П. В. ЕРМУРАТСКИЙ, Г. П. ЛЫЧКИНА, Ю. Б. МИНКИН

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебник

Допущено Научно-методическим советом по электротехнике и электронике Министерства образования и науки Российской Федерации в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям 240100 – Химическая технология и биотехнология, 240700 – Биотехнологии, 221700 – Стандартизация и метрология, 280700 – Техносферная безопасность, 150100 – Материаловедение и технологии материалов бакалаврской подготовки.

ДМК ПРЕСС
издательство
Москва, 2011

УДК 621.38 (0 75.8)
ББК 31.2 Я73
Е749

Рецензенты: М.В.Немцов, д.т.н.,профессор кафедры электротехники НИЯУ МИФИ и Ю.Е. Бабичев, профессор кафедры электротехники МГГУ к.т.н., доцент

Е749 П.В. Ермуратский, Г.П. Лычкина, Ю.Б. Минкин
Электротехника и электроника. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 416 с.: ил.

ISBN 978-5-94074-688-1

Учебник состоит из трёх частей: «Линейные электрические цепи», «Нелинейные электрические цепи, электроника», «Электромагнитные и электромеханические устройства. Электрические измерения и приборы».

Рассмотрены основные понятия теории электротехники и электроники. Приведены анализ и методы расчета однофазных и трехфазных электрических цепей; нелинейных и магнитных цепей; переходных процессов в электрических цепях. Даны основы теории электрических трансформаторов и электрических машин, их основные характеристики. Рассмотрены элементная база современных электронных устройств, усилители электрических сигналов, источники питания, цифровые устройства и основы микропроцессорной техники.

Для студентов вузов неэлектротехнических специальностей, изучающих дисциплину «Электротехника и электроника».

Учебник

ЕРМУРАТСКИЙ Петр Васильевич
ЛЫЧКИНА Галина Прохоровна
МИНКИН Юрий Борисович

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Главный редактор *Мовчан Д. А.*
dm@dmk-press.ru
Корректор *Синяева Г. И.*
Верстка *Паранская Н. В.*
Дизайн обложки *Мовчан А. Г.*

Подписано в печать 07.02.2011. Формат 60×88 $^{1}/_{16}$.
Гарнитура «Ньютон». Печать офсетная.
Усл. печ. л. 25,48. Тираж 1000 экз. Заказ №

ISBN 978-5-94074-688-1

© П.В. Ермуратский, Г.П. Лычкина, Ю.Б. Минкин., 2011
© Оформление, издание, ДМК Пресс, 2011

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебник предназначен для изучения общепрофессиональной дисциплины «Электротехника и электроника», которая является федеральным компонентом Государственного образовательного стандарта ряда направлений бакалавриата, изучаемой студентами большинства неэлетротехнических вузов.

Учебник написан преподавателями кафедры «Электротехники, электроники и микропроцессорной техники» Московской государственной академии тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова, носящей имя Анатолия Владимировича Нетушила.

Авторы посвящают этот учебник 80-летнему юбилею кафедры, которая является одной из старейших в академии. Она была основана в 1930 г. как кафедра Электротехники для обеспечения инженерной подготовки студентов химических специальностей.

Зарождение и формирование новых научных направлений в области электротехники всегда находило отражение в читаемых кафедрой дисциплинах. Углублённое преподавание «Электроники» привело к переименованию кафедры в 1972 г. в кафедру «Электротехники и электроники».

С развитием вычислительной техники в стране кафедра организовала в институте внедрение в учебный и научный процесс вычислительной техники и стала называться с 1975 г. кафедрой «Электротехники, электроники и вычислительной техники». В 1985 г. из состава кафедры отделились Вычислительный центр института и вновь созданная кафедра Вычислительной математики и ЭВМ, которая с 1992 г. — кафедра Информационных технологий.

Интенсивное развитие микропроцессорной техники и внедрение её в учебный процесс привело в 1990 г. к переименованию кафедры в её современное название.

Кафедру возглавляли: доц. Золотарёв В.И. 1930 — 1937 гг.; проф. Круковский А.В. 1937 — 1940 гг.; проф. Телешев Б.А. 1940 — 1954 гг.; проф. Ясинский В.В. 1954 — 1972 гг.; проф. Нетушил А.В. 1972 — 1988 гг.;

проф. Ермуратский П.В. 1988 — 2008 гг.; доц. Минкин Ю.Б. 2008 — по настоящее время.

Большой вклад в развитие кафедры внес Анатолий Владимирович Нетушил — выдающийся, всемирно известный учёный, профессор, доктор технических наук, автор ряда учебников по Теоретическим основам электротехники (ТОЭ) и Теории автоматического управления (ТАУ), заслуженный деятель науки и техники РФ, действительный член Академии электротехнических наук РФ, почетный академик Международной академии информатизации, член редколлегии и руководитель теоретической секции журнала «Электричество», член редколлегии журналов «Известия ВУЗов — Электромеханика», «Известия ВУЗов —Радиоэлектроника», научно-методического сборника МИНВУЗа СССР «Электротехника». Он активно работал председателем экспертной комиссии Академии электротехнических наук.

