

Высшее профессиональное образование

БАКАЛАВРИАТ

Ю. Г. ПОДКИН, Т. Г. ЧИКУРОВ, Ю. В. ДАНИЛОВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

В ДВУХ ТОМАХ

Под редакцией Ю. Г. ПОДКИНА

ТОМ 1

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Рекомендовано

Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Конструирование и технология электронных средств»



Москва
Издательский центр «Академия»
2011

УДК 621.3:621.38(075.8)

ББК 31.2:32.85я73

П44

Рецензенты:

зав. кафедрой автоматики и управления в технических системах
Радиотехнического института Уральского государственного технического
университета, д-р техн. наук, проф., академик АИН им. А. М. Прохорова

В. Г. Лисиенко;

зав. кафедрой электротехники и электротехнологических систем Уральского
государственного технического университета — УПИ имени первого Президента
России Б. Н. Ельцина, д-р техн. наук, проф. *Ф. Н. Саранулов*

Подкин Ю. Г.

П44 Электротехника и электроника. В 2 т. Т. 1. Электротехника :
учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Ю. Г. Подкин,
Т. Г. Чикуров, Ю. В. Данилов ; под ред. Ю. Г. Подкина. — М. :
Издательский центр «Академия», 2011. — 400 с. — (Сер. Бакалавр-
риат).

ISBN 978-5-7695-7147-3

Учебное пособие создано в соответствии с Федеральным государственным
образовательным стандартом по направлению подготовки «Конструирование и
технология электронных средств» (квалификация «бакалавр»).

В т. 1 рассмотрены основы электротехники. Развернутое теоретическое обо-
снование изучаемых разделов электротехники сопровождается многочисленными
примерами расчетов, выполненных в MathCAD, и техническими приложениями,
взятыми в основном из практики приборостроения. Показано применение тео-
ретических основ электротехники при проектировании радиотехнических систем
и создании входных преобразователей и исполнительных устройств систем авто-
матики. Изложение учебного материала позволяет формировать профессиональ-
ные компетенции уже на стадии изучения общепрофессиональных дисциплин.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования. Пред-
назначено для студентов, обучающихся по направлениям «Приборостроение»,
«Информатика и вычислительная техника», а также «Электроника и нанозлек-
троника», «Радиотехника», «Автоматизация технологических процессов и произ-
водств», «Мехатроника и робототехника», «Техническая физика», «Радиофизика».
Может быть полезно аспирантам и разработчикам электронной техники.

УДК 621.3:621.38(075.8)

ББК 31.2:32.85я73

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

ISBN 978-5-7695-7147-3 (т. 1)
ISBN 978-5-7695-7148-0

© Подкин Ю. Г., Чикуров Т. Г., Данилов Ю. В., 2011
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2011
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2011

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АМ — амплитудная модуляция
- БМ — балансная модуляция
- ВАХ — вольтамперная характеристика
- ГВВ — генератор с внешним возбуждением
- ГПВ — генератор с параллельным возбуждением
- ГПсВ — генератор с последовательным возбуждением
- ГСВ — генератор со смешанным возбуждением
- ИПЭП — источники первичного электропитания
- ИВЭП — источники вторичного электропитания
- КЗ — короткое замыкание
- КПД — коэффициент полезного действия
- МДС — магнитодвижущая сила
- НЭ — нелинейный элемент
- ОС — обратная связь
- ООС — отрицательная обратная связь
- ПОС — положительная обратная связь
- ПФ — полосовой фильтр
- ТДЛ — трансформатор типа длинной линии
- УЭ — управляемый элемент
- ФВЧ — фильтр верхних частот
- ФНЧ — фильтр нижних частот
- ХИТ — химические источники тока
- ХХ — холостой ход
- ЭДС — электродвижущая сила

Теоретическая база электротехники и электроники настолько обширна, что совершенно нереально изучить ее в полном объеме в рамках, отведенных образовательными программами. Необходим разумный компромисс между целевой функцией дисциплины и полнотой охвата учебного материала.

Бакалаврам выделяется меньше времени на освоение профильных дисциплин, чем специалистам, следовательно, при изучении общетехнических учебных курсов необходимо формировать более глубокие знания базовых положений, определяющих уровень и качество подготовки, т.е. компетентность выпускников первой ступени. С этой целью в учебном пособии содержание и методика изложения отдельных тем выбирались в первую очередь по критериям общепрофессиональных компетенций разработчиков и пользователей электронных средств.

