

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

З. В. Зайцева, Н. К. Логвинова,
В. В. Сергеев, Д. В. Шушпанов

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Часть 1

КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Разделы 1 и 2

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

СПб ГУТ)))

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2018

УДК 621.3.011.7(078.5)
ББК 32.88-01я73
3-17

Рецензенты:
доктор технических наук,
профессор кафедры электроники и схемотехники СПбГУТ
В. А. Филин,
доктор технических наук,
профессор кафедры теоретических основ электротехники
СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова-Ленина
Е. Б. Соловьева

*Утверждено редакционно-издательским советом СПбГУТ
в качестве учебного пособия*

Зайцева, З. В.

3-17 Теория электрических цепей. Часть 1. Контрольно-измерительные материалы. Разделы 1 и 2 : учебное пособие / З. В. Зайцева, Н. К. Логвинова, В. В. Сергеев, Д. В. Шушпанов ; СПбГУТ. – СПб., 2018. – 56 с.

Содержит теоретический материал в виде алгоритмов, формул, определений, тесты и методические указания по их выполнению, контрольные вопросы, литературу по дисциплинам «Теория электрических цепей. Часть 1», «Электротехника и электроника».

Предназначено для повышения эффективности дистанционного обучения с использованием виртуальной обучающей среды «Moodle», для организации самостоятельной работы студентов очной и вечерней форм обучения по направлениям 10.03.01 «Радиотехника», 10.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника», 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика», 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 27.03.01 «Стандартизация и метрология», 27.03.04 «Управление в технических системах», а также при подготовке специалистов по специальности 11.05.04 «Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи».

**УДК 621.3.011.7(078.5)
ББК 32.88-01я73**

© Зайцева З. В., Логвинова Н. К., Сергеев В. В.,
Шушпанов Д. В., 2018

© Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ЗАКОНЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ	6
1.1. Определение электрической цепи. Понятия тока, напряжения, мощности и энергии	6
1.2. Элементы электрических цепей и их свойства	7
1.3. Законы Кирхгофа	12
1.4. Последовательное соединение элементов ЭЦ	13
1.5. Параллельное соединение элементов ЭЦ	15
Тесты	16
Контрольные вопросы	26
2. МЕТОДЫ АНАЛИЗА РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ В РЕЖИМЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА	27
2.1. Метод эквивалентных преобразований	27
2.2. Метод наложения	28
2.3. Метод токов ветвей	31
2.4. Метод узловых напряжений	33
2.5. Метод контурных токов	36
2.6. Метод эквивалентного генератора	38
2.7. Теорема замещения. Теорема взаимности	41
Тесты	43
Контрольные вопросы	54
Список литературы	55

ВВЕДЕНИЕ

Предназначено для студентов, обучающихся по дисциплинам «Теория электрических цепей. Часть 1», «Электротехника и электроника» и подготовлено в соответствии с действующей программой.

Учебное пособие разработано в целях повышения эффективности дистанционного обучения с использованием виртуальной обучающей среды «Moodle».

Контрольно-измерительные материалы могут использоваться студентами очной и вечерней форм обучения для организации самостоятельной работы над указанными выше дисциплинами и углубленного их изучения. Для этого в университете обеспечен доступ студентов к обучающей среде «Moodle» в кафедральных компьютерных классах.

Учебное пособие дает возможность студенту в удобном для него формате времени и места проработать и усвоить теоретический материал, который позволит грамотно ответить на вопросы тестов в режиме контроля и получить лучшие результаты.

В данном пособии представлены разделы 1 и 2 первой части дисциплины ТЭЦ, где рассматриваются основные понятия, определения и законы теории электрических цепей (ЭЦ), методы анализа резистивных ЭЦ в режиме постоянного тока.

Каждый раздел состоит из теоретической части, контрольно-измерительных материалов в форме тестов и контрольных вопросов.

Теоретический материал приведен в сжатой форме и частично для наглядности представлен таблицами, содержащими схемы, временные и векторные диаграммы, формулы расчета параметров и характеристик ЭЦ.

Для всех методов анализа ЭЦ приведены алгоритмы расчета цепей. В каждом разделе показаны примеры решения типовых задач, которые помогут студенту выполнить тестовые задания.

Контрольные тесты составлены из вопросов и ответов с учетом специфики изучаемого раздела и содержат не только текстовый материал, но и схемы ЭЦ, формулы, временные, векторные диаграммы и графики.

На каждый вопрос теста даны 4 варианта ответа. Форма ответа – выборочная: а, б, в, г, однако правильным может быть не только один ответ, но и несколько. При этом на правильность конструируемого ответа не влияет порядок ввода букв, обозначающих правильные ответы.

Форма ответов различна:

- текстовый материал в виде определений, законов, теорем;
- формулы расчета параметров и характеристик ЭЦ;
- математические выражения законов, функций, уравнений;
- числовые значения искомых величин, которые должны быть получены в результате выполнения нескольких этапов решения задач;

- графики и диаграммы;
- схемы ЭЦ.

Количество тестов варьируется от 39 до 42 в зависимости от объема изучаемого в разделе материала.

Каждый раздел заканчивается контрольными вопросами. При подготовке к ответам на них студент может оценить свой уровень знаний и степень подготовленности как к текущему, так и к итоговому контролю – теоретическому зачету.

При организации дистанционного обучения в институте непрерывного образования в целях более детального изучения учебного материала первый раздел дисциплины разбит на пять, а второй – на семь подразделов.

При работе в виртуальной обучающей среде «Moodle» в режиме обучения студент может выбрать любой раздел (подраздел) в соответствии с рабочей программой, представленной на сайте университета. В программе имеется тренировочный режим сдачи тестов, где не выставляется итоговая оценка, но показываются результаты ответов на каждый тест с демонстрацией правильного ответа. При такой форме работы с программой имеются ограничения на количество попыток студента.

Данное учебное пособие позволит студенту детально проработать учебный материал без каких-либо временных ограничений, проверить свои знания на компьютере в режиме обучения и, получив хорошие результаты, перейти в режим контроля.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ЗАКОНЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Определение электрической цепи. Понятия тока, напряжения, мощности и энергии. Элементы электрических цепей и их свойства. Законы Кирхгофа. Последовательное соединение элементов ЭЦ. Параллельное соединение элементов ЭЦ.

1.1. Определение электрической цепи.

Понятия тока, напряжения, мощности и энергии

Электрической цепью называется электромагнитная система, состоящая из преобразователей энергии, электромагнитные процессы в которой целесообразно описывать с помощью понятий «электрический ток» и «электрическое напряжение».

Под электрическим током в проводниках понимают упорядоченное движение электрических зарядов. Мерой тока является скалярная величина, представляющая собой количество электрического заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника в единицу времени, т. е. скорость изменения заряда: $i(t) = \frac{dq}{dt} (A)$.

Току приписывается произвольно выбранное положительное направление, указываемое стрелкой. Поскольку протекание тока, т. е. перемещение зарядов, связано с преобразованием энергии, то для его оценки вводится другая скалярная величина – напряжение. Под электрическим напряжением понимают количество энергии, затрачиваемой на перемещение единичного заряда из одной точки в другую:

$$u(t) = dW(t)/dq,$$

где $W(t)$ – энергия (Дж).

Если физические размеры цепи не играют роли, то напряжение между точками a и b определяется также как разность потенциалов этих точек: $u_{ab}(t) = \varphi_a - \varphi_b$. Напряжение измеряется в вольтах (В). Положительное направление напряжения выбирается произвольно и обозначается знаками «+» и «-». Знаком «+» помечается тот зажим цепи, из потенциала которого вычитается потенциал другого зажима цепи.

Условимся называть согласным такой выбор положительных направлений напряжения и тока, при котором стрелка тока ориентирована от зажима, помеченного знаком «+», в сторону другого зажима цепи (рис. 1.1, *a*), и встречным – в противном случае (рис. 1.1, *б*).

Значение напряжения и тока в данный момент времени называется мгновенным значением.

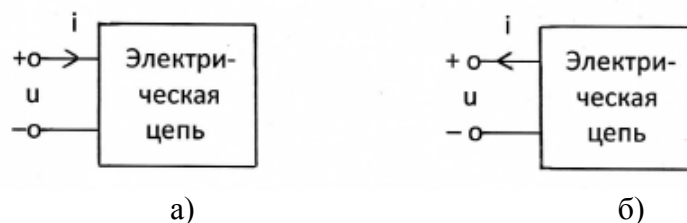


Рис. 1.1

Скорость изменения энергии в цепи представляет собой мгновенную мощность $p(t)$, которая измеряется в ваттах (Вт):

$$p(t) = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u(t) \cdot i(t).$$

При согласном выборе положительных направлений напряжения и тока $p > 0$, значит, цепь потребляет энергию, если $p < 0$, цепь отдает энергию (энергия цепи убывает).

1.2. Элементы электрических цепей и их свойства

Под элементом электрической цепи понимают идеализированное устройство, отображающее какое-либо одно из свойств реальной электромагнитной системы. Различают пассивные и активные элементы.

Линейные пассивные элементы

Резистивное сопротивление – такой элемент электрической цепи, который отображает свойство электромагнитного поля рассеивать энергию. Графическое изображение линейного элемента показано на рис. 1.2, а. Свойства резистивного сопротивления полностью определяются его вольт-амперной характеристикой – зависимостью тока i_R от подведенного напряжения u_R .

На рис. 1.2, б приведен график вольт-амперной характеристики линейного резистивного сопротивления, представляющий собой графическую иллюстрацию закона Ома.

Для резистивного сопротивления при согласном выборе положительных направлений напряжения и тока

$$u_R = R \cdot i_R \text{ или } i_R = G \cdot u_R,$$

что является математической записью закона Ома. Постоянные коэффициенты R и $G = 1/R$, количественно характеризующие элемент, называются сопротивлением и проводимостью элемента и измеряются соответственно в омах (Ом) и сименсах (См).

Индуктивность – такой элемент электрической цепи, который отображает свойство поля запастись энергией в виде энергии магнитного поля. Условное графическое изображение элемента индуктивности приведено на рис. 1.2, в. Между напряжением u_L , приложенным к элементу, и током i_L , проходящим через элемент, при согласном выборе их положительных направлений существует соотношение

$$u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt}.$$

Энергия, запасенная в индуктивности, $W = \frac{L \cdot i_L^2}{2}$. Постоянный коэффициент L , количественно характеризующий элемент, т. е. его параметр, называется, как и элемент, индуктивностью и измеряется в генри (Гн).

Емкость – элемент электрической цепи, отображающий свойство поля запастись энергией в виде энергии электрического поля (рис. 1.2, г). При согласном выборе положительных направлений напряжения u_C на зажимах элемента и тока i_C , проходящего через элемент, имеем

$$i_C = C \cdot \frac{du_C}{dt}.$$

Энергия, запасенная в емкости, $W = \frac{C \cdot u_C^2}{2}$. Постоянный коэффициент C , количественно характеризующий элемент, т. е. его параметр, называется емкостью и измеряется в фарадах (Ф).

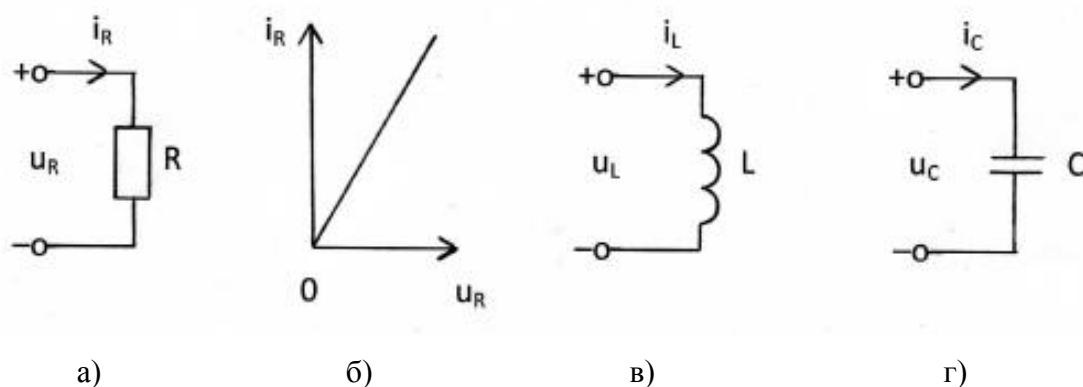


Рис. 1.2

Активные элементы

Идеализация свойств реальных генераторов приводит к двум разновидностям активных элементов электрических цепей: источникам напряжений и источникам тока. Существуют независимые и зависимые источники.

Независимым источником напряжения называется такой активный элемент, у которого напряжение на выходных зажимах $u_0(t)$ не зависит от свойств цепи, являющейся внешней по отношению к источнику. Напряжение $u_0(t)$ называется задающим напряжением источника.

Независимым источником тока называется такой активный элемент, для которого ток, проходящий через его внешние зажимы $i_0(t)$, не зависит от свойств цепи, внешней по отношению к источнику. Этот ток $i_0(t)$ называют задающим током источника.

Условные графические изображения независимых источника напряжения (ИН) и источника тока (ИТ) приведены на рис. 1.3, а и 1.3, б.

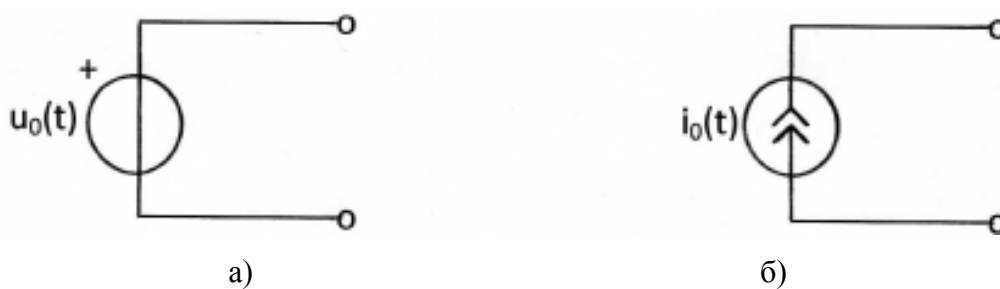


Рис. 1.3

При $u_0(t) = 0$ зажимы, к которым подключен источник напряжения, оказываются, соединенными между собой накоротко (рис. 1.4, а). При $i_0(t) = 0$ ветвь цепи, которую образует источник тока, оказывается разомкнутой (рис. 1.4, б).

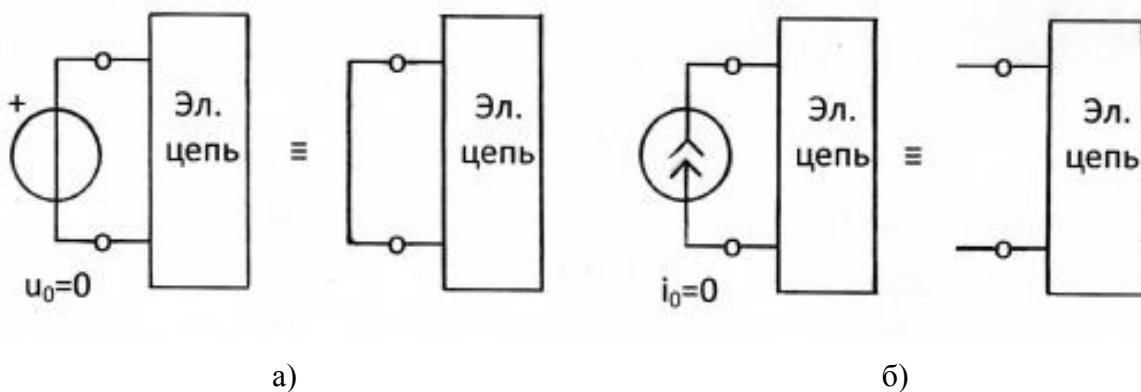


Рис. 1.4

Следовательно, можно считать, что источник напряжения имеет нулевое внутреннее сопротивление, а источник тока имеет бесконечно большое внутреннее сопротивление или нулевую внутреннюю проводимость.

Две схемы замещения генераторов с резистивным внутренним сопротивлением приведены на рис. 1.5.

Устройства, которые вносят в цепь электрическую энергию, называются генераторами. Они представляют собой преобразователи энергии из одного вида в другой. В простейших случаях рассматриваются две схемы замещения генератора с резистивным внутренним сопротивлением: генератор напряжения (рис. 1.5, а) и генератор тока (рис. 1.5, б).

