токов или мощностей.

Во многих случаях при расчете приходится определять не только значения ЭДС, напряжений и токов, но и их направления. Объясняется это тем, что направления указанных величин характеризуют ряд показателей, которые могут представлять интерес при изучении электротехнического устройства.

Например, направление тока в намагничивающей обмотке некоторого электромагнитного устройства, включенной в данную цепь, определяет направление магнитного поля, возбуждаемого этой катушкой. Определив при расчете электрической цепи направления ЭДС и тока или напряжения и тока некоторых элементов цепи, можно легко определить, какие из них являются источниками, а какие приемниками.

Кроме расчета электрических цепей часто возникают задачи их анализа, которые бывают также весьма разнообразными. Так, иногда требуется установить характер изменения значений различных величин или соотношений между ними при изменении параметров цепи.

При рассмотрении вопроса о параметрах различных элементов электрических цепей необходимо учитывать следующее. Каждый элемент электрической цепи имеет в общем случае несколько параметров, с помощью которых могут быть учтены электромагнитные и тепловые явления, свойственные данному элементу. Однако далеко не всегда необходимо принимать во внимание наличие всех параметров.

Например, при расчете и анализе установившегося режима работы цепи постоянного тока, содержащей катушку индуктивности, такой параметр, как индуктивность, учитывать не следует. Объясняется это тем, что при постоянном токе индуктивность не влияет на значения напряжений, токов и мощностей.

На значения напряжений, токов и мощностей при установившемся режиме в цепях постоянного тока оказывают влияние, а поэтому используются при расчете и анализе следующие параметры:

ЭДС  $E$  источников электрической энергии, являющиеся причиной возникновения напряжений, токов и мощностей;

ЭДС электродвигателей и аккумуляторов (при зарядке последних), являющихся приемниками электрической энергии;

сопротивления  $r$  различных элементов электрических цепей, в том числе и внутренние сопротивления  $r_0$  источников, а также приемников, имеющих в качестве параметра ЭДС. Вместо сопротивлений могут быть использованы соответствующие им проводимости  $g = 1/r$  и  $g_0 = 1/r_0$ .

Элементы электрических цепей, имеющие в качестве параметров ЭДС, называются активными элементами, не имеющие ЭДС — пассивными элементами. Во многих случаях вместо ЭДС и внут-

ренных сопротивлений элементов указывается напряжение, проводимое от них к данной электрической цепи (см. рис. 1.1, *д*).

При определенных условиях активные элементы могут быть либо источниками, либо приемниками электрической энергии. Соотношение между ЭДС и напряжениями активных элементов рассматривается в § 1.10 и 1.12.

В этом случае, когда при расчете и анализе не ясно, источниками или приемниками являются активные элементы, будем называть их источниками ЭДС и источниками с указанным напряжением.

Многие вспомогательные элементы электрических цепей имеют такие сопротивления, что они не влияют практически на значения напряжений, токов и мощностей. К ним относятся, например, контакты коммутационных и других аппаратов, электроизмерительные приборы, некоторые защитные устройства, соединительные провода небольшой протяженности и др. Подобные элементы на электрических схемах, предназначенных для расчета и анализа электрических цепей, обычно не изображают.

Элемент электрической цепи, характеризуемый одним параметром (при наличии у него и других параметров), либо отдельные части элемента, каждая из которых характеризуется одним параметром и изображается на схеме с помощью соответствующего условного обозначения от других частей, называются часто идеальными элементами. А электрические схемы, содержащие идеальные элементы, называют иногда схемами замещения.

#### **1.4. НЕКОТОРЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ. ПОНЯТИЕ О ДВУХ ПОЛЮСНИКАХ**

С точки зрения расчета и анализа электрических цепей не имеет значения, с какими именно источниками, приемниками и вспомогательными элементами приходится иметь дело. Важно знать только их параметры и способ соединения друг с другом. Учитывая это, при изучении методов расчета и анализа цепей будем использовать в основном одни и те же условные обозначения для различных элементов, имеющих одинаковые параметры. Активные элементы будем обозначать в основном кружочками со стрелками внутри, указывающими направление ЭДС (рис. 1.1); для батареи из гальванических элементов используем обозначение, приведенное на рис. 1.1, *б*.

В сопротивлениях различных элементов электрических цепей происходит процесс преобразования электрической энергии в теплоту. Такие элементы называются резистивными и обозначаются прямоугольниками (см. рис. 1.1).

Электрические цепи постоянного тока (как и переменного) и соответственно их электрические схемы бывают весьма разнообразными. Так, встречаются электрические цепи неразветвленные (рис. 1.1, *а*, *б*) и разветвленные (рис. 1.1, *в-д*), с одним активным элементом (рис. 1.1, *а*, *в*, *д*) и с двумя

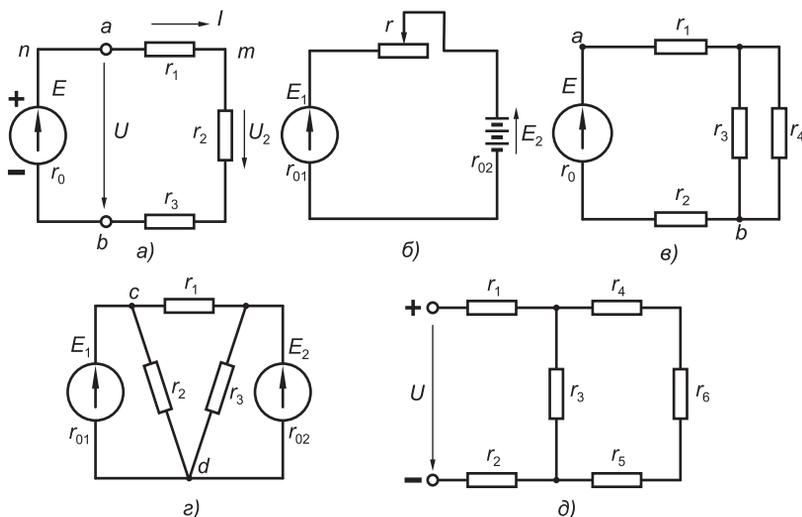


Рис. 1.1. Примеры схем электрических цепей

(рис. 1.1, б, г) или с большим количеством активных элементов, линейные и нелинейные.