Значительно изменена, по сравнению с принятой в общей электротехнике и электронике, структура и методология изложения учебного материала, вместе с тем обеспечено довольно полное соответствие требованиям образовательного стандарта и примерных планов.

Содержание дисциплины разделено на семь частей и 44 функционально завершенных блока, которые раскрывают все дидактические единицы образовательной программы и могут использоваться как расширенные конспекты лекций. Для удобства систематизации учебного материала каждая глава снабжена выводами и контрольными вопросами.

В основу построения пособия положен информационный подход, в рамках которого приоритетны задачи получения, обработки, хранения, передачи информации и ее использования для практических нужд. При рассмотрении видов преобразований энергии подчеркиваются термодинамические аспекты протекающих при этом процессов.

Анализ функционирования электротехнических и электронных устройств проводится на основе изучения физического принципа действия, определяющего их свойства и возможности достижения поставленных технических целей. Особое внимание уделено рассмотрению первичных устройств преобразования информации и прин-

ципам построения исполнительных устройств как обратных преобразователей сигнал — действие.

Информационный подход определил и необходимость совмещенного изучения цепей постоянного и переменного тока. В качестве основной информационной структуры выбран сигнал в комплексном представлении, что и определило базовый метод расчета цепей. При изложении элементов теории электрических и магнитных цепей развитие методов расчета иллюстрируется их применением к однотипным электрическим объектам.

Некоторые разделы дисциплины, в частности элементы электромеханики, электронные и другие преобразователи в последующих учебных курсах практически не рассматриваются. Это определило необходимость их изложения с некоторым «запасом». Более прагматично, с выделением компетентных аспектов, освещается и применение электронных средств в задачах электротехники. В результате сформирована информационная база, полезная для учебного проектирования, а также научно-исследовательской и практической деятельности.

Широкое развитие программных продуктов, обеспечивающих решение большинства типовых электротехнических задач, позволило отказаться от ряда привычных расчетов. Вместе с тем, при рассмотрении передаточных функций и изучении переходных процессов, довольно широко использован MathCAD как удобный инструментальный математического моделирования, а зачастую и как графический редактор. Это позволило более наглядно иллюстрировать вопросы теории и оценивать их результаты в реальных технических приложениях.

Использованные подходы позволили в сравнительно небольшом объеме пособия сосредоточить основные сведения из электротехники и электроники, необходимые разработчикам электронной техники для успешного овладения специальностью. Поэтому книга может быть полезна не только при изучении электротехники и электроники, но и как справочное пособие для студентов старших курсов, аспирантов, инженеров.

При изложении использованы термины и определения по ГОСТ 52002 — 2003 и условные обозначения по ГОСТ 1494 — 77. Текст учебного пособия подготовлен в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32 — 2001 и ГОСТ 2.105 — 95. Графические материалы выполнены по ЕСКД и, в частности, электрические схемы оформлены по ГОСТ 2.702 — 75, элементы цифровой техники по ГОСТ 2.708 — 81, условные обозначения электрических элементов и устройств по ГОСТ 2.709 — 89, буквенно-цифровые обозначения по ГОСТ 2.710 — 81.

При написании учебного пособия работа между авторами была распределена следующим образом: предисловие, гл. 1 — 41 — Ю. Г. Подкин; гл. 42 — Ю. Г. Подкин, Ю. В. Данилов; гл. 43 — Т. Г. Чикуров; гл. 44 — Ю. Г. Подкин, Т. Г. Чикуров.

Автор приносит искреннюю благодарность рецензентам — сотрудникам Уральского государственного технического университета: заведующему кафедрой автоматики и управления в технических системах, д-ру техн. наук, профессору, академику Академии инженерных наук им. А.М.Прохорова В.Г.Лисиенко и заведующему кафедрой электротехники и электротехнологических систем, д-ру техн. наук, профессору Ф.Н.Сарапулову за полезные замечания, учтенные при подготовке учебного пособия.