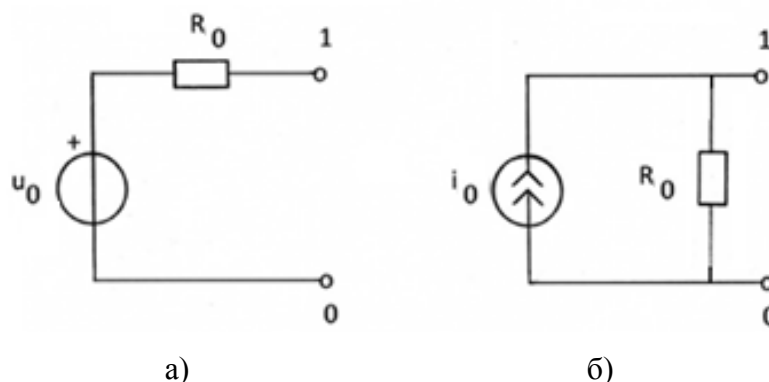


Рис. 1.5

Если значения внутренних сопротивлений генераторов одинаковы и равны R_0 , а задающее напряжение генератора напряжения связано с задающим током генератора тока соотношением $u_0 = i_0 \cdot R_0$, то генераторы напряжения и тока считаются эквивалентными, т. е. на их зажимах создаются одинаковые напряжения и проходят одинаковые токи при подключении внешней цепи.

Вольт-амперная характеристика генератора напряжения приведена на рис. 1.6, а, а генератора тока – на рис. 1.6, б.

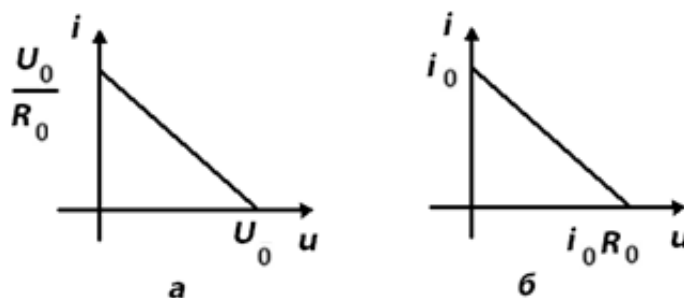


Рис. 1.6

В рассматриваемых цепях (рис. 1.5) внутреннее сопротивление генератора $R_0 = u_0/i_0$, т. е. равно отношению напряжения на разомкнутых зажимах генератора u_0 к току, проходящему через его замкнутые накоротко зажимы i_0 .

Понятие о зависимых источниках является результатом идеализации свойств реальных усилителей.

Зависимый или управляемый источник напряжения (тока) представляет собой элемент электрической цепи с двумя парами внешних зажимов, причем задающее напряжение (или задающий ток) на выходной паре его зажимов определяется напряжением или током, подведенным к другой (управляющей) паре его зажимов.

Различают четыре типа зависимых источников: источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН); источник напряжения, управляемый током (ИНУТ); источник тока, управляемый напряжением (ИТУН); источник тока, управляемый током (ИТУТ).

Условные графические изображения зависимых источников и характеризующие их соотношения приведены на рис. 1.7. Коэффициенты k , r , g , β являются вещественными числами.

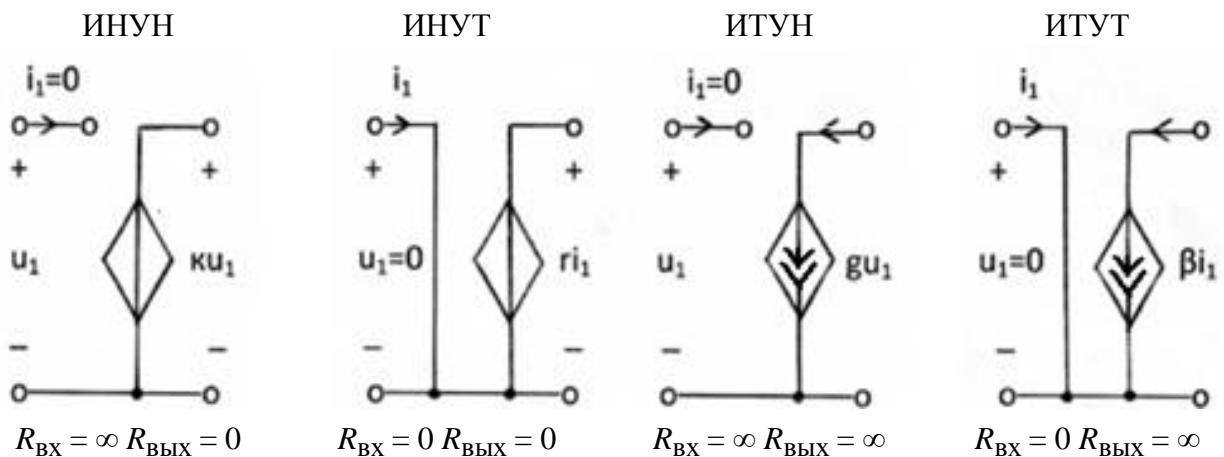


Рис. 1.7

При анализе колебаний в реальной линейной электрической цепи она заменяется некоторой идеализированной цепью из того или иного числа рассмотренных выше элементов, т. е. моделью этой цепи.

Графическое изображение модели называют схемой замещения цепи, или просто схемой. Простейшей моделью резистора является резистивное сопротивление, конденсатора – емкость, катушки индуктивности – индуктивность. Их схемные изображения показаны на рис. 1.2.

В качестве усилительных элементов линейных цепей часто используют операционные усилители (ОУ). Операционный усилитель – это модульный многокаскадный усилитель с дифференциальным входом (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Наименование элемента	Схемное изображение в стандартных программах для ПК	Схемы замещения
Дифференциальный операционный усилитель		
Инверсный операционный усилитель		
Усилитель с конечным усилением		
Инверсный усилитель с конечным усилением		
Усилитель – повторитель напряжения		

1.3. Законы Кирхгофа

В основе методов анализа электрических цепей лежат законы Кирхгофа. Они верны для любых электрических цепей: как линейных, так и нелинейных.

Первый закон Кирхгофа гласит: алгебраическая сумма токов в ветвях, сходящихся к любому узлу электрической цепи, тождественно равна нулю.

Узел (сложный) – место соединения трех и более ветвей. Ветвь – участок цепи с одинаковым током между двумя узлами.

Согласно этому закону, если к некоторому узлу цепи подсоединено n ветвей с токами i_1, i_2, \dots, i_n , то в любой момент

$$\sum_{k=1}^n \alpha_k i_k = 0,$$

где $\alpha_k = 1$, если выбранное или заданное положительное направления тока i_k ориентировано от узла, и $\alpha_k = -1$ в противном случае.

Если цепь содержит N_y узлов, то для токов в ее ветвях, пользуясь первым законом Кирхгофа, можно составить $N_y - 1$ линейно-независимых уравнений.

Первый закон Кирхгофа часто называют законом токов Кирхгофа и сокращенно обозначают ЗТК.

Второй закон Кирхгофа формулируется следующим образом: алгебраическая сумма напряжений на зажимах ветвей в любом контуре цепи тождественно равна нулю. Контуром называется замкнутый путь из последовательности ветвей и узлов.

В соответствии с этим законом, если в контур входят m ветвей с напряжениями u_1, u_2, \dots, u_m , то в любой момент

$$\sum_{k=1}^m \beta_k u_k = 0,$$

где $\beta_k = 1$ или $\beta_k = -1$ в зависимости от соотношения между направлением обхода контура и выбранным или заданным положительным направлением напряжения ветви u_k . Условимся считать $\beta_k = +1$, если при обходе контура первым встречается зажим u_k , помеченный знаком «+», и $\beta_k = -1$ в противном случае.

Используя второй закон Кирхгофа, можно составить $N_v - N_y + 1$ линейно-независимых уравнений. При наличии в цепи источников тока количество независимых уравнений по второму закону Кирхгофа уменьшается на число источников тока $N_{ИТ}$, так как токи в этих ветвях известны и рассчитываются по формуле $N_v - N_y + 1 - N_{ИТ}$.

Второй закон Кирхгофа часто называют законом напряжений Кирхгофа и сокращенно обозначают ЗНК.

1.4. Последовательное соединение элементов ЭЦ

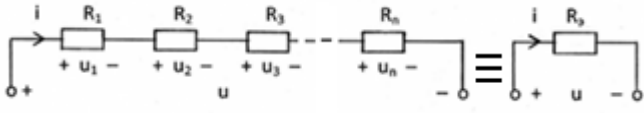
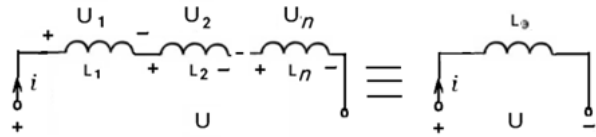
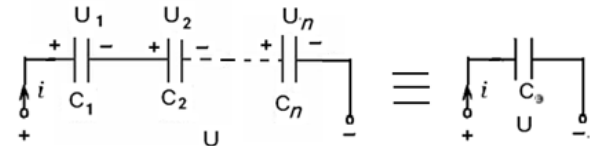
Последовательным соединением элементов называется такое, при котором через все элементы проходит один и тот же ток.

Для последовательного соединения пассивных элементов, используя второй закон Кирхгофа

$$U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n - U = 0,$$

можно вывести формулы для расчета эквивалентных параметров элементов электрической цепи (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Последовательное соединение	Формулы расчета
<p>Резистивные сопротивления</p>  $U_R = i_R \cdot R$	$R_3 = \sum_{k=1}^n R_k,$ <p>где n – число последовательно соединенных элементов. Если $R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_n = R$, то $R_3 = n \cdot R$</p>
<p>Индуктивности</p>  $U_L = L \cdot \frac{di_L}{dt}$	$L_3 = \sum_{k=1}^n L_k,$ <p>где n – число последовательно соединенных индуктивностей. Если $L_1 = L_2 = L_3 = \dots = L_n = L$, то $L_3 = n \cdot L$</p>
<p>Емкости</p>  $U_C = \frac{1}{C} \cdot \int i_C dt$	$\frac{1}{C_3} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{C_k},$ <p>где n – число последовательно соединенных емкостей. Если $C_1 = C_2 = C_3 = \dots = C_n = C$, то $C_3 = \frac{C}{n}$</p>

Последовательное соединение источников напряжения (рис. 1.8) в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно заменить одним эквивалентным источником напряжения U_0 , задающее напряжение которого равно алгебраической сумме источников, входящих в последовательное соединение

$$U_0 = U_1 - U_2 + U_3.$$

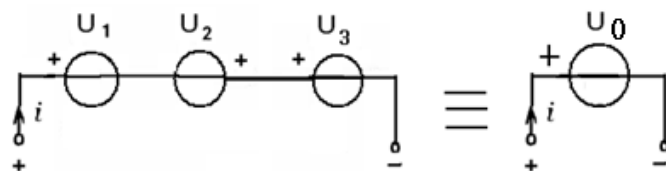


Рис. 1.8

Со знаком плюс берутся задающие напряжения, совпадающие по направлению с задающим напряжением эквивалентного источника, а со знаком минус – не совпадающие.

1.5. Параллельное соединение элементов ЭЦ

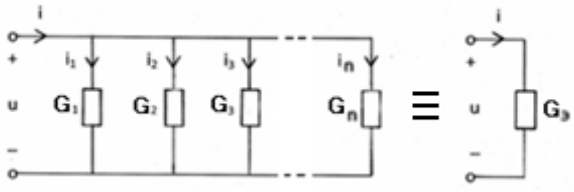
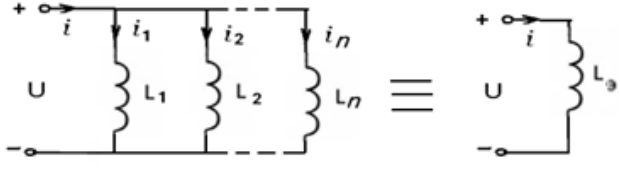
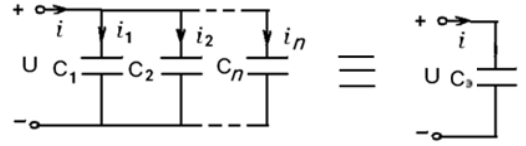
Параллельным соединением элементов называется такое, при котором ко всем элементам приложено одно и то же напряжение.

Для параллельного соединения пассивных элементов, используя первый закон Кирхгофа

$$-i + i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_n = 0,$$

можно вывести формулы для расчета эквивалентных параметров элементов электрической цепи (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Параллельное соединение	Формулы расчета
<p>Резистивные сопротивления</p>  <p style="text-align: center;">$i = U \cdot G$</p>	$G_3 = \sum_{k=1}^n G_k,$ <p>где n – число параллельно соединенных резистивных сопротивлений. Если $G_1 = G_2 = G_3 = \dots = G_n = G$, то $G_3 = n \cdot G, R_3 = \frac{R}{n}$</p>
<p>Индуктивности</p>  <p style="text-align: center;">$i_L = \frac{1}{L} \cdot \int U_l dt$</p>	$\frac{1}{L_3} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{L_k},$ <p>где n – число параллельно соединенных индуктивностей. Если $L_1 = L_2 = L_3 = \dots = L_n = L$, то $L_3 = \frac{L}{n}$</p>
<p>Емкости</p>  <p style="text-align: center;">$i_C = C \cdot \frac{dU_C}{dt}$</p>	$C_3 = \sum_{k=1}^n C_k,$ <p>где n – число параллельно соединенных емкостей. Если $C_1 = C_2 = C_3 = \dots = C_n = C$, то $C_3 = n \cdot C$</p>

При параллельном соединении двух резистивных сопротивлений (рис. 1.9) их эквивалентное сопротивление $R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$.

Определим токи i_1 и i_2 :

$$U_{12} = i_0 \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}; \quad i_1 = \frac{U_{12}}{R_1}; \quad i_2 = \frac{U_{12}}{R_2}.$$

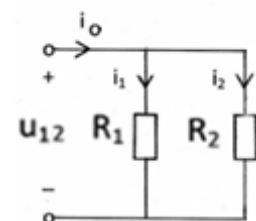


Рис. 1.9

После подстановки U_{12} в формулы для расчета токов i_1 и i_2 получаем

$$i_1 = i_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}; \quad i_2 = i_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Ток в одном из резистивных сопротивлений равен току в общей ветви (i_0), умноженному на сопротивление другого резистивного сопротивления и деленному на их сумму.

Параллельное соединение источников тока (рис. 1.10) в соответствии с первым законом Кирхгофа можно заменить одним эквивалентным источником тока i_0 , задающий ток которого равен алгебраической сумме задающих токов источников, входящих в параллельное соединение.

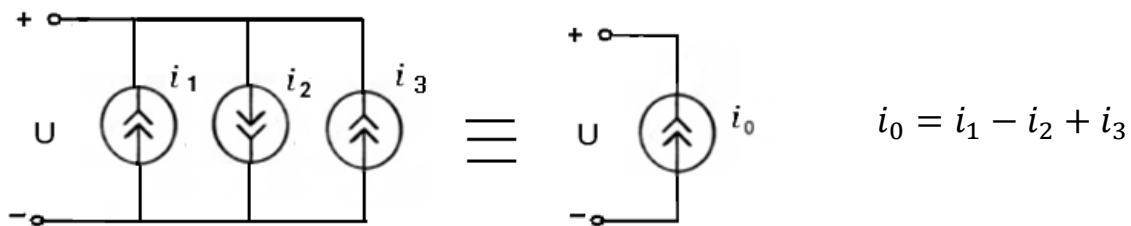


Рис. 1.10

При этом со знаком плюс берутся задающие токи, совпадающие по направлению с задающим током эквивалентного источника, а со знаком минус – не совпадающие.

Тесты

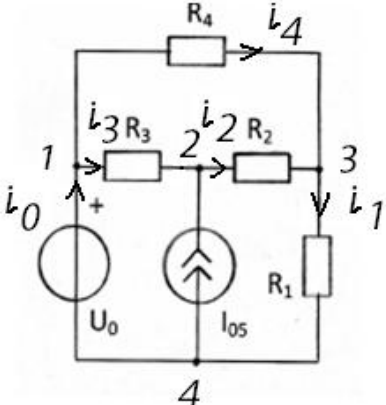
После изучения теоретического материала предлагается выполнить тесты (табл. 1.4).