Линейной называется электрическая цепь, параметры которой не зависят от напряжений или токов в цепи. Если параметр хотя бы одного из элементов не остается постоянным при изменении напряжений или токов в цепи, то данный элемент и вся электрическая цепь называются нелинейными. Некоторые нелинейные элементы и цепи постоянного тока рассматриваются в § 1.16.

Часть электрической цепи, имеющая два вывода, с помощью которых она соединяется с другой частью цепи, называется двухполосником. Различают пассивные и активные двухполосники. Пассивные двухполосники содержат только пассивные элементы, активные — как пассивные, так и активные элементы. Например, справа от точек *a* и *b* на рис. 1.1, в расположена схема пассивного двухполосника, соединенного с активным двухполосником, схема которого дана слева от указанных точек. Справа и слева от точек *c* и *d* на рис. 1.1, г расположены схемы двух активных двухполосников, а между этими точками — пассивный двухполосник.

## 1.5. ПРОВОДНИКОВЫЕ И ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Токоведущие части различных элементов электрических цепей изготавливаются из проводниковых материалов, которые бывают твердыми, жидкими и газообразными. Основными проводниковыми материалами являются металлы и их сплавы.

В большинстве случаев токоведущие части (проводники) изготавливаются из проволоки круглого или прямоугольного сечения. Такие проводники используются, например, при сооружении линий электропередачи и электрических сетей, нагревательных устройств, обмоток электрических машин, различных электротехнических аппаратов и измерительных приборов.

Если проводник имеет одну и ту же площадь поперечного сечения по всей длине, то его сопротивление, Ом,

$$r = \rho l / S, \quad (1.1)$$

где  $l$  — длина проводника, м;  $S$  — площадь поперечного сечения проводника,  $\text{м}^2$ ;  $\rho$  — удельное сопротивление материала проводника, Ом·м.

На практике часто пользуются единицами  $l$ ,  $S$  и  $\rho$  в 1 м, 1  $\text{мм}^2$  и 1 Ом· $\text{мм}^2/\text{м}$  = 1 мкОм·м соответственно.

При использовании тех или других из указанных единиц следует помнить, что в обоих случаях удельные сопротивления не равны и находятся в соотношении 1 Ом·м =  $10^{-6}$  Ом· $\text{мм}^2/\text{м}$ .

Кроме единицы сопротивления 1 Ом часто используют более крупные единицы: 1 килоом (1 кОм =  $10^3$  Ом) и 1 мегаом (1 МОм =  $10^6$  Ом).

Единицей проводимости  $g = 1/r$  является 1/Ом = 1 См (1 сименс).

Единицы удельной проводимости  $\gamma = 1/\rho$  зависят от единиц удельного сопротивления. Когда единицей удельного сопротивления является 1 Ом·м, единица удельной проводимости будет 1/(Ом·м) = 1 См/м. Когда же единицей сопротивления является 1 Ом· $\text{мм}^2/\text{м}$  = 1 мкОм·м, единица удельной проводимости будет 1 м/(Ом· $\text{мм}^2$ ) = 1 См·м/ $\text{мм}^2$ . Соотношение между указанными единицами проводимости таково: 1 См/м = 1 См· $\text{м}/\text{мм}^2 = 10^6$  См·м/ $\text{мм}^2$ .

Сопротивление металлических проводников при повышении температуры возрастает. Зависимость сопротивления от температуры выражается следующей формулой:

$$r_2 = r_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)], \quad (1.2)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  — начальная и конечная температуры, °С;  $r_1$  и  $r_2$  — сопротивления при температурах  $t_1$  и  $t_2$ , Ом;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления, °С $^{-1}$ .

Сведения об удельных сопротивлениях и температурных коэффициентах проводниковых материалов приводятся в справочной литературе.

В зависимости от требований, предъявляемых в отношении значений удельного сопротивления, температурного коэффициента сопротивления, допустимой температуры нагревания, механической прочности и ряда других свойств, для изготовления токоведущих частей электротехнических устройств, применяются весьма разнообразные металлы и их сплавы.

Так, для многих устройств находят применение материалы с относительно малым удельным сопротивлением. В первую очередь к таким материалам относятся медь и алюминий, имеющие при комнатной температуре удельное сопротивление соответственно 0,0175 и 0,0283 мкОм·м, а также средние температурные коэффициенты 0,0039 и 0,004 °С $^{-1}$  в диапазоне температур от 0 до 100 °С.

Из меди и алюминия изготавливают провода электрических сетей и линий электропередачи; медь получила широкое применение для изготовления обмоток электрических машин, различных электрических аппаратов и электроизмерительных приборов, а также контактов коммутационных и других аппаратов. При изготовлении контактов многих аппаратов используются часто серебро

и его соединения с другими металлами, а также вольфрам и молибден. Последние два металла вследствие своей тугоплавкости и большой механической прочности нашли широкое применение в электривакуумной технике для изготовления нитей накала. Для коррозионно-устойчивых покрытий контактов используется в некоторых случаях золото. Сооружение контактных проводов передвижных приемников электрической энергии (например, электрических крапов) осуществляется в большинстве случаев из стального проката.

