

М.П. Батура А.П. Кузнецов А.П. Курулев

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

М.П. Батура А.П. Кузнецов А.П. Курулёв

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Утверждено
Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебника
для студентов учреждений высшего образования
по направлениям специальностей
«Радиоэлектронная техника»,
«Компоненты оборудования», «Связь»

Под общей редакцией
кандидата технических наук,
доцента А.П. Курулёва

3-е издание, переработанное



Минск
«Вышэйшая школа»
2015

УДК 621.3.011.7(075.8)
ББК 31.279я73
Б28

Рецензенты: кафедра электротехники и систем электропитания Военной академии Республики Беларусь; профессор кафедры информационно-измерительной техники и технологий Белорусского национального технического университета доктор технических наук, профессор *А.Л. Жарин*

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства.

Батура, М.П.

Б28 Теория электрических цепей : учебник / М. П. Батура, А. П. Кузнецов, А. П. Курулёв ; под общ. ред. А. П. Курулёва. – 3-е изд., перераб. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 606 с. : ил.

ISBN 978-985-06-2562-5.

Рассматриваются электромагнитные процессы в линейных электрических цепях. Описываются резонансные явления в последовательных и параллельных колебательных контурах, в системе связанных контуров. Излагаются основы четырехполосников и электрических фильтров, методы анализа переходных процессов в линейных цепях, методы анализа электрических цепей с распределенными параметрами, основы синтеза линейных электрических цепей.

Предыдущее издание вышло в 2007 г.

Для студентов учреждений высшего образования по направлениям специальностей «Радиоэлектронная техника», «Компоненты оборудования», «Связь». Может служить руководством для инженерно-технических работников, повышающих свой уровень знаний.

УДК 621.3.011.7(075.8)
ББК 31.279я73

ISBN 978-985-06-2562-5

© Батура М.П., Кузнецов А.П.,
Курулёв А.П., 2004
© Батура М.П., Кузнецов А.П., Курулёв А.П., 2015,
с изменениями
© Оформление. УП «Издательство “Вышэйшая
школа”», 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

Понимание принципов функционирования электрорадиотехнической, микро- и нанoeлектронной аппаратуры в современном производстве и сфере услуг основывается на знании теории электрических цепей.

Данный учебник предназначен для студентов учреждений высшего образования по техническим специальностям, изучающих дисциплины ОТЭЦ (основы теории электрических цепей), ТЭЦ (теория электрических цепей), ТЛЭЦ (теория линейных электрических цепей), ТОЭ (теоретические основы электротехники), ТЭРЦ (теория электрорадиотехнических цепей), «Электротехника».

Учебник, написанный на базе лекций, читаемых авторами в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники, дважды издавался (в 2004 и 2007 гг.) и востребован в учреждениях высшего образования Республики Беларусь и стран ближнего зарубежья. Это обстоятельство предопределило публикацию третьего издания. В нем полностью сохранена структура учебника предыдущих двух изданий, внесены исправления, часть материала переработана, обновлен список рекомендуемой литературы.

В учебнике приведены сведения о линейных электрических цепях постоянного и синусоидального токов, цепях с индуктивной связью, колебательных контурах, трехфазных электрических цепях, четырехполюсниках и фильтрах, цепях периодического несинусоидального тока. Дается анализ переходных процессов в электрических цепях классическим, операторным и спектральным методами. В соответствии с типовым учебным планом по дисциплине «Теория электрических цепей» в учебник включены основы синтеза линейных электрических цепей, а также методы анализа линейных активных цепей, длинных линий, нелинейных электрических цепей. Материал глав 1–7 базируется на знании таких разделов физики, как электричество и магнетизм, колебания и волны; из курса высшей математики необходимо знать основы дифференциального и интегрального исчисления, теорию комплексной переменной. Для эффективного усвоения материала остальных глав требуется знать матричный анализ (гл. 9, 19, 20), основы операционного исчисления (гл. 14), методы решения

дифференциальных уравнений (гл. 12, 15, 17), интегралы Дюамеля (гл. 13), ряды и интегралы Фурье (гл. 16), свойства полинома Гурвица, теорию вычетов, правила деления полинома на полином (гл. 18).

Теория электрических цепей является фундаментальной для изучения таких дисциплин, как «Радиотехнические цепи и сигналы», «Усилительные устройства», «Радиопередающие и радиоприемные устройства», «Основы автоматики», «Системы автоматического управления», «Основы радиолокации» и др.

За содействие улучшению содержания учебника авторы выражают глубокую благодарность рецензентам – коллективу кафедры электротехники и систем электропитания Военной академии Республики Беларусь (особенно кандидату технических наук, доценту А.Н. Малашину) и доктору технических наук, профессору кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии» Белорусского национального технического университета А.Л. Жарину, а также сотрудникам Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники доктору технических наук, профессору Л.Ю. Шилину, кандидатам технических наук, доцентам И.Л. Свито, В.М. Коваленко, И.И. Петровскому.

