

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Прошло более 100 лет с тех пор, как началось использование электрической энергии в жизнедеятельности человека (в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве, в быту и других не менее важных областях). Представители разных специальностей в своей работе имеют дело с различного рода электрооборудованием. Поэтому электротехническая подготовка инженеров не-электротехнических специальностей должна включать достаточно подробное изучение вопросов теории и практики использования различных электроустановок и электронных приборов. Инженер любой специальности должен знать устройство, принцип действия, характеристики и эксплуатационные возможности электрических машин, электроизмерительных приборов, аппаратов и другого электрооборудования, способы регулирования и управления ими.

Изложение материала базируется на знаниях, полученных студентами при изучении курсов математики и физики (в области электричества, физических законов электромагнитного поля, механики и др.).

Содержание и методика изложения материала во многом определены практикой преподавания электротехники в Ленинградском политехническом институте им. М. И. Калинина (ныне в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете), основы которой были заложены первым заведующим кафедрой электротехники, Героем Социалистического Труда, лауреатом Государственной премии профессором М. А. Шателеном (1866–1957).

Авторы выражают благодарность членам кафедры «Электротехники и электротехнологии» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ), а также всем коллегам из других вузов, которые в своих устных и письменных отзывах сделали полезные замечания и предложения к первому изданию книги «Электротехника» (авторы И. И. Иванов, В. С. Равдоник), вышедшей в 1984 г. в издательстве «Высшая школа», и к последующим изданиям (авторы И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. С. Равдоник), вышедшим в издательстве «Лань».

Настоящее издание выходит под названием «Электротехника и основы электроники» и является переработанным и дополненным в части «Электротехника»; добавлена часть «Основы электроники». Содержание книги соответствует государственным образовательным стандартам высшего профессионального образования, в которых учебная дисциплина для большинства направлений и специальностей подготовки имеет название «Электротехника и основы электроники» или «Электротехника и электроника».

Переработка и дополнения в части «Электротехника» выполнены профессорами И. И. Ивановым и Г. И. Соловьевым, часть «Основы электроники» написана профессором В. Я. Фроловым.

*Отзывы о книге просим направлять по адресу: 194251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, или в издательство «Лань» по адресу: [market@lanbook.ru](mailto:market@lanbook.ru).*

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

# ВВЕДЕНИЕ

## В.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Развитие научной мысли привело в конце XIX века к практическому использованию электрической энергии. Это было началом научно-технической революции. Развитие электроэнергетики и сегодня является основным условием научно-технического прогресса и технического совершенствования производства. Такая важнейшая роль электроэнергии обусловлена следующим:

1) в электрическую энергию легко преобразуются любые виды энергии (тепловая, атомная, механическая, химическая, лучистая, энергия водного потока), и наоборот, электрическая энергия может быть легко преобразована в любой другой вид энергии;

2) электроэнергию можно передавать практически на любое расстояние;

3) ее можно легко дробить на любые части (мощность электроприемников может быть от долей ватта до тысяч киловатт);

4) процессы получения, передачи, распределения и потребления можно просто и эффективно автоматизировать;

5) управление процессами, в которых используют электроэнергию, обычно очень простое (нажатие кнопки управления, выключателя и т. п.);

6) использование электрической энергии способствует созданию комфортных условий труда и быта.

Единственным недостатком электроэнергии является отсутствие «склада готовой продукции». Запасать электроэнергию и сохранять эти запасы в течение больших сроков человечество еще не научилось. Запасы электроэнергии в аккумуляторах, гальванических элементах

и конденсаторах достаточны лишь для работы сравнительно маломощных установок, причем сроки хранения этих запасов ограничены. Поэтому электроэнергия должна быть произведена тогда и в таком количестве, когда и в каком количестве в ней возникает потребность.

Применение электрической энергии позволило повысить производительность труда во всех областях деятельности человека, внедрить и автоматизировать целый ряд технологических процессов в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве и быту, основанных на новых принципах, ускоряющих, облегчающих и удешевляющих процесс получения окончательного продукта, а также создать комфорт в производственных, общественных и жилых помещениях.

Преобразование электрической энергии в механическую осуществляется электродвигателями, которые используют для привода станков и вращающихся машин в различных отраслях промышленности, сельского хозяйства, в подъемно-транспортных устройствах и т. д. Благодаря преимуществам электродвигателей перед другими типами двигателей их мощность в промышленности по отношению к общей мощности установленных двигателей в настоящее время составляет почти 100% (в 1890 г. — 5%, в 1927 г. — 75%).