Постоянные и переменные проволочные резисторы общего назначения, шунтирующие и добавочные резисторы к электроизмерительным приборам и нагревательные приборы изготавливаются обычно из различных сплавов, одной из отличительных особенностей которых являются их относительно большие удельные сопротивления. Основным сплавом для шунтирующих и добавочных резисторов является манганин, состоящий из меди, марганца и никеля. Манганин обладает очень малым температурным коэффициентом сопротивления, что необходимо для уменьшения влияния температуры на точность измерений. Константан, состоящий из меди и никеля, используется для изготовления постоянных и переменных резисторов и нагревательных приборов с рабочей температурой до 400–450 °С. Для нагревательных приборов с рабочей температурой до 1000–1500 °С используются хромоникелевые, железохромоалюминиевые сплавы (нихромы и фехралы).

Электроизоляционные материалы (диэлектрики) обладают очень малой электрической проводимостью и служат для изолирования (отделения) токоведущих частей друг от друга, а также от металлоконструкций производственных и электрических машин, аппаратов и приборов, что необходимо для исключения возможности аварийных режимов (например, коротких замыканий), обеспечения надежности работы установки и безопасности ее эксплуатации.

В настоящее время применяют множество различных электроизоляционных материалов. Так, для изоляции проводов, с помощью которых осуществляется питание электроэнергией приемников в заводских цехах, лабораториях, бытовых помещениях, применяются главным образом резина, бумага, поливинилхлорид.

Голые провода линий электропередачи изолируют от опор опорными или подвесными изоляторами из фарфора или стекла.

Провода обмоток электрических машин и аппаратов изолируют лаковым покрытием и иногда бумагой и хлопчатобумажной тканью, пропитанными различными лаками или компаундами, а также асбестом, стекловолокном, слюдой, эмалями и синтетическими материалами типа «лавсан».

Кроме малой проводимости электроизоляционные материалы должны обладать рядом других свойств, например достаточной электрической и механической прочностью, нагревостойчивостью, малой гигроскопичностью.

Диэлектрики выполняют свои изолирующие функции, пока напряжение устройства и, следовательно, напряженность электрического поля в диэлектрике данного устройства не превысят определенных значений. Если напряженность окажется больше некоторого критического значения, наступает пробой диэлектрика. Пробой различных (твердых, жидких и газообразных) диэлектриков вызван различными явлениями. Однако во всех случаях проводимость и ток диэлектрика недопустимо возрастают и он теряет свои изолирующие свойства.

Предельная напряженность поля, при которой происходит пробой диэлектрика, называется его электрической прочностью. Электрическая прочность

зависит не только от свойств диэлектрика, но также от многих условий, в которых он работает, например от рода тока, скорости изменения и времени воздействия электрического поля, температуры и влажности.

Сведения об электрической прочности диэлектриков приводятся в справочной литературе. В качестве примера укажем, что при длительном воздействии электрического поля с частотой  $f = 50$  Гц электрическая прочность воздуха 2–3, дерева 2,5–5, резины мягкой 15–25, трансформаторного масла 16–20, фарфора 15–20 МВ/м.

## 1.6. НАПРАВЛЕНИЯ ТОКОВ, НАПРЯЖЕНИЙ И ЭДС. ЕДИНИЦЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

Для проведения расчета и анализа электрических цепей необходимо знать не только значения заданных ЭДС, напряжений или токов, но и их направления, так как последние определяют знаки слагаемых в расчетных выражениях. В связи с этим следует напомнить о направлениях токов, напряжений и ЭДС, принятых в физике.

За направление тока принимают направление движения положительных зарядов.

За направление напряжения между какими-либо точками электрической цепи принимают направление, в котором перемещались бы положительные заряды между этими точками под действием сил электрического поля, т. е. от большего потенциала к меньшему.

За направление ЭДС между выводами источника или активного приемника принимают направление, в котором перемещались бы положительные заряды под действием сил стороннего поля, т. е. от меньшего потенциала к большему.

Так, в электрической цепи рис. 1.1,  $a$  потенциал точки  $a$  больше потенциала точки  $b$  ( $\varphi_a > \varphi_b$ ), поэтому напряжение направлено от точки  $a$  к точке  $b$ , а ЭДС  $E$  — от точки  $b$  к точке  $a$ .

На участке  $amb$ , содержащем пассивные элементы, положительные заряды перемещаются под действием сил электрического поля от большего потенциала к меньшему; направления напряжения и тока на этом участке совпадают. На участке  $bna$ , содержащем источник электрической энергии, положительные заряды перемещаются под действием ЭДС от меньшего потенциала к большему, направление тока на таком участке совпадает с направлением ЭДС и противоположно направлению напряжения.

Для удобства дальнейшего изложения будем называть указанные выше направления действительными направлениями.

Расчет и анализ любых электрических цепей может быть произведен с помощью основных законов электрических цепей: закон Ома, первого и второго законов Кирхгофа. Указанные законы используются также для обоснования различных методов, упрощающих расчет и анализ цепей.

Запись выражений по законам Ома и Кирхгофа, различных методов расчета и анализа, а также расчетных формул производится с учетом определенных направлений как заданных величин (например, ЭДС, напряжений или токов), так и величин, подлежащих определению.