Со времени создания научно-методического Совета по Электротехнике МИНВУЗа СССР А.В. Нетушил работал заместителем председателя научно-методического Совета по электротехнике Минобразования РФ, возглавлял секцию по изданию учебников и учебных пособий. Много сил и энергии отдавал разработке учебных планов и программ по электротехнике, компьютеризации учебного процесса.

Многолетний опыт преподавания дисциплины «Электротехника и электроника» в МИТХТ и ряде вузов страны был обобщён в выдержавшем 2 издания «Справочном пособии по основам электротехники и электроники», написанном сотрудниками кафедры под редакцией А.В. Нетушила.

Первое издание было опубликовано в 1986 г. в издательстве «Высшая школа» и было допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов неэлектротехнических специальностей вузов; второе издание вышло в свет в 1995 г. в издательстве Энергоатомиздат.

Изложение материала в читаемой на кафедре в течении двух семестров дисциплине «Электротехника и электроника» было ориентировано на математическое описание физических процессов, происходящих в электротехнических и электронных устройствах, применяемых в электрооборудовании химико-технологических производств.

С введением новых поколений стандартов наблюдается значительное сокращение числа часов, отводимых на изучение дисциплины «Электротехника и электроника».

В настоящее время выделяют 4 уровня подготовки бакалавров и специалистов неэлектротехнических направлений.

Уровни	1	2	3	4
Число часов	120 — 140	150 — 230	240 — 306	280 — 360

В 2008 г. авторами П.В. Ермуратским, Г.П. Лычкиной и Ю.Б. Минкиным было издано «Краткое учебное пособие по основам электротехники и электроники», предназначенное для студентов, изучающих дисциплину «Электротехника и электроника» на первом уровне, когда общее число часов, отводимых на подготовку бакалавров, менее 120 — 140 часов.

В данном учебнике авторы отошли от справочного характера изложения материала и основное внимание уделили доступности восприятия дисциплины студентами.

Учебник состоит из трех частей: «Линейные электрические цепи», «Нелинейные электрические цепи, электроника» и «Электромагнитные и электромеханические устройства. Электрические измерения и приборы».

В первой части рассматриваются основные принципы и методы расчетов электрических цепей постоянного, однофазного синусоидального и трёхфазного токов.

Во второй части анализируются устройства с нелинейными элементами: диодами, транзисторами, и принципы действия выпрямителей, стабилизаторов, усилителей, интегральных микросхем и микропроцессоров.

В третьей части рассматриваются принципы действия, математические модели, основные характеристики трансформаторов, машин постоянного и переменного токов, вопросы выбора двигателей для электропривода.

Приведены основные методы измерения и описания электроизмерительных приборов, расширен раздел, посвященный современным цифровым измерительным приборам.

К написанию учебника привлекались сотрудники кафедры: Закалюкин Р.М. §§ 6.21 и 7.3.1; Королёв Е.С. — §§ 6.4, 6.5, 11.6; Трофимов А.Н. и Перминов Д.А. §8.3. В редактировании рукописи активное участие принимала Гришина О.Ю.

Авторы исходили из того, что студенты, изучающие дисциплину «Электротехника и электроника» на первом уровне, должны знать основные законы, применяемые для анализа электрических цепей,

понимать принципы действия основных электротехнических и электронных устройств.

Методика изложения — единый подход к линейным электрическим устройствам как к двухполюсникам позволяет с применением принципа эквивалентного генератора строить их математические модели и по ним вести исследования аналитически или на моделях. Эта методика изложения позволяет вырабатывать у студента компетентный подход к различным электротехническим устройствам, развивает культуру мышления при обобщении и анализе реальных объектов исследования на моделях.

В соответствии с образовательными государственными стандартами III поколения материал изложен так, что даёт набор знаний, умений и навыков анализа электрических цепей и электрических устройств, доведённых до уровня компетенций, формулирующих способность самостоятельно применять их в практических ситуациях профессиональной деятельности.

Часть первая.
ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Глава первая. Линейные цепи постоянного тока

1.1. Электрическая цепь. Характеристики и схемы замещения
источников и приёмников (потребителей) электрической энергии 9
1.2. Законы Ома и Кирхгофа для линейной цепи 13
1.3. Граф схемы 19
1.4. Структурные преобразования схем замещения линейных цепей 21
1.5. Рационализация составления и решения
уравнений Кирхгофа: методы контурных токов,
узловых потенциалов, пропорциональных величин 26
1.6. Принципы суперпозиции, компенсации, взаимности 32
1.7. Мощность в цепи постоянного тока 35
1.8. Двухполюсники 36
1.9. Принцип эквивалентного генератора (активного двухполюсника) 37
1.10. Мощность, развиваемая активным двухполюсником 41
1.11. Применение принципа эквивалентного генератора
для анализа цепей измерительных приборов 42
1.12. Четырёхполюсники.
Уравнения и схемы замещения 45

Часть первая.