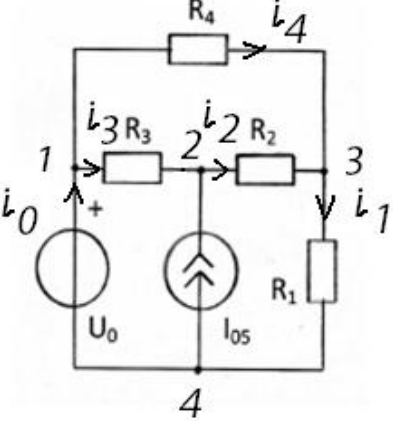
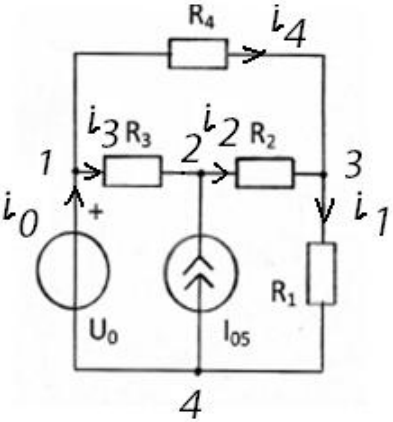
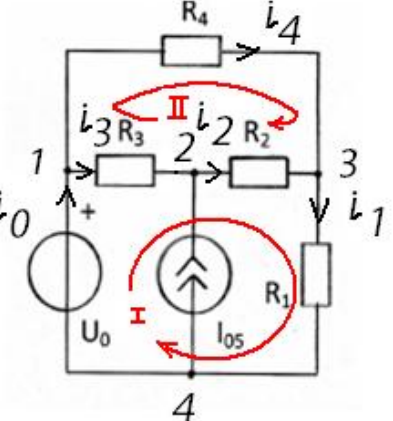
Таблица 1.4

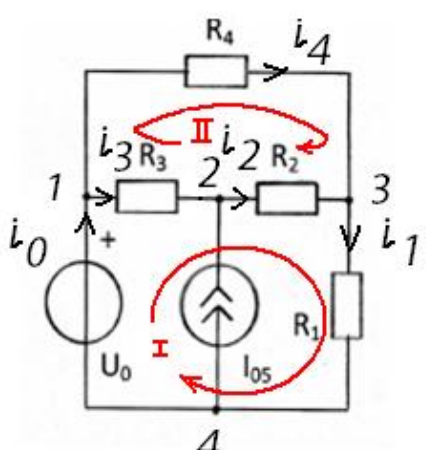
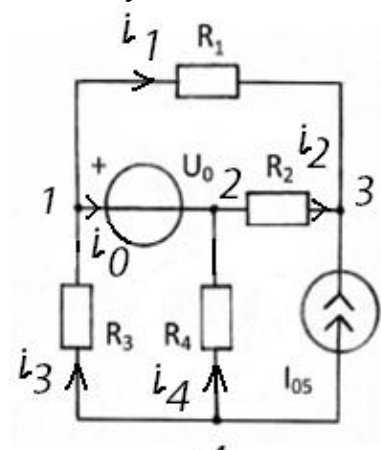
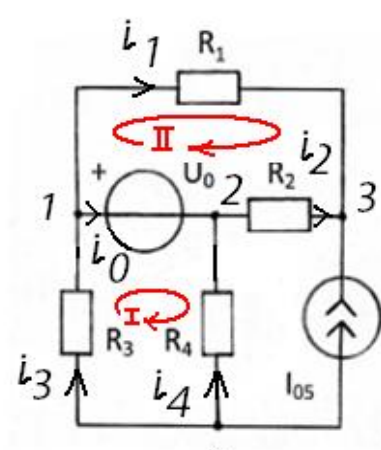
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
1	Сила тока может быть найдена как	а) $i(t) = \frac{dw}{dt}$; б) $i(t) = \frac{du}{dt}$; в) $i(t) = \frac{dq}{dt}$; г) $i(t) = \frac{dp}{dt}$
2	Под электрическим напряжением понимают	а) $u(t) = \frac{dp(t)}{dq}$; б) $u(t) = \frac{dW(t)}{dq}$; в) $u(t) = \frac{di(t)}{dq}$; г) $u(t) = \frac{dW(t)}{dt}$
3	Мгновенная мощность может быть найдена как	а) $p(t) = \frac{du}{dt}$; б) $p(t) = \frac{dW}{dt}$; в) $p(t) = \frac{dq}{dt}$; г) $p(t) = u(t) \cdot i(t)$

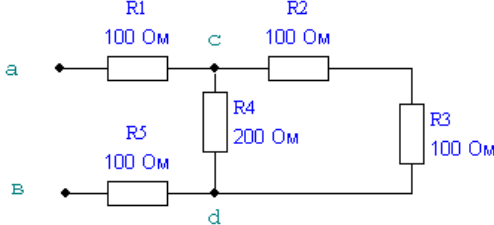
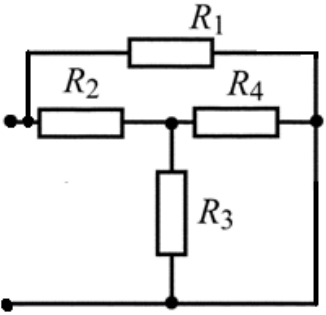
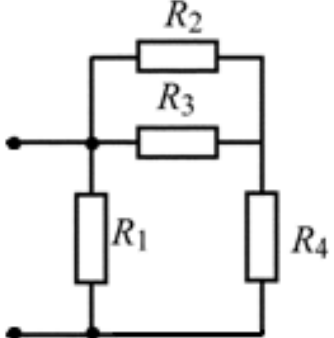
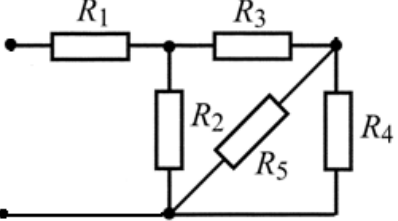
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
11	Ток и напряжение на емкости связаны следующим образом	а) $u_C = C \cdot \int i_C dt$; б) $i_C = C \cdot \frac{du_C}{dt}$; в) $u_C = \frac{1}{C} \cdot \int i_C dt$; г) $i_C = \frac{1}{C} \cdot \int u_C dt$
12	Энергия, запасенная в емкости, определяется формулой	а) $W = \frac{C \cdot i_C^2}{2}$; б) $W = \frac{C \cdot p \cdot t}{2}$; в) $W = \frac{C \cdot u_C^2}{2}$; г) $W = \frac{C \cdot i_C \cdot u_C}{2}$
13	Независимым источником напряжения называется такой активный элемент, у которого	а) напряжение на выходных зажимах зависит от внутреннего сопротивления; б) ток, проходящий через его внешние зажимы, не зависит от свойств внешней цепи; в) напряжение на выходных зажимах не зависит от свойств внешней цепи; г) ток, проходящий через его внешние зажимы, не зависит от внутреннего сопротивления
14	Независимым источником тока называется такой активный элемент, для которого	а) напряжение на выходных зажимах не зависит от внутреннего сопротивления; б) ток, проходящий через его внешние зажимы, не зависит от свойств внешней цепи; в) напряжение на выходных зажимах не зависит от свойств внешней цепи; г) ток, проходящий через его внешние зажимы, зависит от внутреннего сопротивления
15	На каком рисунке изображен источник тока, управляемый напряжением?	<p>а) $i_1 = 0$, $U_1 = kU_1$</p> <p>б) i_1, $U_1 = 0$, ri_1</p> <p>в) $i_1 = 0$, $U_1 = gU_1$</p> <p>г) i_1, $U_1 = 0$, βi_1</p>

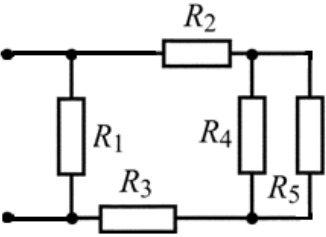
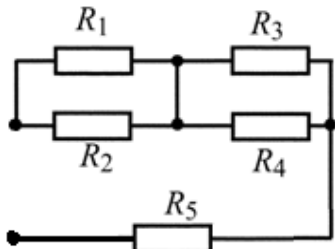
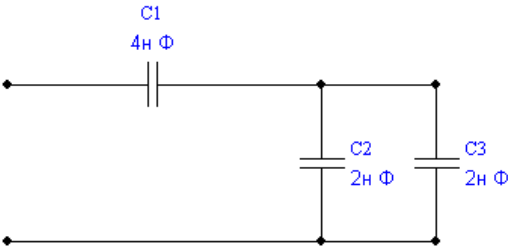
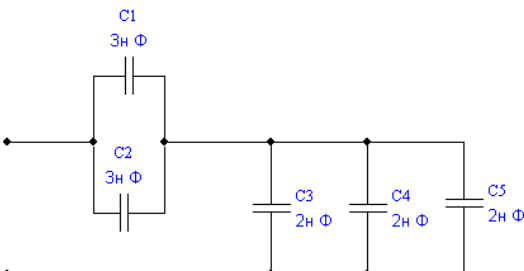
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
16	На каком рисунке изображен источник тока, управляемый током?	<div style="display: flex; flex-wrap: wrap;"> <div style="width: 50%; text-align: center;"> <p>$i_1 = 0$</p> <p>a)</p> </div> <div style="width: 50%; text-align: center;"> <p>i_1</p> <p>б)</p> </div> <div style="width: 50%; text-align: center;"> <p>$i_1 = 0$</p> <p>в)</p> </div> <div style="width: 50%; text-align: center;"> <p>i_1</p> <p>з)</p> </div> </div>
17	На каком рисунке изображен источник напряжения, управляемый напряжением?	<div style="display: flex; flex-wrap: wrap;"> <div style="width: 50%; text-align: center;"> <p>$i_1 = 0$</p> <p>a)</p> </div> <div style="width: 50%; text-align: center;"> <p>i_1</p> <p>б)</p> </div> <div style="width: 50%; text-align: center;"> <p>$i_1 = 0$</p> <p>в)</p> </div> <div style="width: 50%; text-align: center;"> <p>i_1</p> <p>з)</p> </div> </div>
18	На каком рисунке изображен источник напряжения, управляемый током?	<div style="display: flex; flex-wrap: wrap;"> <div style="width: 50%; text-align: center;"> <p>$i_1 = 0$</p> <p>a)</p> </div> <div style="width: 50%; text-align: center;"> <p>i_1</p> <p>б)</p> </div> <div style="width: 50%; text-align: center;"> <p>$i_1 = 0$</p> <p>в)</p> </div> <div style="width: 50%; text-align: center;"> <p>i_1</p> <p>з)</p> </div> </div>

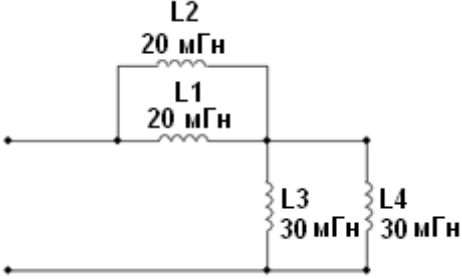
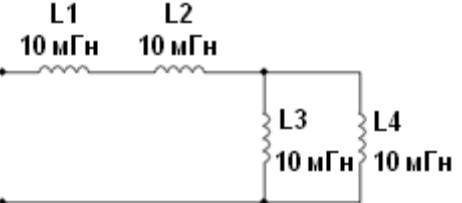
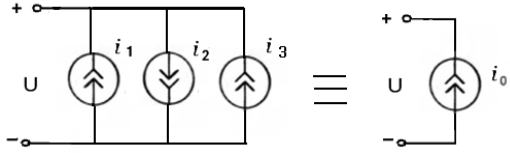
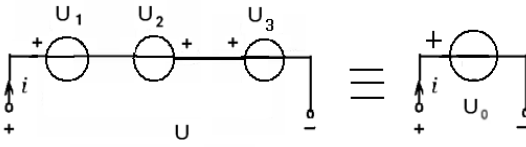
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
19	Сколько независимых уравнений можно составить по первому закону Кирхгофа?	а) $N_y + 1$; б) N_y ; в) $N_y - 1$; г) $N_B - N_y + 1$
20	Сколько независимых уравнений можно составить по второму закону Кирхгофа?	а) $N_y + 1$; б) N_y ; в) $N_y - 1$; г) $N_B - N_y + 1$
21	Первый закон Кирхгофа	а) алгебраическая сумма напряжений на зажимах ветвей в любом контуре цепи тождественно равна нулю; б) алгебраическая сумма напряжений на всех участках электрической цепи равна нулю; в) алгебраическая сумма токов в ветвях, сходящихся к любому узлу электрической цепи, тождественно равна нулю; г) алгебраическая сумма токов во всех ветвях электрической цепи тождественно равна нулю
22	Второй закон Кирхгофа	а) алгебраическая сумма напряжений на зажимах ветвей в любом контуре цепи тождественно равна нулю; б) алгебраическая сумма напряжений на всех участках электрической цепи равна нулю; в) алгебраическая сумма токов в ветвях, сходящихся к любому узлу электрической цепи, тождественно равна нулю; г) алгебраическая сумма токов во всех ветвях электрической цепи тождественно равна нулю
23	Уравнение по первому закону Кирхгофа для 1-го узла 	а) $-i_0 - i_4 + i_{05} = 0$; б) $-i_3 + i_4 + i_0 = 0$; в) $i_3 - i_4 + i_0 + i_1 = 0$; г) $i_3 + i_4 - i_0 = 0$

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
24	<p>Уравнение по первому закону Кирхгофа для 2-го узла</p> 	<p>а) $-i_3 - i_4 + i_0 = 0$; б) $-i_3 - i_{05} + i_2 = 0$; в) $i_3 + i_{05} + i_2 = 0$; г) $i_3 + i_4 - i_0 = 0$</p>
25	<p>Сколько независимых уравнений по первому и второму законам Кирхгофа можно составить для данной цепи?</p> 	<p>а) 3 по первому и 2 по второму законам Кирхгофа; б) 4 по первому и 1 по второму законам Кирхгофа; в) 3 по первому и 3 по второму законам Кирхгофа; г) 2 по первому и 2 по второму закону Кирхгофа</p>
26	<p>Уравнение по второму закону Кирхгофа для первого контура</p> 	<p>а) $-U_0 + i_1 R_1 + i_3 R_3 - i_2 R_2 = 0$; б) $-U_0 + i_3 R_3 + i_2 R_2 + i_1 R_1 = 0$; в) $-i_1 R_1 - i_3 R_3 + i_4 R_4 = 0$; г) $-i_2 R_2 - i_3 R_3 + i_4 R_4 = 0$</p>

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
27	<p>Уравнение по второму закону Кирхгофа для второго контура</p> 	<p>а) $-U_0 + i_1 R_1 + i_3 R_3 - i_2 R_2 = 0$; б) $-U_0 + i_3 R_3 + i_2 R_2 + i_1 R_1 = 0$; в) $-i_1 R_1 - i_3 R_3 + i_4 R_4 = 0$; г) $-i_2 R_2 - i_3 R_3 + i_4 R_4 = 0$</p>
28	<p>Уравнение по первому закону Кирхгофа для 1-го узла</p> 	<p>а) $-i_3 - i_4 + i_0 = 0$; б) $-i_1 + i_0 + i_0 = 0$; в) $-i_3 + i_0 + i_1 = 0$; г) $-i_3 - i_4 + i_0 = 0$</p>
29	<p>Уравнение по второму закону Кирхгофа для первого контура</p> 	<p>а) $-U_0 + i_1 R_1 - i_2 R_2 = 0$; б) $U_0 + i_4 R_4 + i_3 R_3 = 0$; в) $-U_0 + i_3 R_3 - i_2 R_2 = 0$; г) $U_0 - i_4 R_4 + i_3 R_3 = 0$</p>