При расчете и анализе электрических цепей направления заданных и искомых величин указывают на схемах стрелками, считают их положительными ( $E > 0$ ,  $U > 0$  и  $I > 0$ ) и поэтому называют положительными направлениями.

За положительные направления заданных и искомых величин при постоянном токе принимают их действительные направления. Если они не очевидны, можно задаться положительными направлениями произвольно, так как от выбора тех или иных положительных направлений зависят лишь знаки искомых величин, а не их значения.

В качестве положительных направлений величин, изменяющих свои действительные направления с течением времени, например при расчете или анализе цепей переменного тока, задают одно из двух возможных их направлений, с учетом которого и производят расчет.

Если в результате расчета или анализа какая-либо из искомых величин оказывается положительной, это означает, что она направлена в действительности так, как показано на схеме стрелкой; отрицательное значение искомой величины указывает на ее противоположное направление. Сказанное относится и к величинам, действительные направления которых с течением времени изменяются.

В книге используется Международная система единиц (СИ), в которой основной единицей ЭДС, напряжения и потенциала является 1 вольт (1 В). Кроме единицы 1 вольт в практике используется единица 1 киловольт ( $1 \text{ кВ} = 10^3 \text{ В}$ ) и 1 милливольт ( $1 \text{ мВ} = 10^{-3} \text{ В}$ ).

Основной единицей тока является 1 ампер (1 А). Для тока используются также единицы 1 миллиампер ( $1 \text{ мА} = 10^{-3} \text{ А}$ ) и 1 микроампер ( $1 \text{ мкА} = 10^{-6} \text{ А}$ ).

### 1.7. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАКОНОВ ОМА И КИРХГОФА ПРИ РАСЧЕТЕ И АНАЛИЗЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Как известно, согласно закону Ома в замкнутой неразветвленной электрической цепи (см. рис. 1.1, *a*)

$$I = \frac{E}{r_0 + r_1 + r_2 + r_3}. \quad (1.3)$$

А в любом пассивном элементе цепи, например с сопротивлением  $r_2$  (рис. 1.1, *a*),

$$I = U_2/r_2. \quad (1.4)$$

Выражение (1.3) справедливо при совпадающих направлениях ЭДС  $E$  и тока  $I$ , а выражение (1.4) — при совпадающих направлениях напряжения  $U$  и тока  $I$ , что и следует учитывать при нанесении на схеме стрелок, указывающих положительные направления в случае использования закона Ома.

Согласно первому закону Кирхгофа алгебраическая сумма токов ветвей, соединенных в любой узловой точке электрической цепи, равна нулю, т. е.

$$\sum I = 0. \quad (1.5)$$

Со знаком «+» в уравнение следует включать токи, положительные направления которых обращены к узлу, со знаком «-» — положительные направления которых обращены от узла (можно и наоборот). Например, для узла  $A$  (рис. 1.2)

$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0.$$

Согласно второму закону Кирхгофа в любом замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме напряжений на всех резистивных элементах контура, т. е.

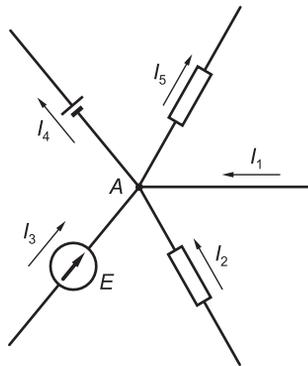


Рис. 1.2. К пояснению первого закона Кирхгофа

$$\sum E = \sum Ir. \quad (1.6)$$

Часто в электрических цепях встречаются элементы, между выводами которых имеются те или иные напряжения  $U$  (например, напряжение сети, напряжение, снимаемое с делителя напряжения, и т. д.).

Учитывая это, вместо (1.6) удобнее использовать следующую форму записи второго закона Кирхгофа:

$$\sum E = \sum Ir + \sum U. \quad (1.7)$$

При этом ЭДС, напряжения и токи, положительные направления которых совпадают с направлением обхода контура при составлении уравнения (1.7), следует включать в уравнение со знаком «+», а те, положительные направления которых не совпадают с направлением обхода контура, — со знаком «−» (можно и наоборот).

При подстановке в уравнения (1.5)–(1.7) числовых значений ЭДС, напряжений и токов следует учитывать, что указанные величины могут быть как положительными, так и отрицательными, что повлияет на окончательные знаки перед ЭДС, напряжениями и токами.

Следует заметить, что уравнение (1.7) может быть применено и к такому контуру, который замкнут в геометрическом смысле. Это значит, что часть контура может проходить по стрелке, указывающей положительное направление напряжения между какими-либо точками. Таким образом, можно всегда записать уравнение для напряжения между двумя любыми точками электрической цепи.

При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа следует включать в них либо ЭДС и падение напряжения во внутренних сопротивлениях активных элементов, либо только их напряжения.

Например, для электрической цепи рис. 1.1, *a* по второму закону Кирхгофа можно написать

$$E = Ir_0 + I(r_1 + r_2 + r_3)$$

либо

$$0 = I(r_1 + r_2 + r_3) - U_{ab}.$$

Исключением является случай, когда уравнение составляется для контура, проходящего через активный элемент и стрелку, указывающую положительное направление напряжения этого же элемента. Только в этом случае в уравнение войдут ЭДС, падение на-

пряжения во внутреннем сопротивлении и напряжение данного элемента. Так, для той же цепи рис. 1.1, *a* получим  $E = Ir_0 + U_{ab}$ .