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Электрические цепи подразделяются на линейные и нелинейные.

При рассмотрении линейных цепей (часть 1) все процессы описываются линейными уравнениями. Методы расчета едины для цепей с источниками ЭДС постоянной, синусоидальной и более сложной формы — как при установившихся, так и при переходных процессах. Основой расчета токов и напряжений в цепях синусоидального тока является применение комплексных изображений синусоидальных функций времени. Основными принципами, на которых базируется исследование линейных цепей, являются принцип суперпозиции и принцип активного двухполюсника.

При анализе нелинейных цепей (часть 2) все процессы описываются нелинейными уравнениями; принцип суперпозиции неприменим, и для расчета процессов в цепях применяют графоаналитические и численные методы, а также приближенные методы (из-за сложности получения точных решений). Само понятие электрической цепи основывается на приближенном математическом описании процессов в реальном устройстве, при котором электрическое или магнитное поле предполагается сконцентрированным в локальной области. Математическое описание процесса сводится к составлению алгебраических и дифференциальных уравнений, связывающих интегральные величины: ток, напряжение, заряд, магнитный поток в сосредоточенном элементе цепи.

Для каждого реального (конкретного) элемента устройства вводят схему замещения, состоящую из идеальных (абстрактных) элементов с линейными и нелинейными параметрами; исследование ведут применительно к схеме замещения, составленной на основе уравнений, описывающих рассматриваемый элемент с определенной степенью приближения.

Глава первая.

ЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Электрическая цепь. Характеристики и схемы замещения источников и приёмников (потребителей) электрической энергии

Электрическая цепь — это совокупность устройств и объектов, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об электродвижущей силе, электрическом токе и электрическом напряжении.

Электродвижущая сила (ЭДС) $\boldsymbol{E}$ — скалярная величина, характеризующая способность сторонних сил и индуцированного электрического поля вызывать электрический ток.

Электрическое напряжение — это скалярная величина, характеризующая электрическое поле на рассматриваемом участке пути и равная разности потенциалов

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B.$$

Потенциал произвольной точки поля А φ_A соответствует работе, совершаемой силами поля по переносу единичного положительного заряда из данной точки в точку, потенциал которой равен нулю.

Электрический ток проводимости — это упорядоченное движение зарядов, он равен скорости изменения величины заряда $\boldsymbol{Q}$ через поперечное сечение проводника.

$$I = dQ/dt.$$

ЭДС, напряжение и потенциалы измеряются в вольтах (В).

Имя великого физика Италии Александра Вольта (1745 — 1827) было присвоено единице измерения в 1881 г. Международным конгрессом электриков в Париже в знак признания его заслуг как провозвестника эпохи электричества, установившего закон контактных напряжений, изобретшего «Вольтов столб» — источник электрического тока и давший возможность его практического применения.

Ток измеряется в амперах (А).

Она носит имя великого французского учёного Андре-Мари Ампера (1775 — 1836), внесшего большой вклад в изучение электромагнетизма и электросвязи. Это название единицы измерения было утверждено в 1893 г. на Международном конгрессе электриков в Чикаго.

Простейшая электрическая цепь состоит из источника *И* и приёмника *П* электрической энергии, соединенных проводами. Цепь может содержать ключ *К* для замыкания и размыкания цепи и измерительные приборы: амперметр *А* и вольтметры *V* для измерения тока и напряжения. Сопротивление амперметра мало и приближенно принимается равным нулю, сопротивление вольтметра велико и может быть принято равным бесконечности, если не оговорена необходимость учета их сопротивлений, рис. 1.1.

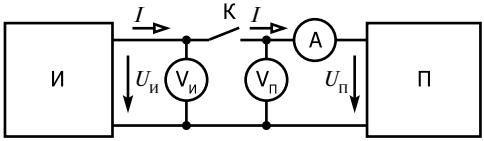


Рис. 1.1

В цепях постоянного тока напряжения и токи неизменны во времени. В приёмниках выбирают положительные направления тока *I* и напряжения *U* на схеме одинаковыми, а в источниках — противоположными. Направление действия ЭДС (от отрицательного вывода к положительному) указывается на схемах замещения элементов цепи стрелкой. Стрелки тока и напряжения показывают выбранные положительные направления этих величин, что необходимо учитывать при составлении уравнений, описывающих режим работы источников и приёмников. Примеры источников и приёмников приведены в таблице 1.1.

В источниках электрической энергии происходит преобразование различных видов энергии (химической, тепловой, механической, световой) в электрическую.

В приёмниках электрической энергии осуществляется преобразование электрической энергии в световую, механическую и другие виды.

Как видно из таблицы 1.1 на примере машины постоянного тока, в зависимости от того, какая энергия преобразуется, машина может быть быть источником (в генераторах механическая энергия вращения вала преобразуется в электрическую) и приёмником (в двигателе электрическая энергия преобразуется в механическую энергию).

Внешняя характеристика источника представляет собой зависимость напряжения на его выводах от тока. Внешнюю характеристику источника снимают, изменяя параметры приёмника, а приёмника — изменяя параметры источника.