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
30	<p>Чему равно входное сопротивление цепи?</p> 	<p>а) 200 Ом; б) 100 Ом; в) 300 Ом; г) 400 Ом</p>
31	<p>Чему равно входное сопротивление цепи при $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 3$ Ом, $R_3 = 20$ Ом, $R_4 = 30$ Ом?</p> 	<p>а) 6 Ом; б) 10 Ом; в) 15 Ом; г) 5 Ом</p>
32	<p>Чему равно входное сопротивление цепи при $R_1 = 60$ Ом, $R_2 = 70$ Ом, $R_3 = 30$ Ом, $R_4 = 19$ Ом?</p> 	<p>а) 20 Ом; б) 24 Ом; в) 30 Ом; г) 40 Ом</p>
33	<p>Чему равно входное сопротивление цепи при $R_1 = 15$ Ом, $R_2 = 20$ Ом, $R_3 = 12$ Ом, $R_4 = R_5 = 16$ Ом?</p> 	<p>а) 20 Ом; б) 10 Ом; в) 30 Ом; г) 25 Ом</p>

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
34	<p>Чему равно входное сопротивление цепи при $R_1 = R_3 = 2 \text{ кОм}$, $R_2 = R_4 = R_5 = 4 \text{ кОм}$?</p> 	<p>а) 2 кОм; б) 2,4 кОм; в) 1,6 кОм; г) 3 кОм</p>
36	<p>Чему равно входное сопротивление цепи при $R_1 = 40 \text{ Ом}$, $R_2 = 60 \text{ Ом}$, $R_3 = 20 \text{ Ом}$, $R_4 = 80 \text{ Ом}$, $R_5 = 10 \text{ Ом}$?</p> 	<p>а) 40 Ом; б) 30 Ом; в) 60 Ом; г) 50 Ом</p>
37	<p>Чему равна эквивалентная емкость двухполюсника?</p> 	<p>а) 2 нФ; б) 1 нФ; в) 3 нФ; г) 4 нФ</p>
38	<p>Чему равна эквивалентная емкость двухполюсника?</p> 	<p>а) 2 нФ; б) 1 нФ; в) 3 нФ; г) 4 нФ</p>

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
39	<p>Чему равна эквивалентная индуктивность двухполюсника?</p> 	<p>а) 20 мГн; б) 25 мГн; в) 30 мГн; г) 40 мГн</p>
40	<p>Чему равна эквивалентная индуктивность двухполюсника?</p> 	<p>а) 20 мГн; б) 35 мГн; в) 30 мГн; г) 25 мГн</p>
41	<p>Чему равен ток i_0, если ток $i_1 = 1$ мА, $i_2 = 2$ мА, $i_3 = 4$ мА?</p> 	<p>а) 1 мА; б) 2 мА; в) 3 мА; г) 4 мА</p>
42	<p>Чему равно напряжение U_0, если напряжение $U_1 = 5$ В, $U_2 = 2$ В, $U_3 = 1$ В?</p> 	<p>а) 1 В; б) 5 В; в) 3 В; г) 4 В</p>

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим током? Что означает положительное (отрицательное) значение тока?
2. Что называется электрическим напряжением? Когда оно принимает положительное (отрицательное) значение?
3. Какие вы знаете пассивные элементы электрических цепей? Каковы соотношения между током и напряжением для линейного резистивного сопротивления, индуктивности, емкости?
4. Чем определяется запас энергии в индуктивности, в емкости?
5. Какой активный элемент электрической цепи называется источником напряжения (источником тока)?
6. Какие элементы электрической цепи называются зависимыми источниками? Перечислите типы зависимых источников. Какими соотношениями характеризуется каждый из них?
7. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа.
8. Сколько независимых уравнений можно составить по первому и второму законам Кирхгофа?
9. Какое соединение элементов называется последовательным (параллельным)?
10. Какие две схемы замещения генератора с резистивным внутренним сопротивлением вы знаете?
11. Когда два генератора можно считать эквивалентными? Как переписать генератор с источником напряжения в эквивалентный ему генератор с источником тока и наоборот?

2. МЕТОДЫ АНАЛИЗА РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ В РЕЖИМЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Метод эквивалентных преобразований. Метод наложения. Метод токов ветвей. Метод узловых напряжений. Метод контурных токов. Метод эквивалентного генератора. Теорема замещения. Теорема взаимности.

При анализе используется согласный выбор положительных направлений напряжений и токов в ветвях анализируемых цепей.

При расчете цепей с пассивными элементами R , L , C в режиме постоянного тока необходимо учитывать, что напряжение на зажимах любой индуктивности L равно нулю, поскольку при $i_L = \text{const}$,

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = 0,$$

и ток через любую емкость C тоже равен нулю, поскольку при $u_C = \text{const}$,

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = 0.$$

Таким образом, в схеме анализируемой цепи можно замкнуть коротко зажимы индуктивности и разомкнуть зажимы емкости, а затем, получив резистивную ЭЦ, находить искомые постоянные напряжения и токи.

2.1. Метод эквивалентных преобразований

Метод эквивалентных преобразований используется для расчета напряжений и токов ветвей электрических цепей с одним источником напряжения u_0 или источником тока i_0 с применением закона Ома и законов Кирхгофа.

Анализ последовательно-параллельных цепей с одним источником рекомендуется выполнять путем эквивалентных преобразований схемы заданной цепи в простую цепь, состоящую из источника и общего эквивалентного сопротивления цепи.

Пример

Рассчитаем токи во всех ветвях цепи, если $R_1 = 16$ Ом, $R_2 = 60$ Ом, $R_3 = 40$ Ом, $U_0 = 120$ В (рис. 2.1, а).

Решение

Упрощаем схему, преобразовав параллельно соединенные сопротивления R_2 и R_3 в эквивалентное сопротивление R_{23} (рис. 2.1, б):

$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{60 \cdot 40}{60 + 40} = 24 \text{ Ом.}$$

Далее преобразуем последовательно соединенные резистивные сопротивления R_1 и R_{23} в эквивалентное сопротивление $R_{123} = R_1 + R_{23} = 16 + 24 = 40 \text{ Ом}$ (рис. 2.1, в).

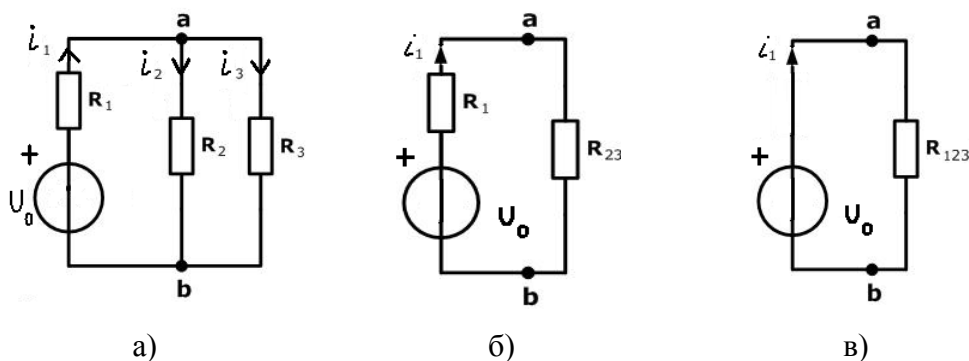


Рис. 2.1

Применим закон Ома и рассчитаем ток

$$i_1 = \frac{U_0}{R_{123}} = \frac{120}{40} = 3 \text{ А.}$$

Далее определим напряжение между узлами a и b :

$$U_{ab} = i_1 \cdot R_{23} = 3 \cdot 24 = 72 \text{ В.}$$

Пользуясь законом Ома, определим токи:

$$i_2 = \frac{U_{ab}}{R_2} = \frac{72}{60} = 1,2 \text{ А}; \quad i_3 = \frac{U_{ab}}{R_3} = \frac{72}{40} = 1,8 \text{ А.}$$

2.2. Метод наложения

Метод наложения основан на принципе наложения (суперпозиции), согласно которому реакция линейной электрической цепи на совокупность воздействий равна сумме реакций, вызываемых в той же цепи каждым из воздействий в отдельности.

Принцип наложения применим только к линейным электрическим цепям. Воздействия – это источники, а реакции – токи и напряжения, создаваемые этими источниками.

В задачах при расчете токов ветвей заданной цепи методом наложения рекомендуется следующая последовательность действий:

- нарисуйте схемы цепей с каждым источником в отдельности и покажите в них положительные направления токов. Вместо исключенного источника напряжения покажите его внутреннее сопротивление $R_0 = 0$, а вместо источника тока $R_0 = \infty$;

- рассчитайте методом эквивалентных преобразований токи ветвей в схемах цепей с одним источником (частичные токи);
- рассчитайте токи ветвей в заданной цепи как алгебраическую сумму частичных токов.

Пример

Рассчитаем токи во всех ветвях электрической цепи, схема которой показана на рис. 2.2, используя принцип наложения, если параметры элементов цепи известны.

Решение

В схеме с двумя источниками на рис. 2.2 стрелками показаны положительные направления токов $i_1, i_2, i_3, i_4, i_{01}$, выбранные произвольно. В схеме показаны узлы 0, 1, 2, 3. Согласно принципу наложения ток i_k от двух

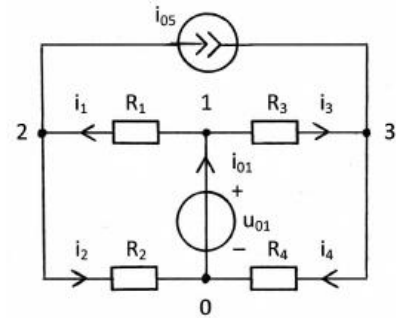


Рис. 2.2

источников равен алгебраической сумме частичных токов i_k', i_k'' от первого и второго источников в отдельности. Решение задачи состоит из трех этапов.

1. Источник напряжения u_{01} в цепи оставлен, а источник тока удален (рис. 2.3, а), т. е. вместо него имеем обрыв ветви ($R_0 = \infty$). В схеме с одним источником напряжения с задающим напряжением u_{01} вычисляем частичные токи $i_1', i_2', i_3', i_4', i_{01}'$ путем эквивалентных преобразований схемы заданной цепи. Направление частичных токов выбирается согласно заданному направлению источника.

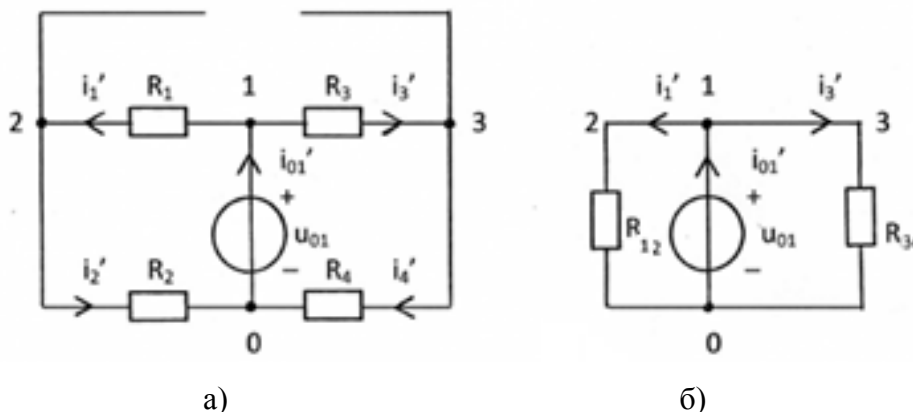


Рис. 2.3

В схеме на рис. 2.3, а резистивные сопротивления R_1 и R_2 (R_3 и R_4) соединены последовательно, так как по ним протекает один и тот же ток $i_1' = i_2'$ ($i_3' = i_4'$). Заменяем их эквивалентными сопротивлениями $R_{12} = R_1 + R_2$ и $R_{34} = R_3 + R_4$ (рис. 2.3, б).

Вычисляем частичные токи, используя закон Ома и первый закон Кирхгофа:

$$i_1' = i_2' = u_{01} / R_{12}; i_3' = i_4' = u_{01} / R_{34}; i_{01}' = i_2' + i_4'.$$

2. Источник тока i_{01} в цепи оставлен, а источник напряжения удален (рис. 2.4, а), т. е. вместо него показано короткое замыкание ($R_0 = 0$). В схеме с одним источником тока с задающим током i_{01} вычисляем частичные токи i_1'' , i_2'' , i_3'' , i_4'' , i_{01}'' путем эквивалентных преобразований схемы заданной цепи.

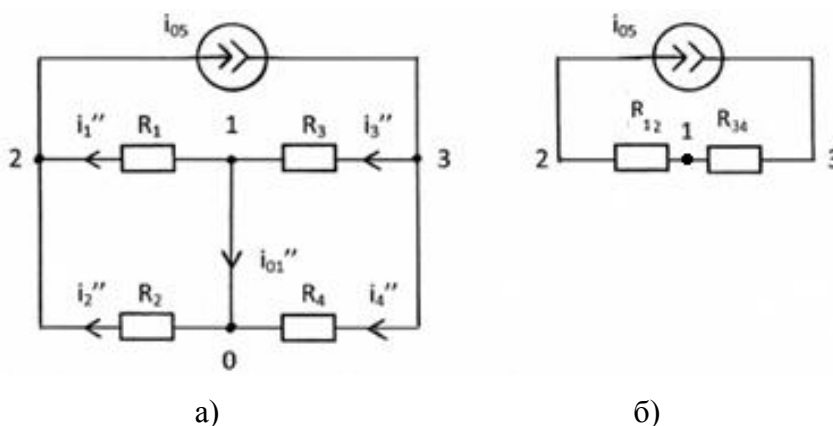


Рис. 2.4

В схеме на рис. 2.4, а резистивные сопротивления R_1 и R_2 , а также R_3 и R_4 соединены параллельно, так как к ним приложено одно и то же напряжение u_{12} и u_{31} .

Заменяем их эквивалентными сопротивлениями

$$R_{12} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \quad \text{и} \quad R_{34} = R_3 \cdot R_4 / (R_3 + R_4) \quad (\text{рис. 2.4, б}).$$

Вычисляем частичные токи, используя закон Ома и первый закон Кирхгофа: $u_{R12} = i_{05} \cdot R_{12}$; $u_{R34} = i_{05} \cdot R_{34}$; $i_1'' = u_{R12} / R_1$; $i_2'' = u_{R12} / R_2$; $i_3'' = u_{R34} / R_3$; $i_4'' = u_{R34} / R_4$; $i_{01}'' + i_1'' - i_3'' = 0$; $i_{01}'' = -i_1'' + i_3''$.

3. Нахождение истинных токов в ветвях цепи. Истинные токи определяются как алгебраическая сумма частичных токов, т. е. сравниваются направления частичных токов с направлением истинных токов в исходной цепи.

Для ветви 1 $i_1 = i_1' + i_1''$.

Для ветви 2 $i_2 = i_2' - i_2''$.

Для ветви 3 $i_3 = i_3' - i_3''$.

Для ветви 4 $i_4 = i_4' + i_4''$.

Для ветви 01 $i_{01} = i_{01}' - i_{01}''$.

2.3. Метод токов ветвей

Метод анализа колебаний в электрических цепях, в котором переменными системы уравнений анализируемой цепи являются токи в ветвях цепи, называется методом токов ветвей. Метод основан на применении законов Кирхгофа.

Для определения неизвестных токов во всех ветвях заданной цепи методом токов ветвей (методом уравнений Кирхгофа) рекомендуется следующая последовательность действий:

- определите число независимых уравнений по первому закону Кирхгофа ($N_I = N_y - 1$), затем по второму закону Кирхгофа ($N_{II} = N_B - N_y + 1 - N_{ист.т}$). Сделайте проверку: $N = N_I + N_{II} = N_B - N_{ист.т}$, где N_B – число ветвей, N_y – число узлов, $N_{ист.т}$ – число источников тока в схеме цепи;
- покажите произвольно положительные направления токов в ветвях и составьте уравнения по первому закону Кирхгофа;
- покажите произвольно положительные направления обхода выбранных контуров и составьте уравнения по второму закону Кирхгофа. Напряжения на резистивных элементах выразите через токи по закону Ома;
- из получившейся системы уравнений найдите значения неизвестных токов ветвей;
- сделайте проверку правильности расчета цепи с помощью баланса мощностей.

Рассмотрим цепь, содержащую источники напряжения, источники тока и резистивные сопротивления (рис. 2.5).