Все отзывы и пожелания просим направлять по адресу: издательство «Вышэйшая школа», пр. Победителей, 11, 220048, Минск.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Теория электрических цепей как наука посвящена решению задач анализа и синтеза электрических цепей, схем и устройств и является важнейшим инструментом, широко используемым в электротехнике и радиоэлектронике. К электрическим цепям относятся технические устройства самого разнообразного назначения. Там, где речь идет об электрическом токе или электрическом напряжении, имеют дело с электрической цепью.

Формирование теории электрических цепей началось с открытия законов Ома (1826) и Кирхгофа (1845), изобретения трансформатора П.Н. Яблочковым (1876), радио А.С. Поповым (1895), триода Л. де Ворестом (1906). Сотрудники Нижегородской радиолaborатории (1918) во главе с профессором М.А. Бонч-Бруевичем внесли большой вклад в развитие радиотехники. Р. Фостером (1924) и В. Кауэрмом (1926) была сформулирована методика решения задач синтеза цепей.

В 40-е годы прошлого столетия весомые теоретические исследования в области теории электрических цепей были выполнены профессорами В.И. Коваленковым, П.Е. Акульшиным, И.А. Кошечевым, Н.А. Баевым и др. В 50-е годы в работах Г.Е. Пухова, В.А. Гафта, В.П. Сигорского, А.Ф. Белецкого было положено начало решению задач радиоэлектроники. В 60 – 70-е годы появление вычислительной техники дало толчок стремительному развитию микроэлектроники. Примерно в эти же годы получила развитие теория синтеза электрических цепей в трудах П.Л. Чебышева, Е.И. Золотарева, А.А. Ляпунова, Л.В. Конторовича, Е.Я. Ремеза, А.Л. Маркова, С.Н. Бернштейна, Е.В. Зеляха, В.Н. Листова, М.Г. Цимбальского и др. К фундаментальным работам в области электро- и радиотехники относятся также труды академиков Ю.Б. Кобзарева, В.А. Котельникова, В.Ф. Миткевича, Л.И. Мандельштама, Н.Д. Папалекси, членов-корреспондентов К.А. Круга, В.И. Сидорова и др.

Главные задачи, решаемые в теории электрических цепей, могут быть подразделены на две группы: анализ и синтез.

Задачей анализа является исследование процессов, протекающих в цепи с заданной структурой при известных параметрах ее элементов. Первым шагом в анализе электрической цепи является ее представление с помощью математической модели в идеализированной форме. Такая идеализация является одной из характерных черт научного метода теории цепей. При этом реальная электрическая цепь представляется экви-

валентной цепью, состоящей из идеализированных элементов. Процессы в эквивалентной электрической цепи описываются с помощью интегро-дифференциальных уравнений, решение которых выражает реакцию (отклик) анализируемой цепи на входные воздействия при заданных начальных условиях. Таким образом, методы теории цепей включают: составление эквивалентной идеализированной цепи, соответствующей реальному устройству; составление и решение уравнений состояния цепи; приведение полученных результатов в соответствие с анализируемой реальной цепью.

Задача синтеза заключается в отыскании структуры цепи и параметров ее элементов, при которых процессы в ней будут подчиняться заданным закономерностям. Синтез является задачей более сложной, чем анализ, поскольку предполагает решение оптимизационной задачи, в которой заданные требования выполняются, например, при минимальном числе элементов электрической цепи или при ее предельно низкой стоимости. Первый этап при решении задачи синтеза линейных электрических цепей с сосредоточенными параметрами – аппроксимация характеристик цепи рациональными функциями. Этот этап относится к области математики и авторами не рассматривается. Второй этап, заключающийся в физической реализации рациональных функций, рассмотрен подробно с примерами для двухполюсников и четырехполюсников.

Впервые разложение функции в тригонометрические ряды применили Бернулли, Эйлер и Фурье. Метод Фурье стал классическим для решения волновых уравнений и позднее телеграфных уравнений, используемых для описания процессов в длинных линиях. В связи с бурным развитием в XX в. радиотехники, радиотелефонии, телевидения, навигации, радиолокации и других отраслей техники, опирающихся на теорию колебаний, спектральный способ описания физических процессов в электрических цепях распространился весьма широко.

В заключительной главе изложены общие сведения о нелинейных элементах, аппроксимации их характеристик, методах расчета нелинейных цепей, переходных процессах и преобразовании спектров в них. Особенности характеристик нелинейных элементов, с одной стороны, затрудняют расчет и исследование нелинейных цепей, а с другой – позволяют производить такие преобразования сигналов, осуществление которых невозможно в линейных цепях. В качестве иллюстрации рассмотрено использование свойств нелинейных элементов при конструировании автогенераторов незатухающих колебаний.

1. УСТАНОВИВШИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ

1.1. Определения, характеристики, классификация электрических цепей и их элементов

Электрической цепью называется совокупность элементов и устройств, образующих путь для электрического тока, электромагнитные процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об электродвижущей силе (ЭДС), токе и напряжении.