Электрическая энергия все шире применяется во всех сферах хозяйственной деятельности человека. Производство электроэнергии традиционно основывается на преобразовании энергии внешних источников неэлектрической природы в электрическую. И хотя по-прежнему доминирует преобразование механической энергии в электрическую, постоянно растет роль альтернативных источников: солнечных батарей, химических источников тока, термоэлементов и т. д. Интенсивно развивается техническое обеспечение электроэнергетики. Однако темпы развития ее отдельных отраслей неодинаковы. Довольно быстро развиваются системы автоматизации производства электроэнергии, совершенствуются методы распределения на основе автоматизированных вычислительных систем, но наиболее интенсивно развивается сфера применения электроэнергии. Рост производства электроэнергии сопровождается усилением энергетического давления на экосистему Земли, поэтому многие новые научные разработки направлены на повышение эффективности применения электроэнергии.

Эффективность любого технического устройства определяется отношением полезного результата его работы к затратам на создание этого результата. Для электротехнических устройств, применяемых в хозяйственной деятельности и жизнеобеспечении человека, основным показателем эффективности служит коэффициент полезного действия (КПД). Мы не можем отказаться от систем автоматизации производства и быта, кондиционирования, информационного обеспечения, но снизить непроизводительный расход электроэнергии обязаны. Это означает, что при выборе вариантов реализации любого вновь создаваемого изделия, основанного на использовании электроэнергии, должен проводиться анализ с позиций КПД и приниматься решение, минимизирующее потери электроэнергии, даже если оно и менее экономичное.

Отсюда следует, что разработчик электротехнических и электронных средств должен знать разнообразные принципы действия, позволяющие создавать или компетентно выбирать наиболее эффективные устройства. Это требование влечет за собой изучение основных законов электротехники. Второй путь повышения эффективности основан на совершенствовании систем управления техническими

устройствами. Это направление требует изучения современных методов и средств получения, обработки и представления информации.

В системе знаний электротехника выступает как наука, связывающая теорию электромагнитных явлений с практикой создания техники. В общей электротехнике все виды взаимодействий электромагнитных полей сгруппированы в несколько классов. Векторы теории поля заменены более удобными для практики скалярными величинами: током, напряжением, потоком магнитной индукции и т.д. Большое внимание уделяется техническим приложениям. Разработаны формализованные методы расчета электрических и магнитных цепей на основе новых разделов математики, облегчающих компьютерное моделирование электротехнических и электронных устройств. Таким образом, общая электротехника в настоящее время представляет собой стройную систему сведений о свойствах физических сред, методах и средствах преобразования электромагнитных полей и создания разнообразных устройств, рассчитанную на широкое практическое применение.

Электроника изучает физические основы построения электронных и электровакуумных приборов, способы создания электронно-технических устройств с заданными свойствами, методы обработки информации. Устройство и функционирование полупроводниковых диодов, транзисторов, преобразователей, датчиков и оптических излучателей базируется на свойствах полупроводниковых материалов. Особое внимание уделяется вопросам миниатюризации электронных элементов, созданию их объединений — микросхем. Современная электроника ориентируется на изучение физических явлений, позволяющих создавать новые виды электронных элементов и приборов, совершенствовать приборы общего назначения и проектировать специализированные микросхемы, способные решать функционально законченные задачи. Так разработаны микросхемы радиоприемников, синтезаторов частот, импульсных преобразователей напряжения и т.д. Это направление интенсивно развивается.

Научный подход к задачам создания и производства новой техники на основе давно известных и вновь открываемых физических явлений позволяет создавать современные, экономичные, эффективные приборы и технологии. Чем обширнее знания специалиста о практических приложениях теории, тем легче ему выбрать оптимальные методы решения проектных и производственных задач, тем точнее окажутся модельные представления, шире спектр их применения и совершеннее практическая реализация.

В ряде случаев проверить теоретические расчеты и повысить наглядность при моделировании процессов, протекающих в схемах, позволяет использование компьютерных программ. В настоящее время наиболее широко используются программы Micro-Cap, Electronics Workbench, PSpice, Labview. Однако, несмотря на простоту

построения схем и возможность получения результатов в требуемой форме, при использовании этих программ исследователю не доступны сами вычислительные процессы, поэтому их применение наиболее оправдано в лабораторном практикуме и при проведении практических занятий. Теоретическое изучение электротехники требует применения программного продукта, язык общения которого ориентирован на математику, применяемую при изучении дисциплины, а средства визуализации обеспечивают требуемую наглядность. Кроме того, должна быть предоставлена возможность использования всех инструментов Windows. Этим требованиям отвечают MathCAD и MathLAB. Поскольку MathCAD имеет наиболее дружелюбный по отношению к пользователю интерфейс, именно эта система компьютерной математики взята за основу в данном учебном пособии.