Пример 1.1. В замкнутом контуре рис. 1.3  $E_1 = 100$  В,  $E_2 = 50$  В,  $U_1 = 120$  В,  $U_2 = 80$  В,  $r_{01} = r_{02} = 1$  Ом,  $r_1 = 9$  Ом,  $r_2 = 4$  Ом,  $r_3 = 15$  Ом,  $I_1 = 2$  А,  $I_2 = 1$  А,  $I_4 = 3$  А.

Определить ток  $I_3$  в ветви *аже* и напряжение  $U_{ев}$  между точками *e* и *в*.

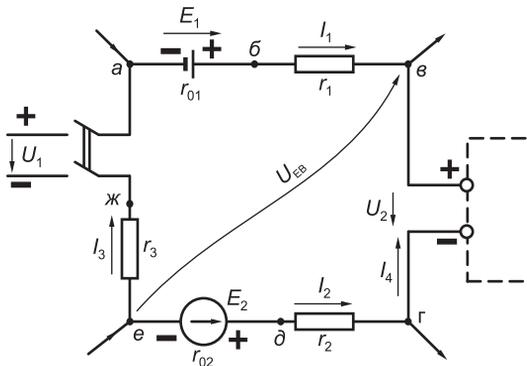


Рис. 1.3. К пояснению второго закона Кирхгофа

Решение. Выбрав положительное направление тока  $I_3$  таким, как показано на рис. 1.3, и обходя контур по часовой стрелке, на основании второго закона Кирхгофа получим

$$E_1 - E_2 = I_1(r_1 + r_{01}) - I_2(r_2 + r_{02}) + I_3r_3 - U_1 + U_2.$$

После решения относительно тока  $I_3$  и подстановки числовых значений найдем  $I_3 = 5$  А. Так как ток  $I_3 > 0$ , то он направлен, как показано на рис. 1.3.

При указанном на рис. 1.3 положительном направлении напряжения  $U_{ев}$  по второму закону Кирхгофа для контура *евдев* получим  $-E_2 = -I_2(r_2 + r_{02}) + U_2 + U_{ев}$ . В результате вычислений найдем  $U_{ев} = -125$  В.

Поскольку  $U_{ев} < 0$ , то  $\varphi_e < \varphi_в$  и действительное направление напряжения между точками *e* и *в* будет противоположным указанному на рисунке.

## 1.8. НАГРЕВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Тепловое действие электрического тока находит в технике широкое применение. Оно используется в бытовых и промышленных электронагревательных устройствах различного принципа действия, назначения и конструктивного исполнения, для целей электросварки, в осветительной технике, в устройствах автоматики, защиты, измерительной технике и т. д.

Однако теплота, выделяемая в сопротивлениях многих элементов электрических цепей, бесполезно их нагревает и рассеивается

в окружающую среду, а затрачиваемая на это энергия приводит к снижению КПД установок. Так, совершенно бесполезно нагреваются провода электрических сетей, обмотки электрических машин, различных электротехнических аппаратов и т. д.

Рассмотрим вопросы нагревания токоведущих частей электротехнических устройств.

Как известно, согласно закону Джоуля—Ленца при постоянном токе энергия, потребляемая резистивным элементом с сопротивлением  $r$  в течение времени  $t$  и преобразуемая им в теплоту, определяется по формулам

$$W = I^2 r t = U I t = \frac{U^2}{r} t = U^2 g t. \quad (1.8)$$

Мощность представляет собой энергию в единицу времени,  $P = W/t$ . Учитывая это, получим следующие выражения мощности:

$$P = I^2 r = U I = U^2 / r = U^2 g. \quad (1.9)$$

Основными единицами электрической энергии и мощности являются соответственно 1 джоуль (1 Дж=1 В·А·с) и 1 ватт (1 Вт=1 Дж/с=1 В·А). Учитывая принятую единицу для мощности в 1 Вт, электрическую энергию можно выражать в ватт-секундах (1 Дж=1 Вт·с). Для мощности и энергии используются часто более крупные единицы: 1 киловатт (1 кВт=10<sup>3</sup> Вт), 1 мегаватт (1 МВт=10<sup>6</sup> Вт), 1 киловатт·час (1 кВт·ч=3,6·10<sup>6</sup> Вт·с).

При сравнительно небольших температурах, с которыми работают токоведущие части многих элементов электрических цепей (провода электрических сетей, обмотки электрических машин, аппаратов и др.), можно считать, что количество отдаваемой теплоты пропорционально разности температур токоведущей части и окружающей среды. В этом случае на основании уравнения теплового равновесия можно получить следующее выражение для установившейся температуры токоведущей части:

$$t_{\text{уст}}^{\circ} = \frac{I^2 r}{A} + t_{\text{окр}}^{\circ}, \quad (1.10)$$

где  $I^2 r$  — количество теплоты, выделяемой за 1 с в сопротивлении токоведущей части, равное мощности, потребляемой элементом цепи с сопротивлением  $r$ , Дж/с;  $A$  — теплоотдача токоведущей части, представляющая собой количество теплоты, отдаваемой в окружающую среду за 1 с при разности температур в 1 °С, Дж/(с·°С);  $t_{\text{уст}}^{\circ}$  и  $t_{\text{окр}}^{\circ}$  — установившаяся температура токоведущей части и температура окружающей среды, °С. Теплоотдача зависит от конструктивных особенностей токоведущей части, ее поверхности и способа охлаждения.

Как видно, установившаяся температура (при данной температуре  $t_{\text{окр}}^{\circ}$ ) зависит от потребляемой резистивным элементом  $r$  мощности и теплоотдачи.