Элемент электрической цепи – отдельное устройство, входящее в состав электрической цепи и выполняющее в ней определенную функцию. К числу основных элементов электрической цепи относятся резистор, катушка индуктивности и конденсатор. Каждый из этих элементов предназначен для использования соответственно его электрического сопротивления, индуктивности и емкости.

Основной формой представления электрической цепи является графическая – с помощью схемы. *Схема электрической цепи* – это графическое изображение цепи, содержащее условные обозначения ее элементов и показывающее их соединение.

Реальные электро- и радиотехнические цепи и устройства достаточно сложны. Чтобы облегчить изучение протекающих в них электромагнитных процессов, эти цепи заменяют эквивалентными. Теория цепей основывается на анализе и синтезе эквивалентных электрических цепей. *Эквивалентная электрическая цепь* – это идеализированная модель реальной электрической цепи, представленная совокупностью *идеализированных элементов*. Каждый из элементов этой цепи является условным идеализированным представлением элемента реальной цепи. Понятие идеализированного элемента цепи непосредственно связано с вполне определенным математическим

соотношением, которое существует между током и напряжением, действующим на его зажимах. В дальнейшем для простоты под терминами «электрическая цепь» и «элемент цепи» будем подразумевать эквивалентную цепь и ее идеализированный элемент.

Пассивные элементы – это элементы электрической цепи, в которых рассеивается или накапливается энергия. К числу пассивных элементов относятся резистивный, индуктивный и емкостный элементы, т.е. сопротивление, емкость и индуктивность.

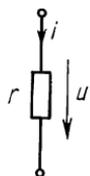


Рис. 1.1

Сопротивление r – элемент цепи, в котором происходит только необратимое преобразование электрической энергии в тепловую. Ток и напряжение на его зажимах (рис. 1.1) связаны пропорциональными зависимостями:

$$u = ri; \quad r = u/i.$$

Величина, обратная сопротивлению, называется *проводимостью*:

$$g = 1/r; \quad g = i/u.$$

Сопротивление r измеряется в омах (Ом), а проводимость g – в сименсах (См). Часто сопротивление и проводимость называют активным сопротивлением и активной проводимостью. Термин «активное» указывает на связь с активной мощностью.



Рис. 1.2

Индуктивность L – элемент цепи, в магнитном поле которого происходит обратимое накопление энергии. Сила тока и напряжение на его зажимах (рис. 1.2) связаны через дифференцирование:

$$u_L = L di/dt.$$

При прохождении тока i через катушку индуктивности с числом витков W в ней возникает магнитный поток Φ .

Потокосцеплением Ψ катушки индуктивности называют произведение потока Φ и числа витков W :

$$\Psi = W\Phi.$$

Индуктивность L определяется отношением потокоцепления самоиндукции Ψ к току, проходящему через катушку:

$$L = \Psi/i.$$

Индуктивность измеряется в генри (Гн).

Емкость C – элемент цепи, в электрическом поле которого происходит обратимое накопление энергии. Ток и напряжение на его зажимах (рис. 1.3) связаны через интегрирование:

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt.$$

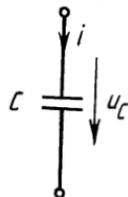


Рис. 1.3

На емкостном элементе накапливается заряд q , величина которого пропорциональна напряжению на зажимах элемента. Емкость позволяет выразить заряд через напряжение; ее значение определяется отношением заряда к напряжению:

$$q = Cu_C; C = q/u_C.$$

Емкость измеряется в фарадах (Ф).

Идеализированные элементы цепи – сопротивление r , индуктивность L , емкость C – отражают основные свойства и параметры соответственно резисторов, катушек индуктивности и конденсаторов. Однако резистор, например, обладает емкостью и индуктивностью, значения которых зависят от его конструктивного исполнения, и при определенных условиях их необходимо учитывать. Это же относится и к катушке индуктивности, которая обладает собственными сопротивлением и емкостью, учитывающими соответственно потери энергии в обмотке и сердечнике и межвитковые емкости. Для конденсатора характерны индуктивности выводов и потери энергии в диэлектрике, что определяет в конечном счете его собственные сопротивление и индуктивность.

С помощью идеализированных элементов r , L и C можно составить эквивалентные схемы резисторов (рис. 1.4, а), катушек индуктивности (рис. 1.4, б) и конденсаторов (рис. 1.4, в), учитывающие их дополнительные свойства и параметры. Параметры таких схем определяют экспериментальным или расчетным путем.

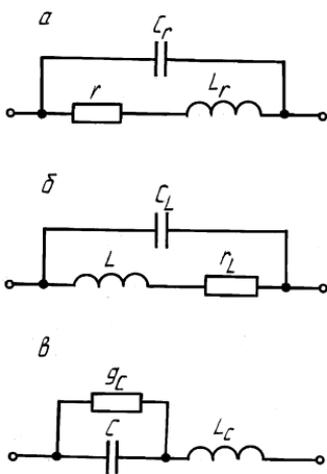


Рис. 1.4

Пассивные элементы могут быть линейными и нелинейными, с постоянными и переменными параметрами. Рассмотренные выше идеализированные элементы r , L и C являются линейными элементами с постоянными параметрами.