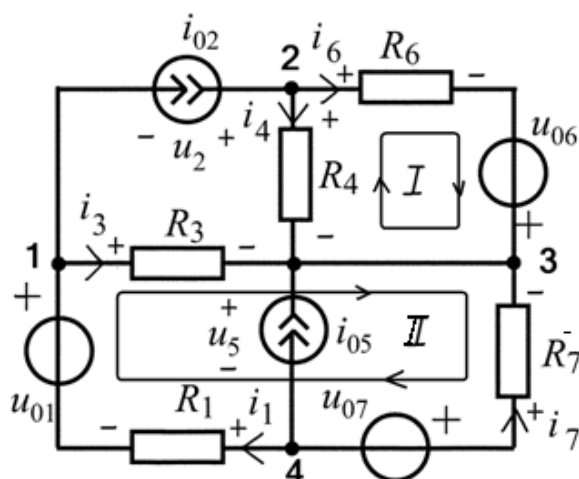


Рис. 2.5

Решение

1. Определим число независимых уравнений:
 - по первому закону Кирхгофа $N_I = N_y - 1 = 4 - 1 = 3$;

- по второму закону Кирхгофа $N_{II} = N_B - N_Y + 1 - N_{ист.г} = 7 - 4 + 1 - 2 = 2$;
- всего: $N = N_I + N_{II} = N_B - N_{ист.г} = 7 - 2 = 5$.

Число уравнений уменьшилось, так как во второй и пятой ветвях есть источники тока, а следовательно, токи в этих ветвях известны.

2. Запишем уравнения по первому закону Кирхгофа:

для 1-го узла $-i_1 + i_{02} + i_3 = 0$;

для 2-го узла $-i_{02} + i_4 + i_6 = 0$;

для 3-го узла $-i_3 - i_{05} - i_4 - i_6 - i_7 = 0$.

3. Контур в таких цепях (рис. 2.5) выберем таким образом, чтобы ветви с источниками тока не входили ни в один контур. Уравнения по второму закону Кирхгофа имеют вид:

для I контура $i_6 R_6 - u_{06} - i_4 R_4 = 0$;

для II контура $i_3 R_3 - i_7 R_7 + u_{07} + i_1 R_1 - u_{01} = 0$.

После анализа любой цепи нужно сделать проверку правильности расчетов. Для этого составляется уравнение баланса мощности, согласно которому алгебраическая сумма мощностей в цепи, вносимых источниками, равна сумме мощностей, потребляемых цепью:

$$P_{отд} = P_{потр};$$

$$P_{отд} = \sum_{k=1}^n U_{0k} \cdot I_k + \sum_{k=1}^l I_{0k} \cdot U_k,$$

где n – число источников напряжения; l – число источников тока.

$$P_{потр} = \sum_{k=1}^m I_k^2 \cdot R_k,$$

где m – число резистивных сопротивлений.

Для цепи рис. 2.5 потребляемая мощность рассчитывается по формуле

$$P_{потр} = i_1^2 \cdot R_1 + i_3^2 \cdot R_3 + i_4^2 \cdot R_4 + i_6^2 \cdot R_6 + i_7^2 \cdot R_7,$$

отдаваемая мощность – по формуле

$$P_{отд} = u_{01} \cdot i_1 + i_{02} \cdot u_2 + u_{06} \cdot i_6 + u_{07} \cdot i_7 + i_{05} \cdot u_5,$$

где u_2 – напряжение на зажимах источника тока i_{02} , u_5 – напряжение на зажимах источника тока i_{05} , которые определяются по второму закону Кирхгофа:

$$u_2 = i_4 R_4 - i_3 R_3;$$

$$u_5 = u_{07} - i_7 R_7.$$

2.4. Метод узловых напряжений

В данном методе переменными или неизвестными системы уравнений анализируемой цепи являются узловые напряжения $U_{1y}, U_{2y}, U_{3y}, \dots, U_{Ny}$, т. е. напряжения, равные разности потенциалов k -го и базисного узлов. Потенциал базисного узла принимается равным нулю ($U_{0y} = 0$).

Для резистивных цепей, содержащих только независимые источники тока, базисный узел выбирается произвольно. В этом случае число узловых напряжений, а значит, и порядок канонической системы узловых уравнений, определяются по формуле

$$N = N_y - 1.$$

Для резистивных цепей, содержащих не только независимые источники тока, но и независимые источники напряжения, в качестве базисного узла выбирается тот узел, к которому подключен зажим источника напряжения со знаком «-», тогда узловое напряжение узла, к которому подключен другой зажим источника, известен и равен его задающему напряжению со знаком «+».

Аналогично выбирается базисный узел, если к одному узлу подсоединены несколько источников напряжения. В этом случае число неизвестных узловых напряжений уменьшается:

$$N = N_y - 1 - N_{\text{ист.н}},$$

где $N_{\text{ист.н}}$ – число источников напряжения.

Применение метода узловых напряжений позволяет существенно уменьшить число решаемых уравнений по сравнению с методом токов ветвей.

Каноническая форма системы узловых уравнений N -го порядка имеет следующий вид:

$$\begin{cases} G_{11} \cdot U_{1y} - G_{12} \cdot U_{2y} - G_{13} \cdot U_{3y} - \dots - G_{1N} \cdot U_{Ny} = i_{y1}; \\ -G_{21} \cdot U_{1y} + G_{22} \cdot U_{2y} - G_{23} \cdot U_{3y} - \dots - G_{2N} \cdot U_{Ny} = i_{y2}; \\ \dots \\ -G_{N1} \cdot U_{1y} - G_{N2} \cdot U_{2y} - G_{N3} \cdot U_{3y} - \dots + G_{NN} \cdot U_{Ny} = i_{yN}, \end{cases}$$

где G_{kk} – собственная проводимость k -го узла, равная арифметической сумме проводимостей всех ветвей, подключенных одним из зажимов к k -му узлу цепи;

G_{kl} – взаимная проводимость k -го и l -го узлов цепи, равная сумме проводимостей ветвей, включенных между k -м и l -м узлами цепи;

i_{yk} – задающий узловый ток k -го узла, равный алгебраической сумме задающих токов источников токов, подключенных одним из зажимов

к k -му узлу цепи, при этом в сумму со знаком «+» входит задающий ток того источника, положительное направление которого ориентировано в сторону k -го узла, и со знаком «-» – в противном случае.

При составлении системы уравнений для цепей, содержащих ветви R , u_0 , используются эквивалентные преобразования и условия эквивалентности, приведенные на рис. 2.6.

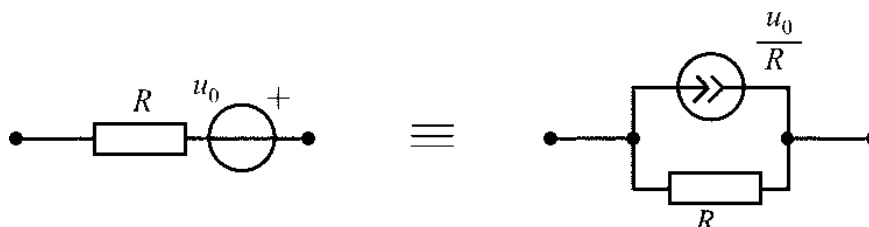


Рис. 2.6

Метод узловых напряжений можно применять, когда в цепи помимо независимых имеются зависимые источники.

Пусть в цепи направление тока i показано стрелкой от узла 1 к узлу 2, и между узлами 1 и 2 ветвь содержит только один резистор R . Тогда ток i вычисляется в ветви по формуле, показанной на рис. 2.7, а.

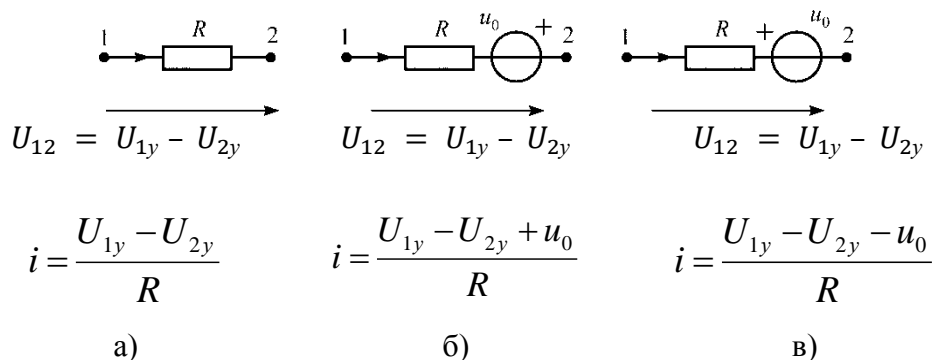


Рис. 2.7

Для ветвей, содержащих ветви R , u_0 , токи рассчитываются в соответствии с выражениями, показанными на рис. 2.7, б и в.

В задачах при расчете токов в ветвях заданной цепи методом узловых напряжений рекомендуется следующая последовательность действий:

- выберите базисный узел и приравняйте его потенциал нулю, пронумеруйте остальные узлы;
 - для цепей i_0, R выбор произволен;
 - для цепей u_0, i_0, R нужно учитывать наличие источника напряжения u_0 между двумя узлами;
- составьте каноническую систему узловых уравнений и выразите ее коэффициенты через параметры заданной цепи;

- рассчитайте значения узловых напряжений, решив полученную систему уравнений;
- найдите токи в ветвях через узловые напряжения.

Пример

Для цепи на рис. 2.8 методом узловых напряжений определить все токи, если $u_{01} = 3$ В; $u_{06} = 5$ В; $i_{03} = 2$ А; $R_2 = R_4 = R_5 = R_6 = 10$ Ом.

Сделать проверку полученного решения по законам Кирхгофа.

Решение

Если рассчитываемая цепь содержит ветвь, состоящую только

из источника напряжения, то в качестве базисного узла следует выбирать зажим ветви, к которому подключен этот источник напряжения. Узловое напряжение базисного узла принимается равным нулю, т. е. $U_{0y} = 0$. Прономеруем все узлы 0, 1, 2, 3 так, как показано на рис. 2.8.

Поскольку узловым напряжением называется разность потенциалов между неким узлом цепи и базисным узлом, то напряжение узла 1 совпадает с напряжением источника напряжения u_{01} , т. е. $U_{1y} = u_{01} = 3$ В. Для оставшихся узлов 2 и 3 нужно составить узловые уравнения.

Для узла 2:

$$-\frac{1}{R_2} \cdot U_{1y} + \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4}\right) \cdot U_{2y} - \frac{1}{R_4} \cdot U_{3y} = i_{03}.$$

Для узла 3:

$$-\frac{1}{R_6} \cdot U_{1y} - \frac{1}{R_4} \cdot U_{2y} + \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}\right) \cdot U_{3y} = \frac{u_{06}}{R_6}.$$

Слагаемое в правой части последнего уравнения явилось следствием замены схемы генератора напряжения в ветви $u_{06} - R_6$ на генератор тока $i_{06} = \frac{u_{06}}{R_6}$ в этой ветви.

Заменим u_{01} , u_{06} , i_{03} , R_2 , R_4 , R_5 , R_6 численными значениями:

$$\begin{aligned} -0,3 + 0,2 \cdot U_{2y} - 0,1 \cdot U_{3y} &= 2; \\ -0,3 - 0,1 \cdot U_{2y} + 0,3 \cdot U_{3y} &= 0,5. \end{aligned}$$

Умножим уравнения на 10 и перенесем числа в правую часть.

$$\begin{aligned} 2 \cdot U_{2y} - U_{3y} &= 23; \\ -U_{2y} + 3 \cdot U_{3y} &= 8. \end{aligned}$$

Решение системы уравнений $U_{2y} = 15,4$ В; $U_{3y} = 7,8$ В.

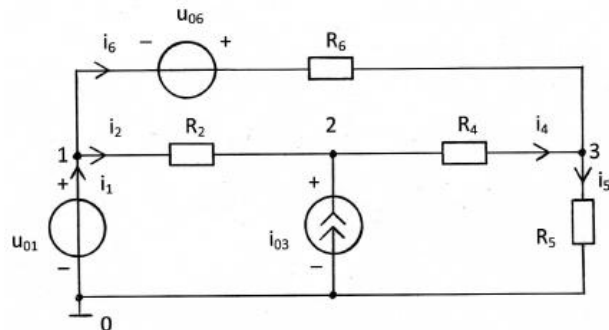


Рис. 2.8

Для нахождения токов в ветвях задаем (произвольно) положительные направления отсчета этих токов (рис. 2.8).

Тогда, используя закон Ома, получаем:

$$i_2 = (U_{1y} - U_{2y}) / R_2 = (3 - 15,4) / 10 = -1,24 \text{ A};$$

$$i_4 = (U_{2y} - U_{3y}) / R_4 = (15,4 - 7,8) / 10 = 0,76 \text{ A};$$

$$i_5 = (U_{3y} - U_{0y}) / R_5 = (7,8 - 0) / 10 = 0,78 \text{ A};$$

$$i_6 = (U_{1y} - U_{3y} + u_{06}) / R_6 = (3 - 7,8 + 5) / 10 = 0,02 \text{ A}.$$

Ток i_1 через источник напряжения вычисляем по первому закону Кирхгофа. Для нулевого узла схемы имеем $i_1 + i_{03} - i_5 = 0$. Тогда ток

$$i_1 = i_5 - i_{03} = 0,78 - 2 = -1,22 \text{ A}.$$

Проверка решения по законам Кирхгофа:

$$-i_1 + i_2 + i_6 = 1,22 - 1,24 + 0,02 = 0;$$

$$-i_{03} - i_2 + i_4 = -2 + 1,24 + 0,76 = 0;$$

$$-i_4 - i_6 + i_5 = -0,76 - 0,02 + 0,78 = 0;$$

$$i_2 \cdot R_2 + i_4 \cdot R_4 - i_6 \cdot R_6 + u_{06} = -12,4 + 7,6 - 0,2 + 5 = 0;$$

$$-u_{06} + i_6 \cdot R_6 + i_5 \cdot R_5 - u_{01} = -5 + 0,2 + 7,8 - 3 = 0.$$

2.5. Метод контурных токов

Метод анализа колебаний в электрических цепях, в котором переменными системы уравнений анализируемой цепи являются контурные токи, называется методом контурных токов.

Контурный ток – это условный ток, который протекает в каждом независимом контуре, направление которого обычно выбирают совпадающим с направлением обхода контура.

Применение метода контурных токов позволяет существенно уменьшить число решаемых уравнений по сравнению с методом токов ветвей.

По найденным контурным токам рассчитывают токи ветвей анализируемой цепи следующим образом:

– ток ветви равен по величине и направлению контурному току, если через эту ветвь проходит ток лишь одного контура;

– ток ветви равен алгебраической сумме контурных токов этой ветви, причем со знаком «+» контурный ток входит в сумму, если его направление совпадает с направлением тока ветви, и со знаком «-» – в противном случае.

Для резистивных цепей, содержащих не только независимые источники напряжения, но и независимые источники тока, контурные токи выбира-

Пример

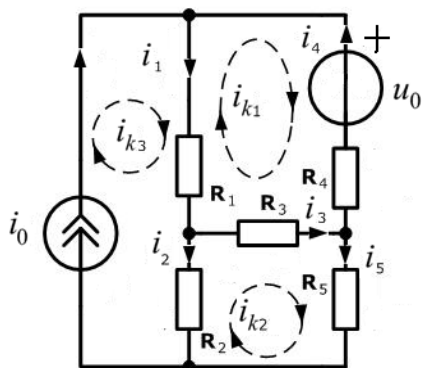


Рис. 2.10

Выбираем на схеме два замкнутых контура, не содержащих ветви с источником тока. Далее обозначим контурные токи и произвольно выберем их направление. Также обозначим на схеме и выберем направление контурного тока $i_{k3} = i_0$. Составим систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} (R_1 + R_4 + R_3) \cdot i_{k1} - R_3 \cdot i_{k2} - R_1 \cdot i_{k3} = -U_0; \\ -R_3 \cdot i_{k1} + (R_2 + R_5 + R_3) \cdot i_{k2} - R_2 \cdot i_{k3} = 0. \end{cases}$$

Подставляем численные значения в полученную систему:

$$\begin{cases} i_{k3} = i_0 = 50 \cdot 10^{-3} \text{ А}; \\ 17 \cdot 10^{-3} \cdot i_{k1} - 8 \cdot 10^{-3} \cdot i_{k2} = 190; \\ -8 \cdot 10^{-3} \cdot i_{k1} + 26 \cdot 10^{-3} \cdot i_{k2} = 800. \end{cases}$$

Решаем полученную систему и получаем следующие значения:
 $i_{k1} = 30 \text{ мА}$, $i_{k2} = 40 \text{ мА}$.