Токотводящие части различных элементов электрических цепей должны быть рассчитаны так, чтобы их температура  $t_{\text{уст}}^{\circ}$  не превышала допустимых значений, которые определяются различными факторами. Так, наибольшая допустимая температура изолированных проводов определяется нагревостойкостью изоляции.

Обеспечение заданной температуры  $t_{\text{уст}}^{\circ}$  при больших мощностях электротехнических устройств требует увеличения теплоотдачи, что приводит к увеличению габаритных размеров, массы и стоимости устройства.

Для обоснования применяемой часто методики расчета токоведущих частей по нагреванию предположим, что мы имеем прямолинейный проводник, для которого выражение (1.10) может быть преобразовано к виду

$$t_{\text{уст}}^{\circ} = \frac{J^2 \rho d}{4A_0} + t_{\text{окр}}^{\circ}, \quad (1.11)$$

где  $A_0$  — коэффициент теплоотдачи, представляющий собой теплоотдачу с  $1 \text{ м}^2$  поверхности охлаждения проводника,  $\text{Дж}/(^{\circ}\text{С} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^2)$ ;  $J$  — плотность тока в проводнике,  $\text{А}/\text{м}^2$ ;  $\rho$  — удельное сопротивление материала проводника,  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ ;  $d$  — диаметр проводника,  $\text{м}$ .

Как видно, при заданных значениях  $\rho$ ,  $d$ ,  $A_0$  и  $t_{\text{окр}}^{\circ}$  установившаяся температура зависит от плотности тока в проводнике. Для получения той же температуры  $t_{\text{уст}}^{\circ}$  плотность тока проводников большего диаметра должна быть меньше.

Очевидно, можно задать такую плотность тока (или такой ток в проводнике с данной площадью поперечного сечения), при которой температура проводника не превышала бы допустимого значения. Этим часто пользуются при расчете токоведущих частей по нагреванию. Так, на основании расчетных и экспериментальных данных разработаны таблицы, в которых указаны площади поперечного сечения проводов и соответствующие им по условиям нагревания допустимые значения токов. Таблицы предназначены для выбора площади поперечного сечения проводов электрических сетей.

Допустимой плотностью тока в проводнике обычно для предварительного или приближенного расчета по нагреванию катушек электрических машин и аппаратов. В зависимости от условий охлаждения допустимая плотность тока при длительной работе многослойных катушек из медных проводов с хлопчатобумажной, шелковой и эмалевой изоляцией принимается  $1,5\text{--}3 \text{ А}/\text{мм}^2$ .

## 1.9. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

При включении различного количества приемников, изменении их параметров или сопротивлений регулировочных резисторов будут изменяться напряжения, токи и мощности в электрической цепи, от значений которых зависит режим работы цепи и ее элементов. Наиболее характерными являются следующие режимы работы: номинальный, согласованный, холостого хода и короткого замыкания.

Номинальным называется режим, при котором данный элемент электрической цепи работает со значениями различных величин (тока, напряжения и др.), на которые он рассчитан заводом-изготовителем и которые называются его номинальными (или техническими данными). Номинальные данные указываются в справочной литературе, технической документации или на самом элементе.

Для различных элементов электрических цепей указываются различные номинальные данные. Так, основными номинальными данными генераторов являются номинальное напряжение, электрическая мощность, отдаваемая приемнику, и ток; основными номинальными данными аккумуляторов являются номинальное напряжение и емкость в ампер-часах; в качестве основных номинальных данных электродвигателей указываются номинальное напряжение, ток, механическая мощность, развиваемая двигателем, и частота вращения; для нагревательных приборов и осветительных ламп задаются номинальные напряжения и мощности, для резисторов — номинальные сопротивления и токи (или мощности). Следует обратить внимание на то, что номинальные мощности и токи многих элементов электрических цепей (двигателей, генераторов, резисторов и др.) устанавливаются, исходя из их нагревания до наибольшей допустимой температуры.

С учетом номинальных напряжений и токов источников и приемников производится выбор проводов и других элементов электрических цепей.

Согласованным называется режим, при котором мощность, отдаваемая источником или потребляемая приемником, достигает максимального значения. Это возможно при определенном соотношении (согласовании) параметров электрической цепи, откуда и вытекает название данного режима.

Под режимом холостого хода понимается такой режим, при котором приемник отключен от источника. При этом источник не отдает энергию во внешнюю цепь, а приемник не потребляет ее. Режимом холостого хода двигателей считается режим, возникающий при работе двигателей без механической нагрузки на валу.

Режимом короткого замыкания называется режим, возникающий при соединении между собой выводов источника, приемника или соединительных проводов, а также иных элементов электрической цепи, между которыми имеется напряжение. При этом сопротивление в месте соединения оказывается практически равным нулю.

Режим короткого замыкания является следствием выхода из строя изоляции, обрыва проводов, поломки деталей, небрежности обслуживающего персонала. При коротких замыканиях могут возникнуть недопустимо большие токи, электрическая дуга, возможно резкое снижение напряжения. Все это может привести к весьма

тяжелым последствиям, поэтому режим короткого замыкания рассматривают как аварийный.

Следует заметить, что энергетические установки работают чаще всего в режиме, при котором токи и мощности не превышают номинальных значений, а напряжения близки к номинальным. Однако, как будет показано далее, при пуске и электрическом торможении двигателей и включении многих аппаратов (при переменном токе) в течение относительно короткого времени возникают токи, превышающие номинальные, что учитывается при расчете устройств по условиям нагревания.

### 1.10. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ И ПАССИВНЫМИ (РЕЗИСТИВНЫМИ) ЭЛЕМЕНТАМИ

Многие электрические цепи имеют лишь один источник энергии и то или иное число пассивных (резистивных) элементов. Это могут быть приемники электрической энергии и различные вспомогательные элементы.