РАЗДЕЛ I

ВИДЫ, СВОЙСТВА И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Электротехника как наука о техническом применении электромагнитных явлений и физических сред опирается на теорию электричества и магнетизма, современные знания о структуре и свойствах веществ и материалов и использование автоматизированных методов вычислений. Как техническая дисциплина электротехника оперирует четко установленными понятиями, определениями и терминами, регламентируемыми стандартами (ГОСТ Р 52002—2003; ГОСТ 1494—77; ГОСТ 2.730—73 и т. д.).

Электрической цепью называется совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока. Системы генерирования, передачи и использования электрической энергии проектируют на основе энергетических расчетов. В рамках информационного подхода рассматривается формирование, перенос, хранение и применение электрических сигналов.

Глава 1

Основные определения и топологические понятия теории электрических цепей

1.1. Основные понятия, обозначение величин и свойства элементов электрических цепей

Постоянное электрическое поле напряженностью \vec{E} (В/м), действующее в некоторой среде, создает между двумя произвольными точками 1 и 2, разнесенными в пространстве на расстояние l , определяемое радиус-векторами \vec{r}_1 и \vec{r}_2 , разность потенциалов

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E} d\vec{l} = U_{12}. \quad (1.1)$$

Эта разность потенциалов является скалярной величиной, называется *напряжением* и измеряется в вольтах (В).

Перенос заряда q в электрическом поле требует затрат энергии W на совершение работы

$$A = qU_{12}. \quad (1.2)$$

Следовательно, *напряжение* — это энергетическая характеристика, отражающая работу по перемещению заряда величиной в один кулон (Кл) между точками поля. В Международной системе единиц (СИ) работа и энергия измеряются в джоулях (Дж), поэтому вольт имеет размерность Дж/Кл. Все задачи, решаемые с использованием напряжения, относятся, по сути дела, к энергетическим расчетам, что удобно для практики, поскольку облегчает решение задач и интерпретацию результатов.

Источник поля, совершающий работу, теряет электрическую энергию. Если ее не возобновлять, то напряженность поля \vec{E} (см. формулу (1.1)) по мере совершения работы будет снижаться. Только возобновляемые источники способны за счет *сторонних сил* неэлектрической природы создавать постоянно действующее электрическое поле $E_{\text{стор}}$. Элементы или устройства, в которых происходит этот процесс, называют *источниками*, или *генераторами*, напряжения, а создаваемая ими разность потенциалов называется *электродвижущей силой* (ЭДС). В источнике ЭДС сторонняя сила пространственно разделяет положительные и отрицательные заряды, создавая разность потенциалов, определяемую по формуле (1.1) с заменой E на $E_{\text{стор}}$ (рис. 1.1). В дальнейшем именно ЭДС обозначается E , а использование этого символа для обозначения напряженности поля будет специально оговариваться.

Для постоянной во времени ЭДС можно записать:

$$E = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Переменная во времени или в функции иной величины ЭДС обозначается $e(t)$, $e(x)$ или e , например:

$$e(t) = \varphi_1(t) - \varphi_2(t) = e.$$

Условное обозначение источника напряжения приведено на рис. 1.1, *а*. Стрелка в кружке указывает, что сторонние силы смещают положительный заряд к точке 1, а отрицательный — к точке 2. Стрелка снаружи означает, что $\varphi_1 > \varphi_2$. Для сравнения на рис. 1.1, *б* приведено условное обозначение гальванического элемента, а на рис. 1.1, *в* — обозначение генератора, применяемое в функциональных схемах.

Электрическое поле способно создавать потоки заряженных частиц. Основная характеристика потока зарядов — *электрический ток*

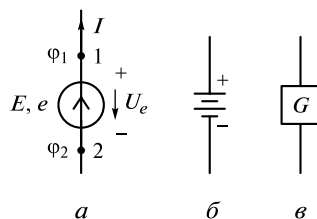


Рис. 1.1. Условные обозначения источников

$$I = dq/dt, \quad (1.3)$$

определяемый скоростью изменения заряда в проводнике или величиной заряда, прошедшего через проводник за секунду, и измеряется в амперах (А). Если ЭДС и скорость изменения зарядов не постоянны, то изменяется и ток. Переменный ток обозначается $i(t)$, $i(x)$, i .