Зная значения контурных токов, определяем токи ветвей:

$$\begin{aligned} i_1 &= i_{k3} - i_{k1} = 50 - 30 = 20 \text{ мА}; \\ i_2 &= i_{k3} - i_{k2} = 50 - 40 = 10 \text{ мА}; \\ i_3 &= i_{k2} - i_{k1} = 40 - 30 = 10 \text{ мА}; \\ i_4 &= -i_{k1} = -30 \text{ мА}; \\ i_5 &= i_{k2} = 40 \text{ мА}. \end{aligned}$$

2.6. Метод эквивалентного генератора

Метод эквивалентного генератора основан на теореме об эквивалентном генераторе и применяется для анализа электрических цепей, в которых требуется найти ток в одной пассивной ветви (нагрузке). Тогда цепь, внешняя по отношению к нагрузке, рассматривается как эквивалентный генератор напряжения (рис. 2.11, а) или как эквивалентный генератор тока (рис. 2.11, б).

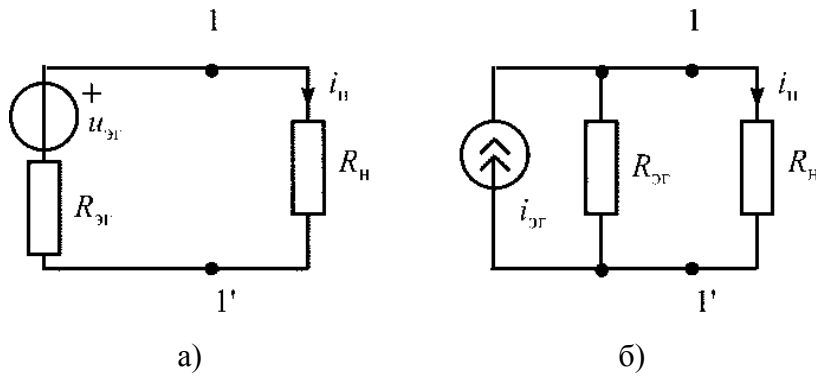


Рис. 2.11

Эквивалентный генератор – это активный линейный двухполюсник, параметры которого определяются так:

$u_{эГ}$ – задающее напряжение генератора равно напряжению холостого хода $u_{ХХ}$ на разомкнутых зажимах (1, 1') активного двухполюсника;

$i_{эГ}$ – задающий ток генератора равен току короткого замыкания $i_{кз}$, проходящему через замкнутые накоротко зажимы (1, 1') активного двухполюсника;

$R_{эГ}$ – внутреннее сопротивление генератора равно эквивалентному входному сопротивлению, рассчитанному относительно разомкнутых зажимов (1, 1') пассивного двухполюсника, который получен из активного путем замены всех источников напряжения их внутренними сопротивлениями $R_0 = 0$, а всех источников тока – их внутренними сопротивлениями $R_0 = \infty$.

После определения параметров эквивалентного генератора рассчитывается ток в нагрузке по закону Ома:

$$i_{Н} = \frac{u_{эГ}}{R_{эГ} + R_{Н}}, \quad u_{эГ} = u_{ХХ} \quad (\text{рис. 2.11, а});$$

$$i_{Н} = i_{эГ} \frac{R_{эГ}}{R_{эГ} + R_{Н}}, \quad i_{эГ} = i_{кз} \quad (\text{рис. 2.11, б}).$$

При расчете тока ветви методом эквивалентного генератора рекомендуется следующая последовательность действий:

- нарисуйте схему эквивалентного генератора напряжения (рис. 2.11, а), заменив $R_{Н}$ сопротивлением в указанной ветви;
- рассчитайте по второму закону Кирхгофа напряжение $u_{ХХ} = u_{эГ}$, исключив резистивное сопротивление в указанной ветви и выбрав положительное направление $u_{ХХ}$, совпадающее с направлением искомого тока;
- рассчитайте сопротивление $R_{эГ}$ относительно разомкнутых зажимов ветви, заменив в оставшейся цепи все источники их внутренними сопротивлениями;
- рассчитайте искомый ток в ветви по закону Ома (рис. 2.11, а).

Пример

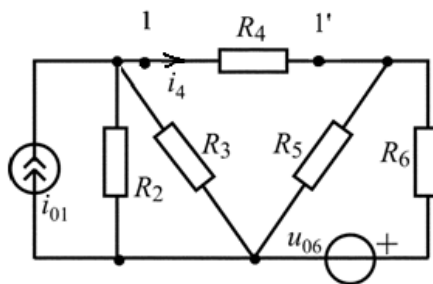


Рис. 2.12

Определите ток ветви i_4 (рис. 2.12), используя метод эквивалентного генератора, если $u_{06} = 20$ В, $i_{01} = 10$ мА, $R_2 = 4$ кОм, $R_3 = 6$ кОм, $R_4 = 1$ кОм, $R_5 = 2$ кОм, $R_6 = 8$ кОм.

Решение

Заменим внешнюю по отношению к нагрузке R_4 цепь эквивалентным генератором (рис. 2.13). Тогда ток i_4 может быть найден по закону Ома:

$$i_4 = \frac{u_{\text{эГ}}}{R_{\text{эГ}} + R_4}.$$

Найдем $u_{\text{эГ}}$ – задающее напряжение эквивалентного генератора. Для этого нарисуем схему, разорвав ветвь с R_4 , так как $u_{\text{эГ}} = u_{\text{ХХ}}$.

Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для контура, в который входит $u_{\text{ХХ}}$ (рис. 2.14):

$$u_{\text{ХХ}} + i_5 \cdot R_5 - i_3 \cdot R_3 = 0$$

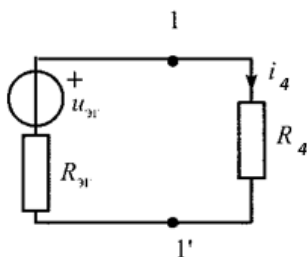


Рис. 2.13

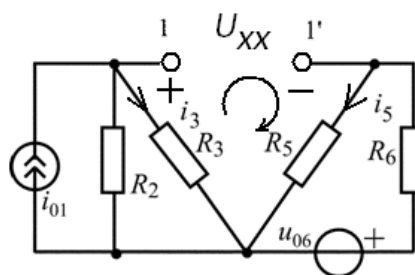


Рис. 2.14

Токи

$$i_3 = \frac{i_{01} \cdot R_2}{R_2 + R_3} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^3}{4 \cdot 10^3 + 6 \cdot 10^3} = 4 \text{ мА}; \quad i_5 = \frac{u_{06}}{R_5 + R_6} = \frac{20}{2 \cdot 10^3 + 8 \cdot 10^3} = 2 \text{ мА}.$$

Найдем

$$u_{\text{ХХ}} = u_{\text{эГ}} = -i_5 \cdot R_5 + i_3 \cdot R_3 = -2 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^3 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^3 = 20 \text{ В}.$$

Определим $R_{\text{эГ}}$ – внутреннее сопротивление эквивалентного генератора, для этого перерисуем схему для определения $u_{\text{эГ}}$, удалив из нее источники тока и напряжения (источники тока заменим разрывом, а источники напряжения – коротким замыканием (проводом)):

$$R_{\text{эГ}} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} + \frac{R_5 \cdot R_6}{R_5 + R_6}.$$

Рассчитаем $R_{\text{ЭГ}}$ (рис. 2.15):

$$R_{\text{ЭГ}} = \frac{6 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^3}{4 \cdot 10^3 + 6 \cdot 10^3} + \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^3 + 8 \cdot 10^3} = 4 \text{ кОм.}$$

Затем рассчитаем ток:

$$i_4 = \frac{u_{\text{ЭГ}}}{R_{\text{ЭГ}} + R_4} = \frac{20}{4 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3} = 4 \text{ мА.}$$

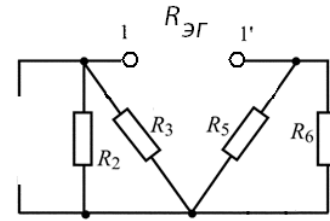


Рис. 2.15

2.7. Теорема замещения. Теорема взаимности

Теорема замещения. Значения всех напряжений и токов в электрической цепи сохраняются неизменными, если любую ветвь цепи заменить источником напряжения, у которого задающее напряжение равно напряжению этой ветви до указанной замены (рис. 2.16).

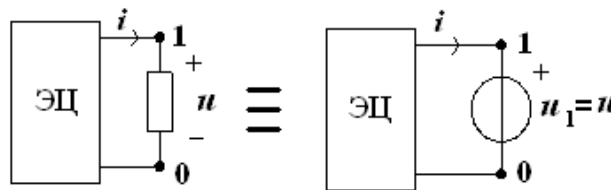


Рис. 2.16

Существует двойственная (дуальная) формулировка **теоремы замещения**: значения всех напряжений и токов в электрической цепи сохраняются неизменными, если любую ветвь цепи заменить источником тока, у которого задающий ток равен току в этой ветви до указанной замены (рис. 2.17).

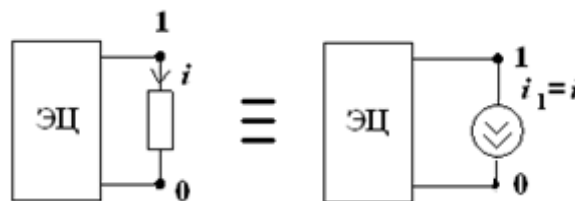


Рис. 2.17

В качестве примера применения теоремы на рис. 2.18, *а* приведена схема заданной цепи, на рис. 2.18, *б* схемы трех эквивалентных цепей.

В схемах в соответствии с теоремой замещения напряжения и токи в одноименных ветвях имеют одинаковые значения. Необходимо обратить внимание на то, что теорема применима как к линейным, так и к нелинейным электрическим цепям, так как при ее доказательстве на выделенную

ветвь не накладывает никаких ограничений, кроме того, что она обменивается энергией с остальной частью цепи (рис. 2.16, 2.17) только через зажимы 1–0 с помощью тока.

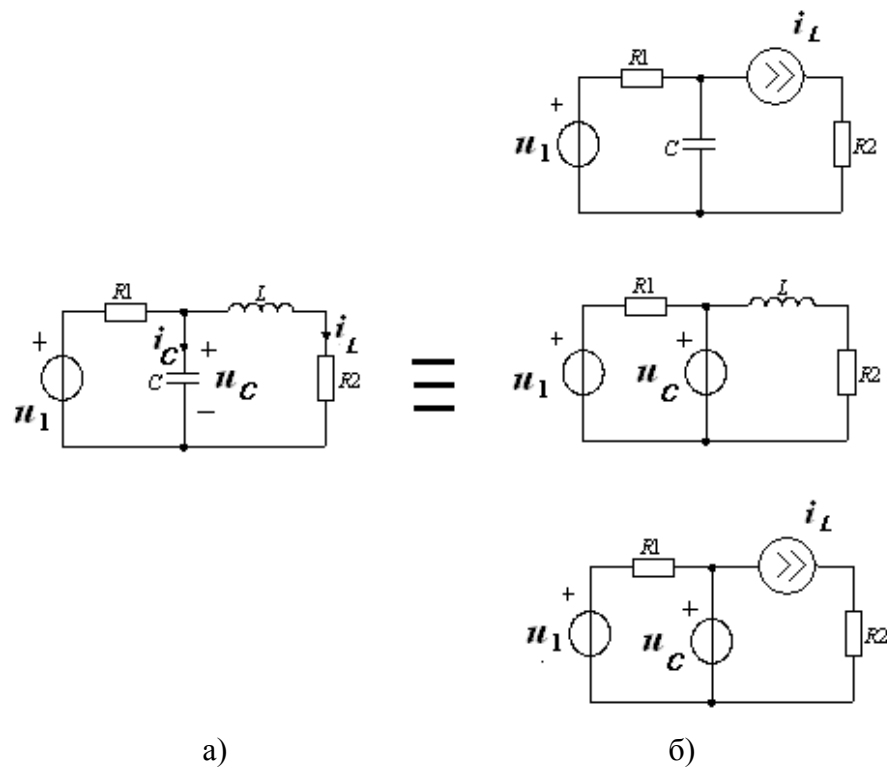


Рис. 2.18

Теорема взаимности. Если источник напряжения, включенный в некоторую ветвь линейной электрической цепи, составленной из пассивных двухполюсников, вызывает в другой ветви этой цепи некоторый ток, то тот же источник напряжения, будучи перенесенным в эту вторую ветвь, вызовет в первой ветви прежний ток. Графическая иллюстрация теоремы приведена на рис. 2.19.

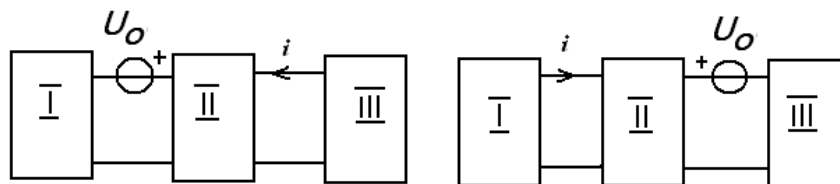


Рис. 2.19

Дуальная формулировка этой теоремы такова: если источник тока, подключенный к некоторой первой паре узлов линейной электрической цепи, составленной из пассивных двухполюсников, вызывает между второй парой узлов этой цепи некоторое напряжение, то этот же источник, будучи подключенным к этой второй паре узлов, вызывает на зажимах первой пары узлов прежнее напряжение (рис. 2.20).

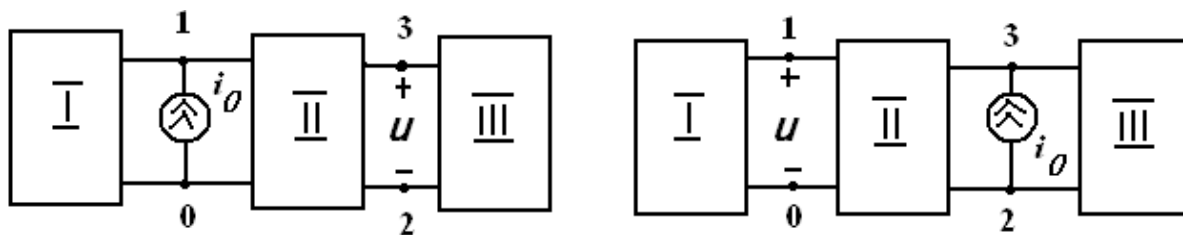


Рис. 2.20

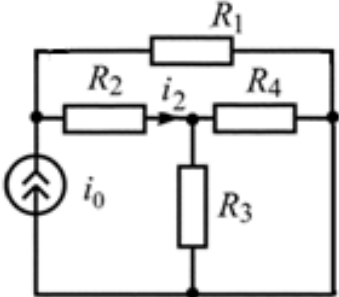
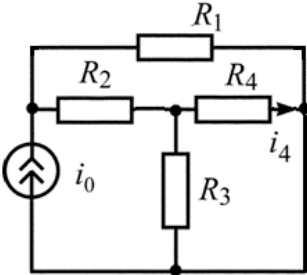
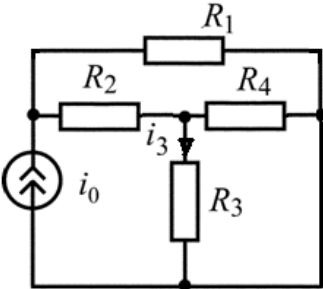
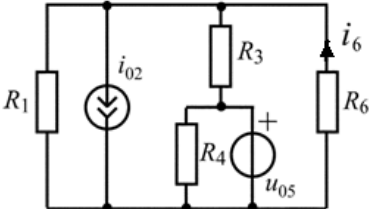
Цепи, которые удовлетворяют теореме взаимности, называются взаимными или обратимыми. Данная теорема верна для линейных цепей, не содержащих зависимых источников.