Расчет и анализ неразветвленных и некоторых разветвленных цепей с одним источником и пассивными элементами производится с помощью закона Ома, первого и второго законов Кирхгофа, не требует совместного решения уравнений. Во многих случаях расчет и анализ осуществляются путем замены отдельных участков, а затем всей цепи одним элементом с эквивалентным сопротивлением и последующего перехода в процессе расчета к заданной цепи. В некоторых случаях целесообразно воспользоваться методом эквивалентного генератора (см. § 1.14).

**1.10.1. Простейшая цепь с одним приемником.** Допустим, что мы имеем простейшую неразветвленную электрическую цепь (рис. 1.4, *a*). В этой цепи участок *amb* представляет собой простейший пассивный двухполюсник, являющийся приемником электрической энергии, участок *amb* — простейший активный двухполюсник, являющийся источником.

Необходимость изучения указанной цепи объясняется тем, что такие цепи часто встречаются на практике, а также тем, что к такой цепи могут быть сведены более сложные цепи, что облегчает их расчет и анализ.

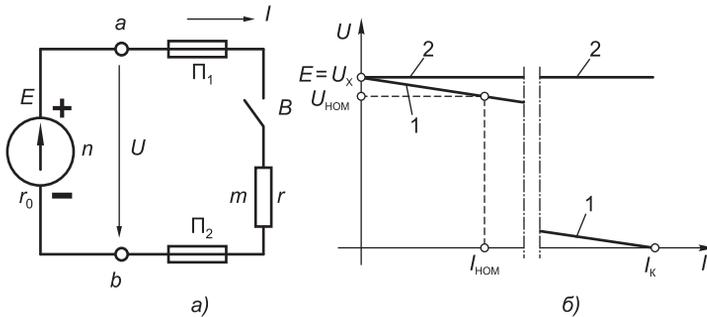


Рис. 1.4. Схема простейшей электрической цепи (а) и внешние характеристики источника (б)

Для рассматриваемой электрической цепи по второму закону Кирхгофа можно написать

$$E = Ir_0 + Ir; \quad (1.12)$$

$$E = Ir_0 + U. \quad (1.13)$$

Из приведенных уравнений нетрудно получить формулу для определения тока и соотношение между напряжением и ЭДС источника:

$$I = E/(r_0 + r) = E/r_э; \quad (1.14)$$

$$U = E - Ir_0, \quad (1.15)$$

где  $r_э = r_0 + r$  — эквивалентное сопротивление цепи.

Как видно, при неизменных значениях ЭДС  $E$  и внутреннего сопротивления  $r_0$  ток в цепи зависит от сопротивления  $r$  приемника. Напряжение источника  $U$  (равное в данной цепи напряжению приемника) меньше его ЭДС на падение напряжения  $I \cdot r_0$  во внутреннем сопротивлении источника.

Если умножить (1.12) и (1.15) на ток, получим соотношения между мощностями

$$EI = I^2 r_0 + I^2 r; \quad (1.16)$$

$$UI = EI - I^2 r_0. \quad (1.17)$$

Правая часть (1.16) содержит потери мощности во внутреннем сопротивлении  $I^2 r_0$  и мощность, потребляемую приемником  $I^2 \cdot r$ .

Очевидно, произведение  $EI$  представляет собой мощность, вырабатываемую источником, т. е. электрическую мощность, преобразуемую им из другого вида мощности; например, если это генератор, — из механической мощности.

Если из вырабатываемой мощности вычесть потери мощности во внутреннем сопротивлении источника  $I^2 r_0$ , получим мощность  $UI$ , отдаваемую источником во внешнюю цепь, что нашло свое отражение в (1.17). Мощность, отдаваемая источником в данной цепи, равна мощности, потребляемой приемником,  $UI = I^2 r$ .

В связи с выражениями (1.16) и (1.17), а также схемой рис. 1.4, а необходимо обратить внимание на следующее. Вырабатываемая источником мощность определяется произведением тока на ЭДС, совпадающую по направлению с током, отдаваемая им мощность — произведением тока на напряжение, направленное внутри источника против тока; мощность, потребляемая приемником, определяется произведением тока на напряжение, совпадающее по направлению с током. Такие взаимные направления тока и ЭДС, а также тока и напряжения характерны для источников и приемников и в других электрических цепях. Учитывая это, выражения мощностей, вырабатываемых и отдаваемых источниками, а также потребляемых приемниками могут быть записаны следующим образом:

$$P_{\text{выр}} = \overrightarrow{E} \overleftarrow{I}; \quad (1.18)$$

$$P_{\text{отд}} = \overleftarrow{U} \overleftarrow{I}; \quad (1.19)$$

$$P_{\text{потр}} = \overrightarrow{U} \overleftarrow{I}. \quad (1.20)$$

Выражения (1.19) и (1.20) справедливы также и для сколь угодно сложных активных двухполюсников, отдающих и потребляющих электрическую энергию.