Способность физической среды под действием постоянного электрического поля проводить ток характеризуется ее *электропроводностью* σ , которая измеряется в сименсах на метр (См/м). Материалы с высокой электропроводностью называются *проводниками*. В теории электрического поля электропроводность вводится как параметр связи плотности тока \vec{J} , измеряемой в амперах на метр (А/м²), с напряженностью поля

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}.$$

Это соотношение называется *законом Ома в дифференциальной форме*.

Кроме электропроводности каждый проводник или система проводников обладают еще тремя фундаментальными свойствами: они способны накапливать заряды, т. е. обладают электрической емкостью C , при протекании тока вокруг проводника возникает магнитное поле, а если ток переменный, на концах проводника создается ЭДС самоиндукции. Два последних свойства определяются индуктивностью проводника L . В протяженных проводниках электропроводность, емкость и индуктивность распределены по всей длине. Цепи такого вида называют *цепями с распределенными параметрами*. Но гораздо чаще в электротехнике используют элементы электрической цепи, у которых конструктивно одно из фундаментальных свойств выделено (доминирует), а другие существенно ослаблены. Такие элементы называют *элементами с сосредоточенными параметрами*, остальные параметры считаются распределенными. В современной радиотехнике и электронике отчетливо прослеживается тенденция освоения все более высоких частот, поэтому возрастает актуальность изучения цепей с распределенными параметрами.

1.2. Пассивные элементы электрических цепей

Пассивными называются электрические цепи, не содержащие источников энергии. Элементы пассивных цепей преобразуют электрическую энергию в другие виды, поэтому могут рассматриваться с точки зрения термодинамики как преобразователи энергии. Такое преобразование может быть обратимым и необратимым.

Если выбором материала и конструктивного оформления проводнику придана требуемая *проводимость* образуется *резистивный*

элемент (рис. 1.2). Проводимость резистивного элемента длиной l и сечением S определяется по формуле

$$G = \sigma S/l, \quad (1.4)$$

измеряется в сименсах (См), а его *сопротивление*

$$R = 1/G \quad (1.5)$$

измеряется в омах (Ом). Иногда для обозначений резистивных элементов используют символы r и g , что оговаривается особо.

Элемент электрической цепи, обладающий сосредоточенным сопротивлением и предназначенный для использования их сопротивления, называется *резистором* и обозначается R или r . Условные обозначения постоянного, переменного и полупеременного (подстроечного) резисторов приведены соответственно на рис. 1.3, $a \dots \text{в}$. Часто на условных обозначениях указывают проводимости резистора G или g . Прописные буквы для обозначения сопротивлений и проводимостей применяются обычно в цепях постоянного тока, строчные — в цепях переменного тока.

Электрический ток, протекающий через резистивный элемент, создает на нем разность потенциалов $U = \varphi_1 - \varphi_2 > 0$. Она называется напряжением на резистивном элементе или падением напряжения (не следует путать с термином «снижение, или уменьшение, напряжения») (рис. 1.4). Переменный ток создает переменное напряжение $u(t)$, $u(x)$, u . Напряжение на резистивном элементе и ток связаны законом Ома для участка цепи:

$$U = IR; u = iR; I = U/R; i = u/R. \quad (1.6)$$

Протекание электрического тока в резистивном элементе сопровождается переносом заряда. Из формулы (1.3) следует, что за интервал времени $t_1 \dots t_2$ через элемент протекает заряд

$$q = \int_{t_1}^{t_2} i dt,$$

при этом совершается работа, которая по формулам (1.2) и (1.3) записывается как

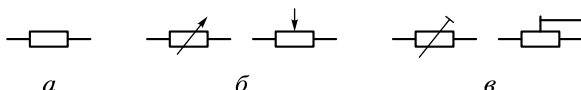


Рис. 1.2. Условное обозначение резистивного элемента

Рис. 1.3. Условные обозначения резисторов: a — постоянного; b — переменного; в — подстроечного