УЧЕБНИК
СИБИРСКОГО
ФЕДЕРАЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА

ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

Допущено учебно-методическим советом
Сибирского федерального университета
в качестве учебника для студентов, обучающихся по специальностям
10.03.01 «Информационная безопасность»
и 10.05.01 «Компьютерная безопасность»,
протокол № 01 от 24.01.2022 г.

Красноярск
СФУ
2022

УДК 621.382(07)
ББК 32.85я73
Э455

Р е ц е н з е н т ы:
Е. Б. Соловьева, доктор технических наук, заведующая кафедрой теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина);
С. М. Плотников, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации производственных процессов Сибирского государственного аэрокосмического университета им. М. Ф. Решетнева

Э455 **Электроника и схемотехника** : учебник / В. П. Довгун, А. Ф. Синяговский, И. Г. Важенина, В. В. Новиков ; отв. ред. В. П. Довгун. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2022. – 580 с.
ISBN 978-5-7638-4573-0

Рассмотрены основы теории электронных цепей и сигналов, элементная база современной микроэлектроники, основы аналоговой и цифровой схемотехники, методы компьютерного моделирования электронных устройств. Изложение теоретического материала сопровождается примерами расчета аналоговых и цифровых электронных устройств.

Предназначен для аудиторной и самостоятельной работы студентов, обучающихся по специальностям 10.03.01 «Информационная безопасность» и 10.05.01 «Компьютерная безопасность».

Электронный вариант издания см.:
http://catalog.sfu-kras.ru

УДК 621.382(07)
ББК 32.85я73

Учебное издание

Довгун Валерий Петрович, **Синяговский** Артем Феликсович
Важенина Ирина Георгиевна, **Новиков** Виктор Валерьевич

ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

Учебник

Редактор *Т. И. Тайгина*
Корректор *В. Р. Наумова*
Компьютерная верстка *Д. Р. Мазай*

Подписано в печать 20.06.2022. Печать плоская. Формат 70×100/16
Бумага офсетная. Усл.-печ. л. 37,0. Тираж 500 экз. Заказ № 14523

Библиотечно-издательский комплекс
Сибирского федерального университета
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-16; http://bik.sfu-kras.ru
E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru

ISBN 978-5-7638-4573-0
© Сибирский федеральный университет, 2022

Памяти **Платона Николаевича Матханова**

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебник предназначен для самостоятельной работы студентов, изучающих дисциплины «Электроника и схемотехника», а также «Электротехника и электроника», «Электротехника, электроника, схемотехника». Его основой является курс лекций, которые авторы читают в Сибирском федеральном университете для студентов института космических и информационных технологий. В учебнике развит единый подход к изучению процессов, лежащих в основе функционирования устройств аналоговой и цифровой обработки сигналов.

Книга состоит из трех разделов: «Основы теории цепей», «Элементная база электроники», «Основы аналоговой и цифровой схемотехники».

В первом разделе даны основы теории электрических цепей. Традиционный базовый набор схемных элементов (резистивные, емкостные, индуктивные, независимые и управляемые источники), дополнен идеальными операционным усилителем и ключом. Это дает возможность уже в начале изучения дисциплины анализировать модели типовых аналоговых и цифровых устройств.

Значительное внимание уделено изучению методов расчета переходных процессов – основному виду анализа при моделировании цифровых схем. Сформулированы параметры, определяющие быстродействие базовых логических элементов цифровых устройств: постоянная времени, задержка распространения, энергия переключения.

Рассмотрены методы анализа линейных цепей – символический, операторный и спектральный. Применение преобразований Лапласа и Фурье дано как обобщение символического метода на случай напряжений и токов несинусоидальной формы. Такое изложение материала позволяет сделать первый раздел дисциплины более логичным и компактным.

Второй раздел посвящен изучению принципов функционирования, характеристик и параметров электронных приборов: диодов, биполярных и МОП-транзисторов. Значительное внимание уделено МОП-транзисторам как основным элементам современной микроэлектроники.

В третьем разделе изложены основы схемотехники аналоговых устройств: усилителей, фильтров, генераторов периодических колебаний, а также принципы их функционирования и реализация на интегральных операционных усилителях.

Описана схемотехника базовых логических элементов на биполярных и МОП-транзисторах, типовых комбинационных и последовательностных цифровых устройств, аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей. Подробно рассмотрены свойства и характеристики основных элементов современных цифровых интегральных схем – логических элементов на комплементарных МОП-транзисторах.