Отношение мощности, отдаваемой источником, к вырабатываемой им мощности представляет собой КПД источника

$$\eta = \frac{P_{\text{отд}}}{P_{\text{выр}}} = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E} = \frac{r}{r_0 + r}. \quad (1.21)$$

Пользуясь полученными соотношениями, нетрудно установить, как будут меняться значения тока, напряжения, мощности и других величин при изменении сопротивления  $r$ , например, при подключении к источнику различных приемников или изменении числа параллельно включенных приемников. Если отключить приемник с помощью выключателя  $B$  (рис. 1.4, а), то электрическая цепь и все ее элементы будут работать в режиме холостого хода. В этом случае следует считать  $r = \infty$ . Из (1.14) видно, что при холостом ходе  $I = 0$ . Вследствие этого оказываются равными нулю падение напряжения  $I r_0$ , потери мощности  $I^2 r_0$  и мощности  $EI$  и  $UI$ . Так как  $I r_0 = 0$ , то согласно (1.15)  $U = U_x = E$ .

Уменьшение сопротивления  $r$  приводит к увеличению тока  $I$ , падению напряжения  $I r_0$ , потере мощности  $I^2 r_0$  и мощности  $E I$ . Напряжение  $U$  и КПД при этом уменьшаются.

Для того чтобы можно было судить о характере изменения мощности приемника, выразим ее следующим образом:

$$P_{\text{потр}} = I^2 r = E^2 \frac{r}{(r_0 + r)^2}. \quad (1.22)$$

Анализ выражения (1.22) показывает, что с уменьшением сопротивления  $r$  мощность  $P_{\text{потр}}$  возрастает и при  $r = r_0$  достигает максимального значения. Дальнейшее уменьшение  $r$  приводит к уменьшению  $P_{\text{потр}}$ . При  $r = 0$   $P_{\text{потр}} = 0$ . Максимальное значение мощности  $P_{\text{потр}}$  соответствует согласованному режиму работы приемника. Нетрудно установить, что при согласованном режиме  $U = 0,5E$ ,  $P_{\text{потр}} = 0,5P_{\text{выр}}$ ,  $\eta = 0,5$ .

С технико-экономической точки зрения согласованный режим является нерациональным, так как к приемнику поступает лишь половина вырабатываемой источником мощности. Согласованный режим используется в некоторых радиотехнических устройствах, в автоматике и измерительной технике, когда важно получить максимальную мощность приемника. Энергетические соображения при этом не имеют решающего значения из-за малого абсолютного значения мощности.

В промышленных установках, где приходится иметь дело со значительными мощностями, важно, чтобы к приемнику поступала основная часть вырабатываемой мощности, а КПД имел большое значение. Это имеет место при  $r \gg r_0$ .

Именно такое соотношение сопротивлений и характерно для номинального режима работы энергетических установок. Так как при номинальном режиме  $r \gg r_0$ , то  $U_{\text{ном}} = I_{\text{ном}} r \gg I_{\text{ном}} r_0$  и согласно (1.15) напряжение источника будет мало отличаться от его ЭДС.

Если выводы приемника окажутся замкнутыми некоротко, например вследствие выхода из строя изоляции, то электрическая цепь будет работать в режиме короткого замыкания. В этом случае во всех соотношениях, полученных ранее, следует положить  $r = 0$ .

Так как при номинальном режиме  $r \gg r_0$ , то номинальный ток  $I = I_{\text{ном}}$  определяется в основном значением сопротивления  $r$  [см. (1.14)]. Поскольку при коротком замыкании  $r = 0$ , то  $r_s = r_0$  и ток

короткого замыкания оказывается намного больше номинального тока:

$$I_{\text{к}} = E/r_0 \gg I_{\text{н}}.$$

Естественно, что при коротком замыкании  $U = I_{\text{к}}r = 0$  и  $P_{\text{потр}} = UI_{\text{к}} = 0$ . Мощность  $P_{\text{выр}} = EI_{\text{к}}$  значительно возрастет и целиком преобразуется в теплоту в сопротивлении  $r_0$ . Последнее может привести к выходу из строя изоляции и даже к перегоранию проводов. В источнике, кроме того, наблюдается ряд других нежелательных явлений.

Простейшими аппаратами для защиты от возможных последствий коротких замыканий являются предохранители ( $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  на рис. 1.4, *a*). Предохранитель имеет плавкую вставку, представляющую собой короткий проводник с меньшей термической стойкостью по сравнению с другими элементами цепи. При коротком замыкании плавкая вставка перегорает и отключает поврежденный участок цепи. Плавкие вставки изготавливаются в большинстве случаев из медной проволоки и имеют настолько малое сопротивление, что практически не влияют на токи, напряжения и мощность в электрической цепи.

В дальнейшем предохранители на схемах изображаться не будут.

Одной из важнейших характеристик источников электрической энергии является их внешняя характеристика  $U(I)$ . Внешняя характеристика показывает, как зависит напряжение источника от тока нагрузки, подчиняется уравнению (1.15), при  $E = \text{const}$  и  $r_0 = \text{const}$  представляет собой прямую линию (рис. 1.4, *б*, характеристика 1). На характеристике показаны точки, соответствующие режимам холостого хода, короткого замыкания и номинальному режиму работы источника.

Из соотношения (1.15) следует, что напряжение источника можно считать постоянным и равным его ЭДС ( $U = E = \text{const}$ ), если пренебречь внутренним сопротивлением  $r_0$  источника. В этом случае источник называют идеальным источником ЭДС. Внешняя характеристика идеального источника приведена на рис. 1.4, *б* (характеристика 2).

**1.10.2. Электрические цепи с последовательным соединением резистивных элементов.** Последовательным называется такое соединение элементов, когда условный конец первого элемента соединяется с условным началом второго, конец второго — с началом третьего и т. д. Характерным для последовательного соединения является один и тот же ток во всех элементах. Последовательное соединение нашло широкое применение на практике. Например, последовательно с приемником  $r$  часто включается резистор  $r_{\text{р}}$  для регулирования напряжения, тока или мощности при-