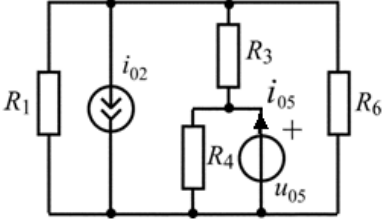
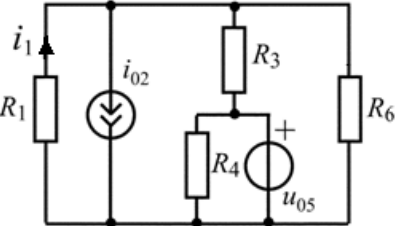
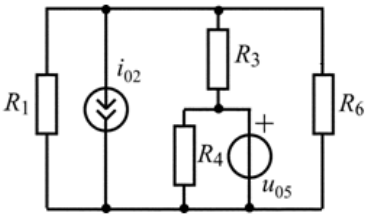
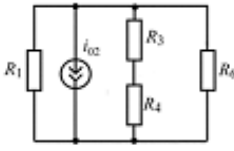
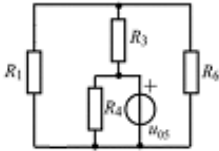
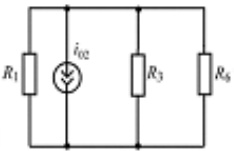
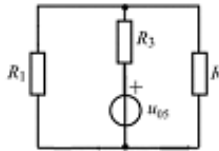
Тесты

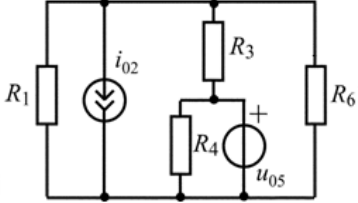
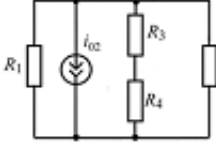
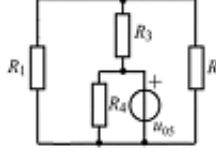
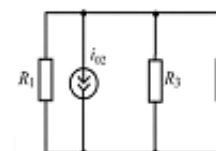
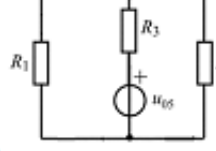
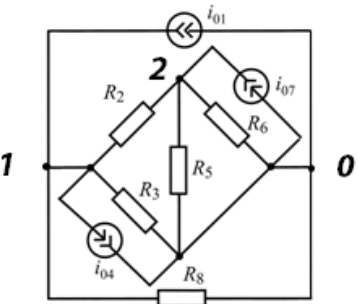
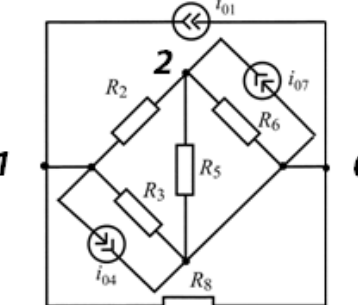
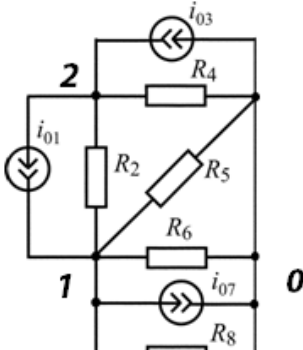
После разбора решения типовых задач предлагается выполнить тесты (табл. 2.1).

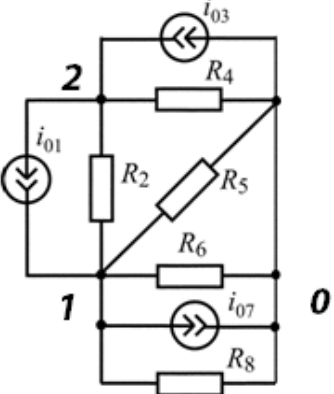
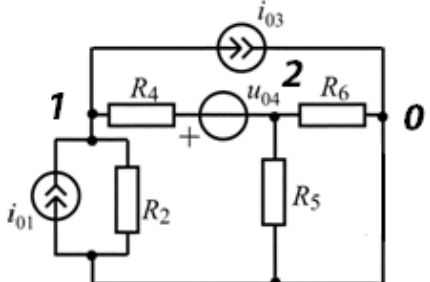
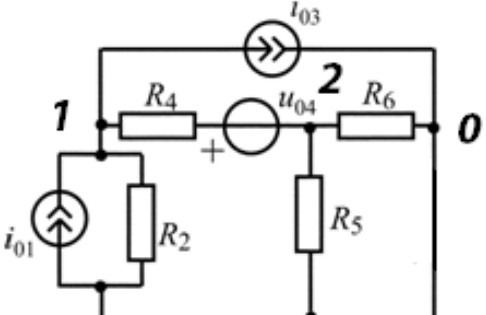
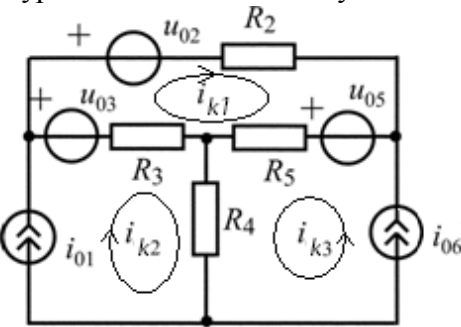
Таблица 2.1

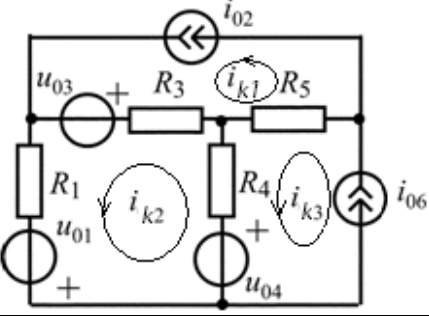
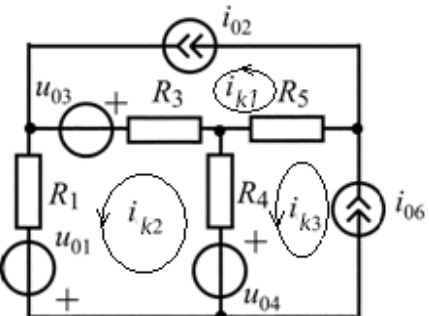
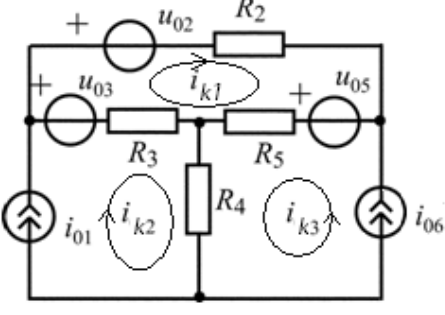
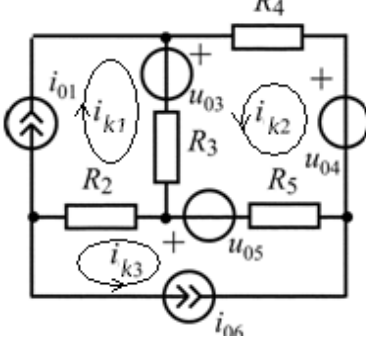
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
1	<p>Параметры элементов приведенной цепи: $u_0 = 15 \text{ В}$, $R_1 = 110 \text{ Ом}$, $R_2 = 160 \text{ Ом}$, $R_3 = 70 \text{ Ом}$, $R_4 = R_5 = 100 \text{ Ом}$. Значение тока i_0 равно</p>	<p>а) 0,2 А; б) 0,1 А; в) 0,3 А; г) 0,4 А</p>
2	<p>Параметры элементов приведенной цепи: $i_0 = 200 \text{ мА}$, $R_1 = 200 \text{ Ом}$, $R_2 = 100 \text{ Ом}$, $R_3 = R_4 = 200 \text{ Ом}$. Значение тока i_1 равно</p>	<p>а) 0,2 А; б) 0,1 А; в) 0,3 А; г) 0,4 А</p>

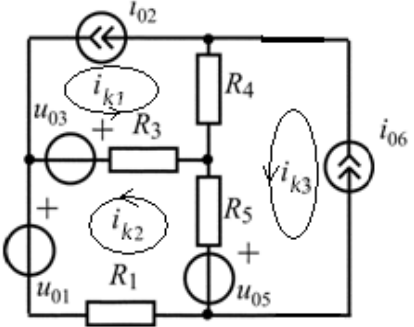
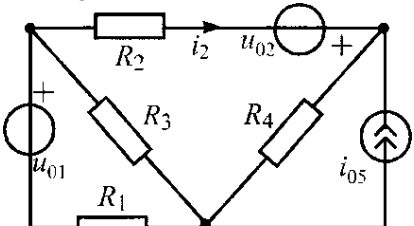
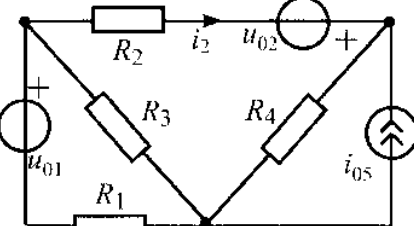
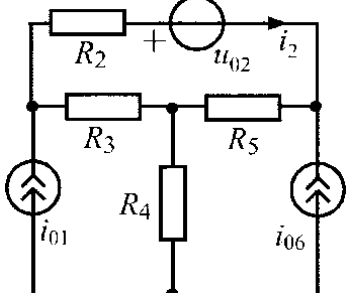
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
3	<p>Параметры элементов приведенной цепи: $i_0 = 100$ мА, $R_1 = 100$ Ом, $R_2 = 50$ Ом, $R_3 = R_4 = 100$ Ом. Значение тока i_2 равно</p> 	<p>а) 0,2 А; б) 0,1 А; в) 0,3 А; г) 0,05 А</p>
4	<p>Параметры элементов приведенной цепи: $i_0 = 200$ мА, $R_1 = 200$ Ом, $R_2 = 100$ Ом, $R_3 = R_4 = 200$ Ом. Значение тока i_4 равно</p> 	<p>а) 0,2 А; б) 0,1 А; в) 0,05 А; г) 0,5 А</p>
5	<p>Параметры элементов приведенной цепи: $i_0 = 200$ мА, $R_1 = 200$ Ом, $R_2 = 100$ Ом, $R_3 = R_4 = 200$ Ом. Значение тока i_3 равно</p> 	<p>а) 0,2 А; б) 0,1 А; в) 0,5 А; г) 0,05 А</p>
6	<p>Параметры элементов приведенной цепи: $u_{05} = 12$ В, $i_{02} = 60$ мА, $R_1 = R_3 = R_4 = R_6 = 100$ Ом. Чему равен частичный ток i'_6, создаваемый источником тока i_{02}?</p> 	<p>а) 0,2 А; б) 0,25 А; в) 0,5 А; г) 0,02 А</p>

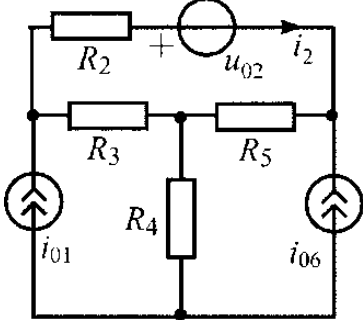
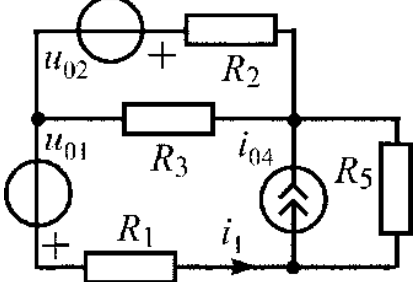
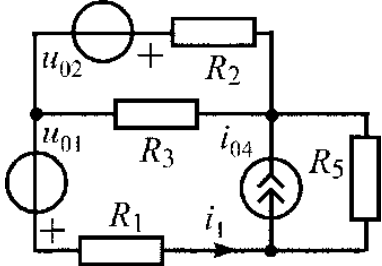
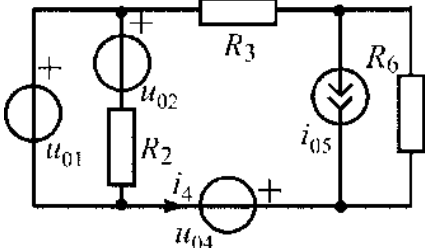
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
7	<p>Параметры элементов приведенной цепи: $u_{05} = 10$ В, $i_{02} = 60$ мА, $R_1 = R_4 = R_6 = 100$ Ом, $R_3 = 50$ Ом. Чему равен частичный ток i''_{05}, создаваемый источником напряжения u_{05}?</p> 	<p>а) 0,25 А; б) 0,2 А; в) 0,5 А; г) 0,02 А</p>
8	<p>Параметры элементов приведенной цепи: $u_{05} = 12$ В, $i_{02} = 90$ мА, $R_1 = R_3 = R_4 = R_6 = 100$ Ом. Чему равен частичный ток i'_1, создаваемый источником тока i_{02}?</p> 	<p>а) 0,25 А; б) 0,2 А; в) 0,03 А; г) 0,02 А</p>
9	<p>При расчете методом наложения число вспомогательных схем для расчета частичных токов равно</p>	<p>а) числу независимых источников напряжения; б) числу независимых источников тока; в) числу независимых источников напряжения и тока; г) числу резистивных сопротивлений в цепи</p>
10	<p>Дана следующая схема.</p>  <p>Как будет выглядеть схема для расчета частичных токов, создаваемых источником напряжения U_{05}?</p>	<p>а)  б) </p> <p>в)  г) </p>

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
11	<p>Дана следующая схема.</p>  <p>Как будет выглядеть схема для расчета частичных токов, создаваемых источником тока i_{02}?</p>	<p>а)  б) </p> <p>в)  г) </p>
12	<p>Уравнение для узла 1 по методу узловых напряжений для приведенной схемы</p> 	<p>а) $\left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_8}\right) \cdot U_{1y} - \left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot U_{2y} = i_{01} - i_{04}$;</p> <p>б) $\left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_8}\right) \cdot U_{1y} - \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot U_{2y} = i_{01} - i_{04}$;</p> <p>в) $\left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_8}\right) \cdot U_{1y} - \frac{1}{R_2} \cdot U_{2y} = i_{01} - i_{04}$;</p> <p>г) $-\frac{1}{R_2} \cdot U_{2y} + \left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot U_{1y} = i_{07}$</p>
13	<p>Уравнение для узла 2 по методу узловых напряжений для приведенной схемы</p> 	<p>а) $\left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_8}\right) \cdot U_{1y} - \left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot U_{2y} = i_{01} - i_{04}$;</p> <p>б) $\left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_8}\right) \cdot U_{1y} - \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot U_{2y} = i_{01} - i_{04}$;</p> <p>в) $\left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_8}\right) \cdot U_{1y} - \frac{1}{R_2} \cdot U_{2y} = i_{01} - i_{04}$;</p> <p>г) $-\frac{1}{R_2} \cdot U_{1y} + \left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot U_{2y} = i_{07}$</p>
14	<p>Уравнение для узла 1 по методу узловых напряжений для приведенной схемы</p> 	<p>а) $\left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_8}\right) \cdot U_{1y} - \left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot U_{2y} = i_{01} - i_{07}$;</p> <p>б) $\left(\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_8}\right) \cdot U_{1y} - \frac{1}{R_2} \cdot U_{2y} = i_{01} - i_{07}$;</p> <p>в) $\left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_8}\right) \cdot U_{1y} - \frac{1}{R_2} \cdot U_{2y} = i_{01} - i_{03}$;</p> <p>г) $-\frac{1}{R_2} \cdot U_{2y} + \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_2}\right) \cdot U_{1y} = i_{03} - i_{01}$</p>