Линейными элементами называются элементы цепи, параметры которых не зависят от приложенного к ним напряжения и проходящего через них тока. Если параметры элементов зависят от значения или направления действующего напряжения и силы проходящего тока, то их называют *нелинейными* (рис. 1.5). Примерами нелинейных элементов могут служить полупроводниковые и электронные приборы, катушки индуктивности с ферромагнитными сердечниками и др.

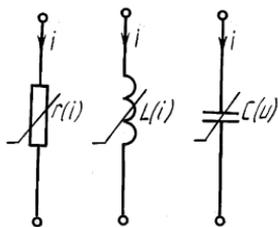


Рис. 1.5

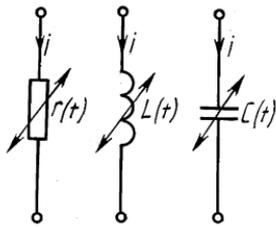


Рис. 1.6

Элементы с постоянными параметрами — это линейные элементы, параметры которых не зависят от времени. Элементы цепи, параметры которых меняются во времени по определенному закону, называются *элементами с переменными параметрами* (рис. 1.6).

Активные элементы — это источники энергии. Различают источники ЭДС или напряжения и источники тока.

Идеальный источник ЭДС – источник электрической энергии, напряжение на зажимах которого не зависит от силы проходящего через него тока (рис. 1.7, а). При замыкании идеального источника ЭДС через него проходит бесконечно большой ток, так как его внутреннее сопротивление равно нулю. В реальных источниках ЭДС сила тока короткого замыкания имеет конечное значение, поскольку такие источники характеризуются наличием конечного внутреннего сопротивления $r_{вн}$ (рис. 1.7, б).

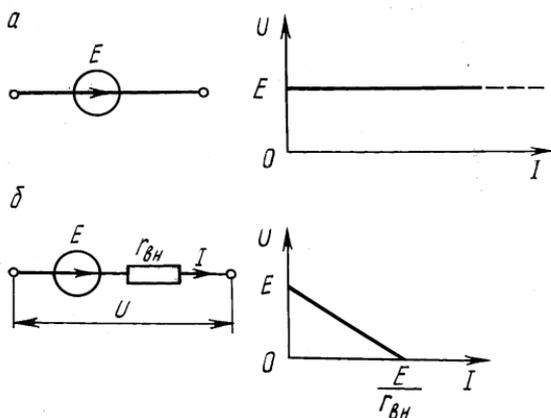


Рис. 1.7

Идеальный источник тока – это источник электрической энергии, сила тока которого не зависит от напряжения на его зажимах (рис. 1.8, а). При разомкнутых зажимах идеального источника тока напряжение на них достигает бесконечно большого значения. В реальных источниках тока напряжение холостого хода на их зажимах имеет конечное значение, поскольку такие источники характеризуются конечным внутренним сопротивлением $r_{вн} = 1/g_{вн}$ (рис. 1.8, б).

Рассмотренные источники ЭДС и тока являются *независимыми (автономными)*.

Зависимыми, или неавтономными, источниками ЭДС (тока) называются источники электрической энергии, напряжение (сила тока) которых зависит от значений напряжения или силы тока, действующего, например, на входе источника ЭДС (рис. 1.9).

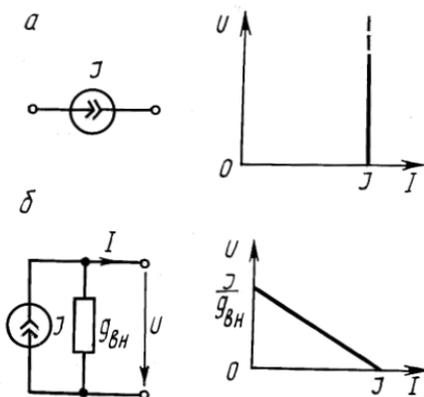


Рис. 1.8

Классификация электрических цепей осуществляется в соответствии с характером элементов, из которых состоит цепь, и уравнений, которыми она описывается.

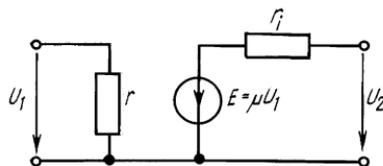


Рис. 1.9

Различают цепи пассивные и активные, линейные и нелинейные, цепи с постоянными и переменными, сосредоточенными и распределенными параметрами.

Пассивная цепь — это электрическая цепь, не содержащая источников электрической энергии. Если цепь содержит хотя бы один источник энергии, она называется *активной*.

Линейная цепь не содержит нелинейных элементов. Если цепь содержит хотя бы один нелинейный элемент, она называется *нелинейной*. Если же в ее состав входят элементы с переменными параметрами, то она называется *цепью с переменными параметрами* или *параметрической цепью*. Такие цепи в общем случае описываются соответственно линейными или нелинейными дифференциальными уравнениями с постоянными либо переменными коэффициентами.