Электрическую энергию также широко используют в технологических установках для нагрева изделий, плавления металлов, сварки, электролиза, для получения плазмы, новых материалов с помощью электрохимии, для очистки материалов и газов и т. д. Работа современных средств связи (телеграфа, телефона, радио, телевидения) основана на применении электрической энергии. Без нее невозможно было бы развитие кибернетики, вычислительной и космической техники и т. д. Электрическая энергия является сейчас практически единственным видом энергии для искусственного освещения. Продолжается расширение области использования электроэнергии, и вместе с этим повышается электровооруженность труда, зависимость производства от квалификации работников, от степени надежности электроснабжения. Следовательно, обеспечение электротехнического образования всех специалистов технических и экономических направлений является важнейшей задачей высшей школы.

## В.2. ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СТРАНЫ

В России первые опыты передачи электрической энергии на расстояние были произведены в 1874 г. Мощность передачи составляла всего 6 л. с., а дальность передачи — сначала 200 м, а затем 1 км. Только разработка трансформатора, позволившего повысить напряжение передачи, и разработка элементов трехфазной системы русским электротехником М. О. Доливо-Добровольским в конце XIX века позволили повысить мощность и дальность передачи. И все же до 1913 г. были только зачатки электрификации страны.

По предложению В. И. Ленина в 1920 г. был разработан Государственный план электрификации России (ГОЭЛРО). В разработке плана под руководством крупного энергетика Г. М. Кржижановского принимали участие передовые ученые и инженеры России: К. А. Круг, Р. Э. Классон, М. А. Шателен, Т. Ф. Макарьев и др. Тысячи людей были увлечены этим планом хозяйственного переустройства.

Практически план ГОЭЛРО был первым планом развития народного хозяйства страны. Предполагалось за 10–15 лет построить 30 электростанций общей мощностью 1750 МВт. Это Каширская ГЭС (1922 г.), ГЭС «Красный Октябрь» под Ленинградом (1922 г.), Шатурская ГЭС (1925 г.), Волховская ГЭС (1925 г.), каскад Свирских ГЭС и др. Планом ГОЭЛРО предусматривалось также строительство линий электропередач высокого напряжения, электрификация железных дорог, развитие электрифицированных промышленных комплексов. В 1931 г. план ГОЭЛРО был выполнен по всем основным показателям.

В планах дальнейшего развития народного хозяйства предусматривались опережающие темпы развития электроэнергетики. Выработка электроэнергии увеличивалась с каждым годом (табл. В.1).

К концу 1980 г. мощность всех электростанций страны составляла 350 млн кВт. Мощность отдельных тепловых электростанций достигла 3,0 млн кВт, атомных — 4,0 млн кВт, гидравлических — 6,4 млн кВт. Мощность отдельных энергоблоков составила 1200 МВт (турбогенератор Костромской ГРЭС) и 640 МВт (гидрогенератор

Саяно-Шушенской ГЭС). Доля атомных электростанций в выработке электроэнергии достигла примерно 13 процентов.

Постепенно происходит изменение структуры энергетических ресурсов, используемых для производства электроэнергии. Кроме энергии органического топлива, воды и атома для производства электроэнергии сейчас используют энергию термальных вод, ветра, приливов и отливов океана и солнечную энергию. Однако эти источники еще не играют существенной роли в развитии большой энергетики. Перспективным видом энергии является термоядерная энергия, получаемая при синтезе легких элементов. Ее использование решит проблему обеспечения человечества энергией на исторически обозримое время.

Как известно, электростанции объединяют в энергосистемы для совместной работы. Все электростанции

*Таблица В.1*

**Выработка электроэнергии в СССР**

Год	Выработка, млрд. кВт·ч	Год	Выработка, млрд. кВт·ч	Год	Выработка, млрд кВт·ч
1913	~2	1950	91	1975	1039
1928	5,0	1955	170	1980	1294
1932	13,5	1960	292	1985	1545
1940	48,6	1965	507	1988	1705
1945	43,3	1970	740	1990	1840