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
15	<p>Уравнение для узла 2 по методу узловых напряжений для приведенной схемы</p> 	<p>а) $\left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_8}\right) \cdot U_{1y} - \left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot U_{2y} = i_{01} - i_{07};$ б) $\left(\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_8}\right) \cdot U_{1y} - \frac{1}{R_2} \cdot U_{2y} = i_{01} - i_{07};$ в) $\left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_8}\right) \cdot U_{1y} - \frac{1}{R_2} \cdot U_{2y} = i_{01} - i_{03};$ г) $-\frac{1}{R_2} \cdot U_{1y} + \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_2}\right) \cdot U_{2y} = i_{03} - i_{01}$</p>
16	<p>Уравнение для узла 1 по методу узловых напряжений для приведенной схемы</p> 	<p>а) $\left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_2}\right) \cdot U_{1y} - \frac{1}{R_4} \cdot U_{2y} = i_{01} + \frac{U_{04}}{R_4} - i_{03};$ б) $\left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_6}\right) \cdot U_{1y} - \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6}\right) \cdot U_{2y} = i_{01} - i_{03};$ в) $-\frac{1}{R_4} \cdot U_{2y} + \left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot U_{1y} = -\frac{U_{04}}{R_4};$ г) $-\frac{1}{R_2} \cdot U_{2y} + \left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot U_{1y} = i_{03}$</p>
17	<p>Уравнение для узла 2 по методу узловых напряжений для приведенной схемы</p> 	<p>а) $\left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_2}\right) \cdot U_{1y} - \frac{1}{R_4} \cdot U_{2y} = i_{01} + \frac{U_{04}}{R_4} - i_{03};$ б) $\left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_6}\right) \cdot U_{1y} - \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6}\right) \cdot U_{2y} = i_{01} - i_{03};$ в) $-\frac{1}{R_4} \cdot U_{1y} + \left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot U_{2y} = -\frac{U_{04}}{R_4};$ г) $-\frac{1}{R_2} \cdot U_{2y} + \left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot U_{1y} = i_{03}$</p>
18	<p>Уравнение для 1-го контура по методу контурных токов имеет следующий вид</p> 	<p>а) $(R_2 + R_3 + R_5) \cdot i_{1k} - R_3 \cdot i_{2k} + R_5 \cdot i_{3k} = U_{03} - U_{02} + U_{05};$ б) $\left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot i_{1k} - \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot i_{2k} = U_{03} - U_{02} + U_{05};$ в) $(R_2 + R_4 + R_5) \cdot i_{1k} - R_3 \cdot i_{2k} + R_5 \cdot i_{3k} = U_{03} - U_{02} + U_{05};$ г) $(R_2 + R_3 + R_5) \cdot i_{1k} + R_3 \cdot i_{2k} - R_5 \cdot i_{3k} = U_{03} - U_{02} + U_{05}$</p>

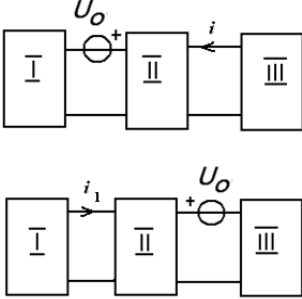
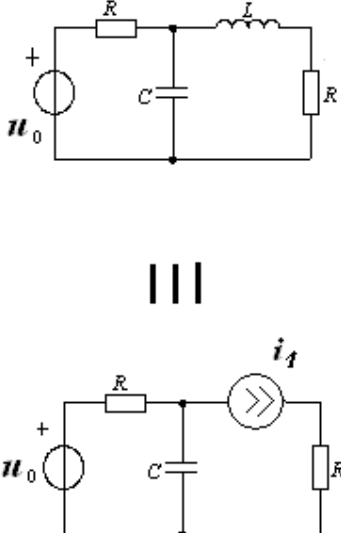
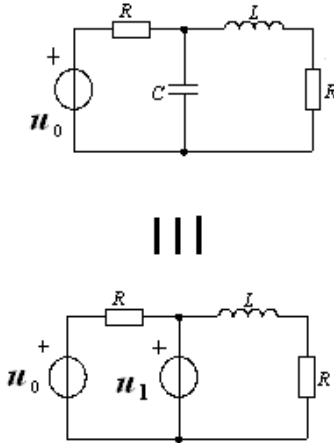
№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
19	<p>Уравнение для 2-го контура по методу контурных токов имеет следующий вид</p> 	<p>а) $-R_3 \cdot i_{1k} + (R_1 + R_4 + R_3) \cdot i_{2k} - R_4 \cdot i_{3k} = U_{03} - U_{02} + U_{05}$;</p> <p>б) $\left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot i_{1k} - \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot i_{2k} = U_{03} - U_{02} + U_{05}$;</p> <p>в) $-R_3 \cdot i_{1k} + (R_1 + R_4 + R_3) \cdot i_{2k} - R_4 \cdot i_{3k} = -U_{03} + U_{01} + U_{04}$;</p> <p>г) $(R_2 + R_3 + R_5) \cdot i_{1k} + R_3 \cdot i_{2k} - R_5 \cdot i_{3k} = U_{03} - U_{02} + U_{05}$</p>
20	<p>Чему равно число неизвестных контурных токов в приведенной схеме?</p> 	<p>а) 3;</p> <p>б) 2;</p> <p>в) 1;</p> <p>г) 4</p>
21	<p>Чему равно число неизвестных контурных токов в приведенной схеме?</p> 	<p>а) 3;</p> <p>б) 2;</p> <p>в) 1;</p> <p>г) 4</p>
22	<p>Чему равно число неизвестных контурных токов в приведенной схеме?</p> 	<p>а) 3;</p> <p>б) 1;</p> <p>в) 2;</p> <p>г) 4</p>

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
23	<p>Уравнение для 2-го контура по методу контурных токов имеет следующий вид</p> 	<p>а) $R_3 \cdot i_{1k} + (R_5 + R_4 + R_3) \cdot i_{2k} - R_5 \cdot i_{3k} = U_{01} - U_{03} - U_{05}$;</p> <p>б) $\left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot i_{1k} - \left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot i_{2k} = U_{03} - U_{01} + U_{05}$;</p> <p>в) $-R_3 \cdot i_{1k} + (R_5 + R_4 + R_3) \cdot i_{2k} - R_4 \cdot i_{3k} = U_{05} - U_{03} + U_{01}$;</p> <p>г) $-R_3 \cdot i_{1k} + (R_5 + R_1 + R_3) \cdot i_{2k} - R_5 \cdot i_{3k} = U_{05} - U_{03} - U_{01}$</p>
24	<p>Замените цепь, внешнюю относительно ветви с сопротивлением R_2, эквивалентным генератором напряжения. Чему равно $u_{эГ}$?</p> 	<p>а) $u_{эГ} = -i_{05} \cdot R_4 + \frac{u_{01}}{R_1 + R_3} \cdot R_3 + u_{02}$;</p> <p>б) $u_{эГ} = i_{05} \cdot R_4 + \frac{u_{01}}{R_1 + R_3} \cdot R_3 + u_{02}$;</p> <p>в) $u_{эГ} = -i_{05} \cdot R_4 + \frac{u_{01}}{R_1 + R_3} \cdot R_3 - u_{02}$;</p> <p>г) $u_{эГ} = -i_{05} \cdot R_4 - \frac{u_{01}}{R_1 + R_3} \cdot R_3 + u_{02}$</p>
25	<p>Замените цепь, внешнюю относительно ветви с сопротивлением R_2, эквивалентным генератором напряжения. Чему равно $R_{эГ}$?</p> 	<p>а) $R_{эГ} = R_1 + R_3 + R_4$;</p> <p>б) $R_{эГ} = \frac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_4} + R_3$;</p> <p>в) $R_{эГ} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} + R_4$;</p> <p>г) $R_{эГ} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}}$</p>
26	<p>Замените цепь, внешнюю относительно ветви с сопротивлением R_2, эквивалентным генератором напряжения. Чему равно $u_{эГ}$?</p> 	<p>а) $u_{эГ} = -i_{01} \cdot R_3 - i_{06} \cdot R_5 + u_{02}$;</p> <p>б) $u_{эГ} = i_{01} \cdot R_3 - i_{06} \cdot R_5 - u_{02}$;</p> <p>в) $u_{эГ} = -i_{01} \cdot R_3 - i_{06} \cdot R_5 - u_{02}$;</p> <p>г) $u_{эГ} = i_{01} \cdot R_3 + i_{06} \cdot R_5 + u_{02}$</p>

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
27	<p>Замените цепь, внешнюю относительно ветви с сопротивлением R_2, эквивалентным генератором напряжения. Чему равно $R_{эГ}$?</p> 	<p>а) $R_{эГ} = R_2 + R_3 + R_4$; б) $R_{эГ} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} + R_5$; в) $R_{эГ} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5} + R_3$; г) $R_{эГ} = R_5 + R_3$</p>
28	<p>Замените цепь, внешнюю относительно ветви с сопротивлением R_1, эквивалентным генератором напряжения. Чему равно $u_{эГ}$?</p> 	<p>а) $u_{эГ} = -i_{04} \cdot R_5 - \frac{u_{02}}{R_2 + R_3} \cdot R_5 + u_{01}$; б) $u_{эГ} = i_{04} \cdot R_5 + \frac{u_{02}}{R_2 + R_3} \cdot R_5 + u_{01}$; в) $u_{эГ} = i_{04} \cdot R_5 - \frac{u_{02}}{R_2 + R_3} \cdot R_5 - u_{01}$; г) $u_{эГ} = i_{04} \cdot R_5 - \frac{u_{02}}{R_2 + R_3} \cdot R_3 + u_{01}$</p>
29	<p>Замените цепь, внешнюю относительно ветви с сопротивлением R_1, эквивалентным генератором напряжения. Чему равно $R_{эГ}$?</p> 	<p>а) $R_{эГ} = R_2 + R_3 + R_5$; б) $R_{эГ} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_3 + R_2} + R_5$; в) $R_{эГ} = \frac{R_3 \cdot R_5}{R_3 + R_5} + R_2$; г) $R_{эГ} = R_5 + R_3$</p>
30	<p>Замените цепь, внешнюю относительно ветви с током i_4, эквивалентным генератором напряжения. Чему равно $R_{эГ}$?</p> 	<p>а) $R_{эГ} = R_2 + R_3 + R_6$; б) $R_{эГ} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_3 + R_2} + R_6$; в) $R_{эГ} = \frac{R_3 \cdot R_6}{R_3 + R_6} + R_2$; г) $R_{эГ} = R_6 + R_3$</p>

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
31	Теорема замещения	<p>а) если источник тока, подключенный к некоторой первой паре узлов линейной электрической цепи, составленной из пассивных двухполюсников, вызывает между второй парой узлов этой цепи некоторое напряжение, то этот же источник, будучи подключенным к этой второй паре узлов, вызывает на зажимах первой пары узлов прежнее напряжение;</p> <p>б) значения всех напряжений и токов в электрической цепи сохраняются неизменными, если любую ветвь цепи заменить источником напряжения, у которого задающее напряжение равно напряжению этой ветви до указанной замены;</p> <p>в) если источник напряжения, включенный в некоторую ветвь линейной электрической цепи, вызывает в другой ветви этой цепи некоторый ток, то тот же источник напряжения, будучи перенесенным в эту вторую ветвь, вызовет в первой ветви прежний ток;</p> <p>г) значения всех напряжений и токов в электрической цепи сохраняются неизменными, если любую ветвь цепи заменить источником тока, у которого задающий ток равен току в этой ветви до указанной замены</p>
32	Теорема взаимности	<p>а) если источник тока, подключенный к некоторой первой паре узлов линейной электрической цепи, составленной из пассивных двухполюсников, вызывает между второй парой узлов этой цепи некоторое напряжение, то этот же источник, будучи подключенным к этой второй паре узлов, вызывает на зажимах первой пары узлов прежнее напряжение;</p> <p>б) значения всех напряжений и токов в электрической цепи сохраняются неизменными, если любую ветвь цепи заменить источником напряжения, у которого задающее напряжение равно напряжению этой ветви до указанной замены;</p>

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
32	Теорема взаимности	в) если источник напряжения, включенный в некоторую ветвь линейной электрической цепи, вызывает в другой ветви этой цепи некоторый ток, то тот же источник напряжения, будучи перенесенным в эту вторую ветвь, вызовет в первой ветви прежний ток; г) значения всех напряжений и токов в электрической цепи сохраняются неизменными, если любую ветвь цепи заменить источником тока, у которого задающий ток равен току в этой ветви до указанной замены
33	Ток $i = 2$ мА. Чему должен быть равен задающий ток источника тока i_1 , чтобы схемы были эквивалентны?	а) $i_1 = 2,5$ мА; б) $i_1 = 2$ мА; в) $i_1 = 1$ мА; г) $i_1 = 0,2$ мА
34	Напряжение $u = 5$ В. Чему должно быть равно задающее напряжение источника напряжения u_1 , чтобы схемы были эквивалентны	а) $u_1 = 2$ В; б) $u_1 = 0,5$ В; в) $u_1 = 5$ В; г) $u_1 = 4$ В
35	Теорема взаимности справедлива	а) в нелинейных цепях, не содержащих зависимых источников; б) в линейных цепях, не содержащих зависимых источников; в) в линейных цепях с зависимыми источниками; г) в нелинейных цепях с зависимыми источниками
36	Чему равно напряжение u_1 , если $i_0 = 1$ мА и $u = 5$ В?	а) 1 В; б) 10 В; в) 4 В; г) 5 В

№ п/п	Текст вопроса	Вариант ответа
37	<p>Чему равен ток i_1, если $u_0 = 2$ В и $i = 1$ мА?</p> 	<p>а) 2 мА; б) 4 мА; в) 0,5 мА; г) 1 мА</p>
38	<p>Чему должен быть равен задающий ток источника тока i_1, чтобы схемы были эквивалентными при $u_0 = 10$ В, $R = 1$ кОм?</p> 	<p>а) 2 мА; б) 10 мА; в) 5 мА; г) 1 мА</p>
39	<p>Чему должно быть равно задающее напряжение источника напряжения u_1, чтобы схемы были эквивалентными при $u_0 = 10$ В, $R = 1$ кОм?</p> 	<p>а) 10 В; б) 5 В; в) 2 В; г) 1 В</p>

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте принцип наложения. Какие цепи подчиняются этому принципу?
2. Каков порядок анализа цепи методом наложения?
3. Относительно каких неизвестных составляются уравнения токов ветвей? Чему равно общее число этих уравнений?
4. Каков порядок анализа цепи методом токов ветвей?
5. Относительно каких переменных составляются уравнения при решении задачи методом узловых напряжений? Что понимают под узловым напряжением k -го узла?
6. Как записывается каноническая система узловых уравнений?
7. Сколько независимых уравнений нужно составить для цепи по методу узловых напряжений?
8. Что представляют собой коэффициенты и свободные члены системы узловых уравнений?
9. Как учитываются источники напряжения в системе узловых уравнений?
10. Как найти токи в элементах цепи, если известны узловые напряжения?
11. Относительно каких неизвестных составляются уравнения контурных токов? Что понимают под контурным током k -го контура?
12. Запишите уравнения контурных токов в канонической форме.
13. Как рассчитывается собственное сопротивление k -го контура R_{kk} ? Как рассчитывается взаимное сопротивление R_{kl} общей ветви для k -го и l -го контуров, и как определяется знак, с которым R_{kl} записывается в уравнение? Для каких цепей $R_{kl} = R_{lk}$?
14. Как составляются правые части уравнений контурных токов?
15. Как учитываются источники тока в уравнениях контурных токов?
16. В каких задачах целесообразно использовать метод эквивалентного генератора?
17. Как рассчитываются параметры эквивалентного генератора напряжения?
18. Как рассчитываются параметры эквивалентного генератора тока?

Список литературы

1. *Белецкий, А. Ф.* Теория линейных электрических цепей : учебник / А. Ф. Белецкий. – 2-е изд. – СПб. : Лань, 2009. – 544 с.
2. *Бакалов, В. П.* Основы теории цепей : учебник для вузов / В. П. Бакалов, В. Ф. Дмитриков, Б. Н. Крук. – 3-е изд. – М. : Горячая линия – Телеком, 2009. – 596 с.
3. *Белецкий, А. Ф.* Анализ нелинейных резистивных цепей / А. Ф. Белецкий, В. Ф. Дмитриков, Ю. И. Лыпарь ; ЛЭИС. – Л., 1990.
4. *Белецкий, А. Ф.* Нелинейные преобразования колебаний и цепи с обратной связью : учеб. пособие для спец. 2305, 2306, 2307 / А. Ф. Белецкий, В. Ф. Дмитриков ; ЛЭИС. – Л., 1991.

**Зайцева Зинаида Викторовна
Логвинова Нина Константиновна
Сергеев Валерий Варламович
Шушпанов Дмитрий Викторович**

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Часть 1

КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Разделы 1 и 2

Учебное пособие

Ответственный редактор *З. В. Зайцева*

Редактор *И. И. Щенсяк*

План издания 2018 г., п. 134а

Подписано к печати 07.02.2018
Объем 3,5 усл.-печ. л. Тираж 32 экз. Заказ 848

Редакционно-издательский отдел СПбГУТ
193232 СПб., пр. Большевиков, 22

Отпечатано в СПбГУТ