Следует отметить, что, строго говоря, все реальные цепи являются нелинейными. Однако при определенной идеализации, в рамках допустимых на практике приближений, многие реальные цепи можно считать линейными. Это позволяет значительно упростить расчеты, применив к ним теорию линейных цепей.

В зависимости от соотношения геометрических размеров l реальной электрической цепи и длины волны λ электромагнитных колебаний, воздействующих на цепь, различают *цепи с сосредоточенными параметрами* ($l \ll \lambda$) и *с распределенными параметрами* ($l \gg \lambda$). Четкой границы нет. В электрической цепи с сосредоточенными параметрами все сопротивления, индуктивности и емкости считаются сосредоточенными на отдельных ее участках. В электрической цепи с распределенными параметрами сопротивления, индуктивности и емкости распределены вдоль цепи. Примером такой цепи может служить длинная линия связи.

1.2. Понятие о дуальности.

Дуальные элементы и цепи

Условие дуальности заключается в том, что закон изменения токов в одной цепи подобен закону изменения напряжений в другой цепи. Две цепи называются *дуальными*, если уравнение для напряжений одной из них можно выразить через уравнение для токов другой цепи. Дуальными являются, например, сопротивление и проводимость, индуктивность и емкость, источник ЭДС и источник тока (рис. 1.10).

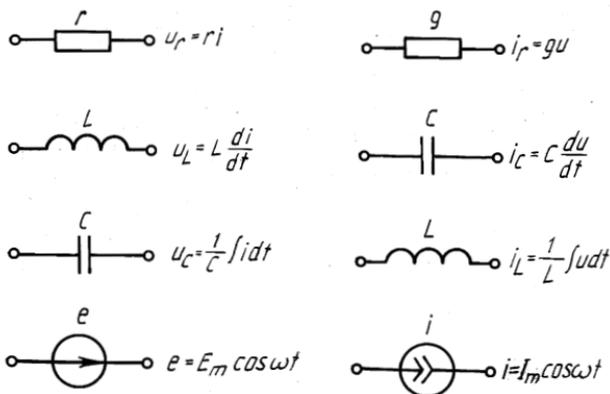


Рис. 1.10

При последовательном соединении элементов (рис. 1.11, *a*) суммируются напряжения, при параллельном (рис. 1.11, *б*) – токи, поэтому последовательному соединению дуально параллельное, и наоборот. Если, например, последовательное соединение элементов r , L , C заменить параллельным соединением дуальных им элементов g , C , L , то это и будут дуальные цепи (рис. 1.11, *б*).

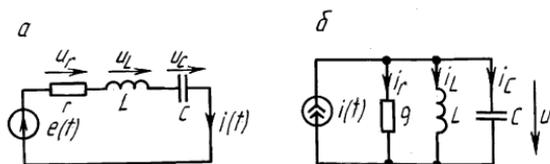


Рис. 1.11

Уравнение для напряжений последовательной цепи соответствует уравнению для токов параллельной цепи. Току i в первом случае соответствует напряжение u во втором.

Принцип дуальности часто используется при анализе и синтезе цепей.

1.3. Элементы топологии цепей

При расчете и анализе электрической цепи важную роль играет изучение и учет ее геометрической структуры, геометрического образа цепи. Они основаны на топологии. *Топология* – раздел математики, в котором исследуются геометрические свойства фигур, не зависящие от их размеров и прямолинейности. К числу основных геометрических топологических понятий, используемых в теории цепей, относятся ветвь, узел, контур, граф.

Ветвь – участок электрической цепи, состоящий из одного или нескольких последовательно соединенных элементов, через которые в любой момент времени проходит один и тот же ток.

Узел электрической цепи – место соединения ее ветвей. На схемах узлы изображаются точкой.

Контуром электрической цепи называют любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям.

Топологические свойства линейной электрической цепи изучают путем замены всех ее элементов линиями. Если на схеме цепи (рис. 1.12, а) все узлы заменить точками, а ветви — линиями, то получится остов, который называется топологическим *графом цепи* (рис. 1.12, б). Граф цепи — это такое изображение схемы цепи, на котором все узлы заменены точками, а ветви — линиями.

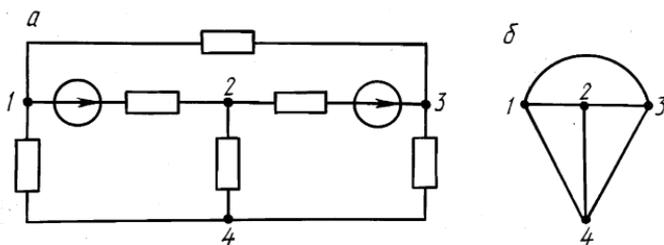


Рис. 1.12

Узел графа — точка соединения трех и более ветвей. *Ветвь графа* — это ветвь схемы цепи, вырожденная в линию. Ветвь графа образуется из ветвей цепи, содержащей такие элементы, как сопротивление, индуктивность или емкость. Но ветвь, в которую включены лишь идеальные источники энергии, не образует ветви на графе. Обратим внимание на особенности учета источников энергии при построении графа. Перед построением графа цепи каждый идеальный источник тока заменяется разрывом его ветви, а идеальный источник ЭДС — коротким замыканием его зажимов. Объясняется это тем, что внутреннее сопротивление таких источников энергии равно бесконечности или нулю соответственно, а это эквивалентно разрыву либо замыканию ветви (рис. 1.13).