*Таблица В.2*

**Выработка электроэнергии в Российской Федерации**

Год	Выработка, млрд кВт·ч	Год	Выработка, млрд кВт·ч	Год	Выработка, млрд кВт·ч
1980	805	1995	864	2003	916
1985	962	1996	847	2004	932
1988	1066	1997	834	2005	953
1990	1081	1998	827	2006	931
1991	1068	1999	849	2007	1008
1992	1008	2000	878	2008	1033
1993	956	2001	891	2009	977
1994	877	2002	891		

Советского Союза были объединены в 95 энергосистем, которые входили в 11 объединенных энергосистем (ОЭС). ОЭС Средней Азии и Востока работали изолированно, а остальные ОЭС, в которых параллельно работали 79 энергосистем, входили в состав Единой энергосистемы (ЕЭС) СССР. Распад СССР в 1991 г. не позволил продолжить работу по включению в ЕЭС объединенных энергосистем Средней Азии и Востока. Были прекращены работы по строительству мощных линий электропередач высокого напряжения (1150 кВ переменного тока и 1500 кВ постоянного тока) из района Канско-Ачинского топливно-энергетического комплекса в европейскую часть страны. В табл. В.2 приведены данные по выработке электроэнергии электростанциями Российской Федерации.

В 2009 г. выработка электрической энергии на ТЭС составила 66%, на ГЭС — 18,3% и на АЭС — 15,7%.



# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## 1.1.

### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Электрической цепью называют совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об электродвижущей силе, токе и напряжении.

В электрической цепи постоянного тока могут действовать как постоянные токи, значение и направление которых в любой момент времени остаются неизменными (рис. 1.1а), так и токи, направление которых остается постоянным, а значение изменяется во времени произвольно (рис. 1.1б) или по какому-либо закону (рис. 1.1в) (такие токи, строго говоря, нельзя назвать постоянными).

Под цепями постоянного тока в современной технике подразумевают цепи, в которых ток не меняет своего направления, т. е. полярность источников ЭДС в них постоянна.

Электрическая цепь состоит из отдельных устройств или элементов, которые по назначению можно подразделить на три группы. Первая группа — элементы, предназначенные для *генерирования* (выработки) электроэнергии (источники питания или источники ЭДС). Вторая группа — элементы, *преобразующие* электроэнергию в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую, химическую и т. д.); эти элементы называют приемниками электрической энергии или электроприемниками. Третья группа — это элементы, предназначенные для *передачи* электроэнергии от источника питания к электроприемнику (провода, устройства, обеспечивающие уровень и качество напряжения, и др.).

*Источники питания* (рис. 1.2) цепи постоянного тока — это гальванические элементы, электрические аккумуляторы, электромеханические генераторы, термоэлектрические генераторы, фотоэлементы и др. Все источники питания имеют внутреннее сопротивление  $R_{вт}$ , значение которого невелико по сравнению с сопротивлением других элементов электрической цепи.

*Электроприемниками* постоянного тока являются электродвигатели, преобразующие электрическую энергию в механическую, нагревательные и осветительные приборы, электролизные установки и др. Условные обозначения некоторых из них приведены на рис. 1.3. Все электроприемники характеризуются электрическими параметрами, среди которых основные — напряжение и мощность.

Для нормальной работы электроприемника на его зажимах необходимо поддерживать номинальное напряжение  $U_{ном}$  (для приемников постоянного тока по ГОСТ 721  $U_{ном} = 27, 110, 220, 440$  В, а также 6, 12, 24, 36 В).

Элементы электрической цепи делят на активные и пассивные. К *активным элементам* относят те, в которых индуцируется ЭДС (источники ЭДС, электродвигатели, аккумуляторы в процессе зарядки и т. п.). Все прочие электроприемники и соединительные провода относят к *пассивным элементам*.

Элементы электрической цепи, обладающие электрическим сопротивлением  $R$  и называемые *резисторами*, характеризуются так называемой *вольт-амперной характеристикой* — зависимостью напряжения на зажимах элемента от тока в нем или зависимостью тока в элементе от напряжения на его зажимах (рис. 1.4).

Сопротивление  $R$ , а также проводимость  $G$  (величина, обратная сопротивлению  $R$ ) элемента — это *параметры электрической цепи*. Если сопротивление  $R$  элемента не зависит от тока в нем, то такой элемент называют *линейным элементом*, а его вольт-амперная характеристика  $U = RI$  или  $I = U/R$  представляет собой прямую линию.