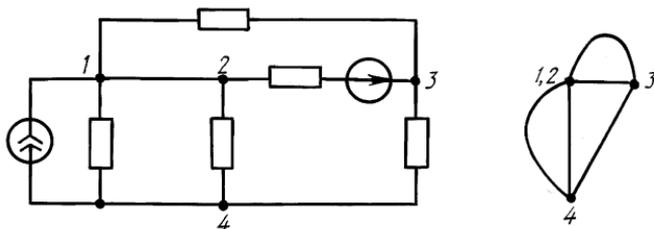


Рис. 1.13

Важными понятиями в топологии цепей являются дерево графа и связь графа.

Дерево графа – любая совокупность ветвей графа, соединяющих все его узлы без образования контуров. Так как узлы графа можно, не образуя контуров, соединить линиями по-разному, каждому графу соответствует несколько различных деревьев (например, как это показано сплошными линиями на рис. 1.14). Число ветвей на дереве графа на единицу меньше числа соединяемых ими узлов. *Независимыми* называются все узлы схемы, которые образуют соответствующие узлы на ее графе, исключая один из них (любой). Число независимых узлов равно числу ветвей на дереве графа.

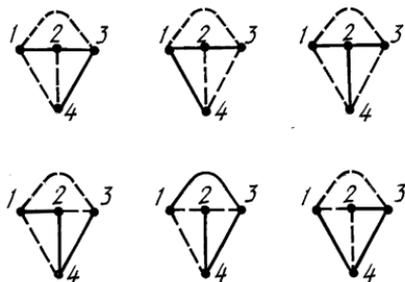


Рис. 1.14

Связь (хорда) графа – это ветвь графа, не принадлежащая его дереву. На рис. 1.14 связи графа показаны штриховыми линиями. При дополнении дерева графа хордой на графе образуется контур. Каждый из этих контуров называется *независимым*. Число независимых контуров равно числу хорд на графе. Например, цепи, приведенные на рис. 1.12 и 1.13, имеют три независимых контура (по числу связей графа).

Часто на ветвях графа стрелками указывают направления. Такой граф становится направленным. Ориентация обычно соответствует принятым направлениям токов и напряжений, действующих в цепи. *Направленный граф* схемы – это граф с указанием условно-положительных направлений токов или напряжений в виде отрезков со стрелками.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие элементы электрической цепи относят к пассивным?
2. Какие зависимости связывают ток и напряжение на пассивных элементах электрической цепи?

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
I. УСТАНОВИВШИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ	7
1. Основные понятия и определения теории цепей	7
1.1. Определения, характеристики, классификация электрических цепей и их элементов	7
1.2. Понятие о дуальности. Дуальные элементы и цепи	13
1.3. Элементы топологии цепей	14
Контрольные вопросы и задания	16
2. Линейные электрические цепи постоянного тока	17
2.1. Закон Ома и законы Кирхгофа для цепей постоянного тока	17
2.2. Баланс мощностей в цепях постоянного тока	21
2.3. Эквивалентные преобразования схем электрических цепей	22
2.4. Метод уравнений Кирхгофа	29
2.5. Метод контурных токов	32
2.6. Метод наложения	39
2.7. Метод узловых потенциалов	41
2.8. Метод эквивалентного генератора	47
2.9. Теорема компенсации	50
2.10. Принцип взаимности	51
2.11. Рекомендации по выбору оптимального метода расчета электрических цепей	53
Контрольные вопросы и задания	54
3. Линейные электрические цепи гармонического тока	55
3.1. Основные характеристики гармонического тока	55
3.2. Представление гармонического тока проекциями вращающегося вектора. Векторная диаграмма	59
3.3. Представление гармонического тока с помощью комплексных величин	61
3.4. Комплексные сопротивления и проводимости. Закон Ома и законы Кирхгофа в комплексной форме	64
3.5. Цепи гармонического тока с одним пассивным элементом	66
3.6. Цепь синусоидального тока с последовательным соединением элементов r , L и C	70
3.7. Мощность в цепи синусоидального тока	73
3.8. Цепь синусоидального тока с параллельным соединением элементов r , L и C	77
3.9. Обобщение методов расчета цепей постоянного тока на цепи гармонического тока	80
Контрольные вопросы и задания	88
4. Цепи с индуктивной связью	89
4.1. Индуктивная связь. Степень связи и коэффициент связи	89
4.2. Согласное и встречное включение катушек индуктивности	91
4.3. Последовательное соединение индуктивно связанных катушек	92
4.4. Параллельное соединение индуктивно связанных катушек	94
4.5. Трансформатор без магнитопровода	96
Контрольные вопросы и задания	102
5. Резонансные явления в последовательном колебательном контуре	102
5.1. Виды частотных характеристик электрических цепей	102
5.2. Частотные характеристики rC - и rL -цепей	109
5.3. Последовательный колебательный контур	114
5.4. Частотные характеристики последовательного колебательного контура	116
Контрольные вопросы и задания	127
6. Резонансные явления в параллельном колебательном контуре	128
6.1. Параметры параллельного колебательного контура	128
6.2. Частотные характеристики простого параллельного контура	132
6.3. Сложные параллельные колебательные контуры	135
Контрольные вопросы и задания	141
7. Резонанс в системе связанных колебательных контуров	142
7.1. Виды связи между контурами	142
7.2. Эквивалентные схемы индуктивно связанных контуров	144

7.3. Настройка системы двух индуктивно связанных контуров	148
7.4. Частотные характеристики индуктивно связанных контуров	154
7.5. Полоса пропускания индуктивно связанных контуров	157
Контрольные вопросы и задания	160
8. Трехфазные электрические цепи	160
8.1. Параметры трехфазной цепи	160
8.2. Соотношения линейных и фазных значений токов и напряжений в трех- фазных цепях	163
8.3. Мощность трехфазного тока	165
Контрольные вопросы и задания	169
9. Основы теории четырехполюсников	170
9.1. Определения и классификация четырехполюсников	170
9.2. Уравнения и схемы замещения четырехполюсников	172
9.3. Способы определения параметров четырехполюсников	182
9.4. Комплексные входные и передаточные функции четырехполюсников	184
9.5. Характеристические и рабочие параметры четырехполюсников	188
9.6. Уравнения четырехполюсника в гиперболических функциях	192
9.7. Основные виды соединений четырехполюсников. Матричные уравнения	193
9.8. Обратная связь в четырехполюсниках	200
9.9. Влияние обратной связи на коэффициент усиления цепи и его стабиль- ность	204
9.10. Влияние обратной связи на характеристики цепи	206
Контрольные вопросы и задания	209
10. Электрические фильтры	209
10.1. Общие сведения об электрических фильтрах	209
10.2. Характеристические параметры, полосы пропускания и затухания	212
10.3. Фильтры нижних частот типа k	216
10.4. Преобразование частоты. Фильтры верхних частот	219
10.5. Полосовые фильтры	223
10.6. Заграждающие фильтры	226
10.7. Понятие о фильтрах типа m	229
10.8. Фильтры типа rC	235
10.9. Мостовые фильтры	236
10.10. Пьезоэлектрические фильтры	239
Контрольные вопросы и задания	241
11. Цепи периодического несинусоидального тока	242
11.1. Тригонометрическая форма ряда Фурье	242
11.2. Условия симметрии и коэффициенты ряда Фурье	246
11.3. Перенос начала отсчета	250
11.4. Комплексная форма ряда Фурье	252
11.5. Применение ряда Фурье для расчета периодического несинусоидального процесса	253
11.6. Действующее и среднее значения периодической несинусоидальной функции	256
11.7. Мощность в цепи периодического несинусоидального тока	258
11.8. Коэффициенты, характеризующие периодические несинусоидальные функции	259
Контрольные вопросы и задания	261
II. НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОРАДИОЦЕПЯХ	262
12. Классический метод анализа переходных процессов в линейных электрических цепях с сосредоточенными параметрами	262
12.1. Общие сведения о переходных процессах в электрических цепях и классическом методе их анализа	262
12.2. Переходные процессы в неразветвленных цепях первого порядка с источником постоянного напряжения	270
12.2.1. Свободные токи и напряжения в цепях первого порядка	270
12.2.2. Анализ переходных процессов в цепях первого порядка	274
12.2.3. Переходные процессы при скачкообразном изменении схемы цепи	277
12.3. Переходные процессы в неразветвленных цепях первого порядка с источником синусоидального напряжения	278
12.4. Переходные процессы в разветвленных цепях первого порядка	284