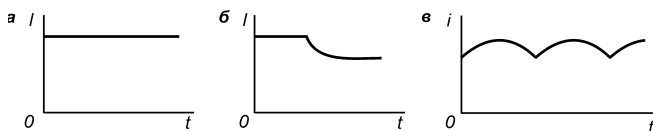


Рис. 1.1  
Примеры графиков постоянного тока

Рис. 1.2  
Условные обозначения  
источников питания  
постоянного тока

*a* — гальванический и аккумуляторный элементы; *б* — электро-механический генератор, *в* — термо-электрический генератор (термопара); *г* — фотоэлемент; *д* — общее обозначение источника ЭДС постоянного тока.

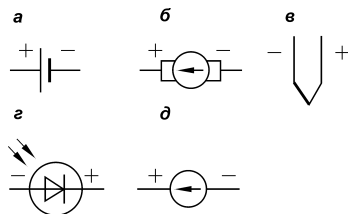


Рис. 1.3  
Условные обозначения  
электроприемников  
постоянного тока

*a* — электродвигатель; *б* — резистор; *в* — нагревательный элемент; *г* — электрическая печь нагрева; *д* — лампа накаливания.

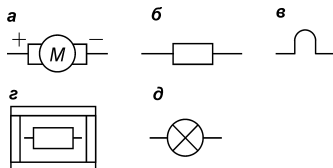
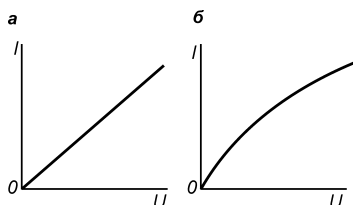


Рис. 1.4  
Вольт-амперные характери-  
стики элементов  
электрической цепи

*a* — линейный элемент; *б* — не-  
линейный элемент.



В общем случае сопротивление  $R$  элемента зависит как от тока в нем, так и от напряжения. Одна из причин этого состоит в изменении сопротивления проводника вследствие его нагрева током. При повышении температуры сопротивление проводника

$$R = R_0 (1 + \alpha (\tau - \tau_0)), \quad (1.1)$$

где  $R_0$  — сопротивление при температуре окружающей среды  $\tau_0$  (обычно  $\tau_0 = 20^\circ\text{C}$ );  $\alpha$  — температурный коэффициент;  $\tau$  — температура проводника.

Но так как во многих случаях эта зависимость незначи-  
тельна, элемент считают линейным ( $R = \text{const}$ ).

Электрическую цепь, электрическое сопротивление участков которой не зависит от значений и направле-  
ний токов и напряжений в цепи, называют линейной электрической цепью. Такая цепь состоит только из линейных элементов, а ее состояние может быть опи-  
сано линейными алгебраическими уравнениями.

Если сопротивление элемента цепи существенно за-  
висит от тока или напряжения, то вольт-амперная

характеристика носит нелинейный характер (рис. 1.4б), а такой элемент называют *нелинейным элементом*.

Электрическую цепь, электрическое сопротивление хотя бы одного из участков которой зависит от значений или от направлений токов и напряжений в этом участке цепи, называют *нелинейной электрической цепью*. Такая цепь содержит хотя бы один нелинейный элемент.

Для расчета и анализа работы электрической цепи, состоящей из любого количества различных элементов, удобно эту цепь представить графически. Графическое изображение электрической цепи, содержащее условные обозначения ее элементов и показывающее соединения этих элементов, называют *электрической схемой цепи*. Простейшая схема электрической цепи, состоящая из источника ЭДС  $E$  и резистора с сопротивлением  $R$ , изображена на рис. 1.5.

Участок электрической цепи, во всех элементах которого существует один и тот же ток, называют *ветвью*. Место соединения ветвей электрической цепи называют *узлом*. На электрических схемах узел обозначают точкой (рис. 1.6). Иногда несколько геометрических точек, соединенных проводниками, сопротивление которых принимают равными нулю, образуют один узел (рис. 1.6, узел  $a$ ). Таким образом, каждая ветвь соединяет два соседних узла электрической схемы. Число ветвей

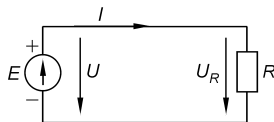


Рис. 1.5  
Простейшая схема  
электрической цепи

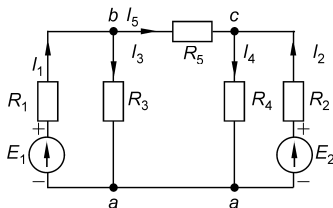


Рис. 1.6  
Схема многоконтурной электрической цепи ( $p = 5$ ,  $q = 3$ )

схемы принято обозначать буквой  $p$ , а число узлов —  $q$ . Электрическая цепь, изображенная на схеме рис. 1.6, имеет число ветвей  $p = 5$  и число узлов  $q = 3$  ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ).

Любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям, называют *контуром электрической цепи*. Простейшая электрическая цепь имеет одноконтурную схему (рис. 1.5), сложные электрические цепи — несколько контуров (рис. 1.6).

## 1.2. УСЛОВНЫЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЭДС, ТОКА В ЭЛЕМЕНТАХ ЦЕПИ И НАПРЯЖЕНИЯ НА ЗАЖИМАХ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПИ

Чтобы правильно записать уравнения, описывающие процессы в электрических цепях, и произвести анализ этих процессов, необходимо задать *условные положительные направления* ЭДС источников питания, токов в элементах или ветвях цепи и напряжений на зажимах элементов цепи или между узлами цепи.

Внутри *источника ЭДС* постоянного тока положительным является направление ЭДС от отрицательного полюса к положительному, т. е. от полюса с низшим потенциалом к полюсу с высшим потенциалом (см. рис. 1.5). Это соответствует определению электродвижущей силы как величины, характеризующей способность стороннего поля и индуцированного электрического поля вызывать электрический ток.

По отношению к источнику ЭДС все элементы, входящие в состав цепи, составляют *внешний участок цепи*. За положительное направление *тока* в цепи принимают направление, совпадающее с направлением ЭДС. Это значит, что во внешней цепи положительным является направление от положительного полюса источника ЭДС к отрицательному, т. е. направление, совпадающее с направлением движения положительно заряженных частиц.

Условным положительным направлением *падения напряжения*, или просто напряжения, на элементе цепи или между двумя узлами цепи принимают направление, совпадающее с условным положительным направлением тока в этом элементе или в этой ветви. Действительно, падение напряжения  $U_R$  на резисторе  $R$  (см. рис. 1.5) определяется соотношением  $U_R = RI$ . Так как  $R > 0$ , то падение напряжения  $U_R$  и ток  $I$  имеют одинаковые знаки.

Напряжение  $U_R$ , как это видно из рис. 1.5, является напряжением  $U$  на зажимах источника ЭДС. Таким образом, положительное направление напряжения на зажимах источника ЭДС всегда противоположно положительному направлению ЭДС источника.

Условные положительные направления (или просто положительные направления) тока, ЭДС и напряжения показывают на электрических схемах стрелками.

Действительные направления электрических величин, определяемые расчетом, могут совпадать или не совпадать с условными. Если расчетом или каким-либо иным образом определено, что ток, ЭДС и напряжение положительны, то их действительные направления совпадают с условно принятыми положительными направлениями, и наоборот.

### 1.3. ЗАКОНЫ КИРХГОФА

Соотношения между токами и ЭДС в ветвях электрической цепи и напряжениями на элементах цепи, позволяющие произвести расчет электрической цепи, определяются двумя законами Кирхгофа.

**Первый закон Кирхгофа** отражает принцип непрерывности движения электрических зарядов, из которого следует, что в любой момент времени количество электрических зарядов, направленных к узлу, равно количеству зарядов, направленных от узла, т. е., что электрический заряд в узле не накапливается. Поэтому

||| *алгебраическая сумма токов в ветвях, сходящихся в узле электрической цепи, равна нулю:*

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0, \quad (1.2)$$

||| *где  $n$  — число ветвей, сходящихся в узле.*

До написания уравнения (1.2) необходимо задать условные положительные направления токов в ветвях, обозначив эти направления на схеме стрелками. В уравнении (1.2) токи, направленные к узлу, записывают с одним знаком (например, с плюсом), а токи, направленные от узла, — с противоположным знаком (с минусом). Таким образом, для узла  $b$  схемы (рис. 1.6) уравнение по первому закону Кирхгофа будет иметь вид

$$I_1 - I_3 - I_5 = 0.$$

Первый закон Кирхгофа может быть сформулирован иначе:

||| *сумма токов, направленных к узлу, равна сумме токов, направленных от узла.*

Тогда уравнение для узла  $b$  (рис. 1.6) будет записано так:

$$I_1 = I_3 + I_5.$$

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)