12.5. Анализ переходных процессов в разветвленных цепях первого порядка без составления дифференциального уравнения	286
12.6. Переходные процессы в неразветвленных цепях второго порядка	287
12.6.1. Свободные процессы в цепях второго порядка	287
12.6.2. Параметры свободных колебаний	295
12.6.3. Подключение rLC -цепи к источнику постоянного напряжения	298
12.6.4. Подключение rLC - цепи к источнику синусоидального напряжения	301
12.7. Переходные процессы в разветвленных цепях второго порядка	304
Контрольные вопросы и задания	305
13. Анализ переходных процессов в линейных электрических цепях методом наложения	306
13.1. Принцип наложения в теории переходных процессов	306
13.2. Типовые функции воздействия	307
13.3. Временные характеристики электрических цепей	311
13.4. Определение реакции цепи на воздействие произвольной формы с помощью временных характеристик	316
13.4.1. Определение реакции цепи на воздействие произвольной формы с помощью переходной характеристики цепи	316
13.4.2. Определение реакции цепи на воздействие произвольной формы с помощью импульсной характеристики цепи	323
Контрольные вопросы и задания	326
14. Операторный метод анализа переходных процессов в линейных электрических цепях	327
14.1. Основные положения и теоремы операционного исчисления	327
14.2. Законы Ома и Кирхгофа в операторной форме	331
14.3. Операторные передаточные функции электрической цепи и их связь с комплексными передаточными функциями и временными характеристиками	337
Контрольные вопросы и задания	344
15. Расчет переходных процессов в линейных электрических цепях методом переменных состояния	344
15.1. Суть метода переменных состояния	344
15.2. Формирование уравнений переменных состояния	347
15.3. Решение уравнений переменных состояния	351
Контрольные вопросы и задания	359
16. Частотный метод анализа переходных процессов в цепях с сосредоточенными параметрами	360
16.1. Спектры периодических сигналов	360
16.2. Спектры непериодических сигналов	380
16.3. Спектры модулированных сигналов	395
16.4. Спектральный метод анализа прохождения сигналов через линейные электрические цепи	420
Контрольные вопросы и задания	436
17. Цепи с распределенными параметрами	437
17.1. Первичные параметры однородной линии	437
17.2. Дифференциальные уравнения однородной линии	440
17.3. Периодический режим в однородной линии	442
17.4. Вторичные параметры однородной линии	450
17.5. Линия без искажений	455
17.6. Линия без потерь	458
17.7. Режимы работы линии без потерь. Стоячие волны	459
17.8. Входное сопротивление линии	466
17.9. Мощность линии без потерь	470
17.10. Переходные процессы в цепях с распределенными параметрами	472
17.11. Исследование переходных процессов в цепях с распределенными параметрами с помощью преобразования Лапласа	477
Контрольные вопросы и задания	479
18. Основы синтеза линейных электрических цепей	480
18.1. Задача синтеза электрических цепей	480
18.2. Свойства операторных передаточных функций линейных электрических цепей	481
18.3. Свойства полинома Гурвица	485
18.4. Минимально-фазовые и неминимально-фазовые цепи	489

18.5. Свойства операторных входных функций линейных электрических цепей	493
18.6. Входные операторные функции реактивных двухполюсников. Реактансные функции	494
18.7. Виды операторных входных сопротивлений и проводимостей	496
18.8. Реализация реактивных двухполюсников путем разложения их входных операторных функций на простые дроби (метод Фостера)	498
18.9. Реализация реактивных двухполюсников путем представления их входных операторных функций в виде цепной дроби (метод Кауэра)	504
18.10. Реализация двухполюсников типа RC	510
18.11. Понятие о реализации двухполюсников общего типа	517
18.12. Нормирование параметров элементов электрических цепей	520
18.13. Синтез четырехполюсников	522
18.13.1. Реализация четырехполюсников в виде мостовых схем	522
18.13.2. Реализация лестничных четырехполюсников, нагруженных резисторами с одной из сторон	524
18.13.3. Реализация лестничных реактивных четырехполюсников, нагруженных резисторами с двух сторон	530
18.13.4. Реализация четырехполюсников типа rC	534
18.14. Задача аппроксимации при синтезе электрических цепей	541
Контрольные вопросы и задания	544
19. Анализ линейных активных цепей.	544
19.1. Эквивалентные схемы активных цепей	544
19.2. Матричный метод анализа	550
19.3. Сигнальные графы и их применение для расчета электронных схем	560
19.4. Имитация индуктивности с помощью активной rC -цепи	566
Контрольные вопросы и задания	571
20. Анализ нелинейных электрических цепей.	572
20.1. Свойства нелинейных цепей	572
20.2. Методы расчета нелинейных электрических цепей	574
20.3. Преобразование спектров сигналов в нелинейных электрических цепях	583
20.3.1. Умножение частоты	583
20.3.2. Преобразование частоты	587
20.3.3. Модуляция	589
20.3.4. Детектирование	590
20.4. Переходные процессы в нелинейных цепях	593
Контрольные вопросы и задания	601
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	602

Учебное издание

Батура Михаил Павлович
Кузнецов Александр Петрович
Курулёв Александр Петрович

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Учебник

3-е издание, переработанное

Редактор *Е.В. Малышева*. Художественный редактор *В.А. Ярошевич*.
Технический редактор *Н.А. Лебедевич*. Корректоры *Т.К. Хваль, Е.З. Липень*.
Компьютерная верстка *Ю.Л. Шибяевой*.

Подписано в печать 12.05.2015. Формат 84×108/32. Бумага офсетная. Гарнитура «Ньютон».
Офсетная печать. Усл. печ. л. 31,92. Уч.-изд. л. 29,92. Тираж 500 экз. Заказ 951.

Республиканское унитарное предприятие «Издательство “Высэйшая школа”».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/3 от 08.07.2013.

Пр. Победителей, 11, 220048, Минск.

e-mail: market@vshph.com <http://vshph.com>

Открытое акционерное общество «Красная звезда».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя и
распространителя печатных изданий № 2/7 от 28.10.2013.

Юридический адрес: пер. 1-й Загородный, 3, 220073, Минск.

Почтовый адрес: ул. Советская, 80, 225409, Барановичи.