Заключительная 18 глава учебника посвящена методам анализа электронных цепей, используемым в современных программах схемотехнического моделирования (методы численного интегрирования уравнений состояния, решение уравнений нелинейных цепей, дискретные резистивные схемы замещения индуктивного и емкостного элементов). Приведено описание моделей электронных компонентов (полупроводникового диода, биполярного и МОП-транзистора), макромоделей аналоговых интегральных схем. Дана краткая характеристика программ схемотехнического моделирования.

Материал главы может использоваться для знакомства с современными алгоритмами математического моделирования электронных цепей.

Изложение теоретического материала сопровождается примерами расчета типовых устройств обработки аналоговых и цифровых сигналов – усилителей, фильтров, генераторов периодических колебаний, базовых логических элементов. В каждую главу учебника включены задачи для самостоятельного решения.

Первый раздел учебника (главы 1–8) написан В. П. Довгуном, И. Г. Важениной и В. В. Новиковым. Второй и третий разделы (главы 9–17) подготовлены А. Ф. Синяговским и В. П. Довгуном. Глава 18 написана В. П. Довгуном.

Авторы благодарят рецензентов профессора Е. Б. Соловьеву и профессора С. М. Плотникова за конструктивные замечания, способствовавшие улучшению содержания книги.

Авторы признательны редактору Издательства СФУ Т. И. Тайгиной за высокое мастерство и терпение, проявленное при работе над рукописью.

ВВЕДЕНИЕ

В основе современных информационных технологий лежат достижения электроники – области науки и техники, занимающейся исследованием и разработкой устройств, предназначенных для передачи, обработки и хранения информации. Ее основы заложены в работах Г. Кирхгофа, Г. Ома, М. Фарадея, Дж. Максвелла, Г. Герца. Электроника возникла в начале 20 века, после создания электродинамики Дж. Максвеллом и изобретения А. С. Поповым и Г. Маркони первых систем передачи и приема сигналов с помощью электромагнитных волн.

Началом первого этапа развития электроники считается 1904 год, когда английским ученым Д. Флемингом была изготовлена первая электронная лампа – диод. Позднее был предложен триод – лампа с управляющим электродом, способная усиливать и генерировать электрические сигналы. Триод стал первым управляемым электронным прибором. До 1950-х годов электроника развивалась в основном по пути совершенствования электровакуумных приборов.

Второй этап начался в 1947 году с изобретения биполярного транзистора американскими учеными У. Браттейном, Д. Бардиным и В. Шокли. Новый прибор мог усиливать и генерировать электрические сигналы, а также выполнять функции электронного ключа. За это изобретение его создатели были удостоены в 1956 году Нобелевской премии по физике.

Первые транзисторы изготавливали на основе полупроводника *германия*. Рабочая температура таких приборов не превышала 70 °С. Во многих случаях этого было недостаточно. Во второй половине 1950-х годов место германия занял другой полупроводник – *кремний*. Рабочая температура кремниевых транзисторов составляет 120–150 °С. Для кремниевых приборов была разработана *планарная технология*, позволяющая разместить на одной пластине полупроводника миллионы транзисторов.

Появление планарной технологии и совершенствование методов выращивания кристаллов кремния привело к созданию в 1960-е годы нового полупроводникового прибора – транзистора со структурой «металл – окисел – полупроводник» (МОП-транзистор).

Третий этап развития электроники связан с появлением в конце 1950-х годов *микроэлектроники* и началом разработки и производства качественно нового типа приборов – интегральных микросхем. Интегральная микросхема, или просто интегральная схема (ИС), – совокупность большого числа электронных компонентов, изготовленных в едином технологическом цикле на кристалле полупроводникового материала, выполняющая функции преобразования и обработки сигналов. Использование ИС позволяет резко уменьшить габариты и массу электронной аппаратуры, снизить энергопотребление и одновременно повысить ее надежность.

Первая цифровая интегральная схема содержала всего 12 транзисторов. Но уже через несколько лет появились большие интегральные схемы (БИС), содержащие тысячи элементов. В настоящее время на кристалле сверхбольшой интегральной схемы (СБИС) расположены миллионы транзисторов, геометрические размеры которых составляют несколько нанометров.

В эпоху микроэлектроники кардинально изменилась не только цифровая, но и аналоговая схемотехника. Создание интегральных операционных усилителей связано с именем Р. Видлара, определившего на многие годы структуру аналоговых интегральных схем.

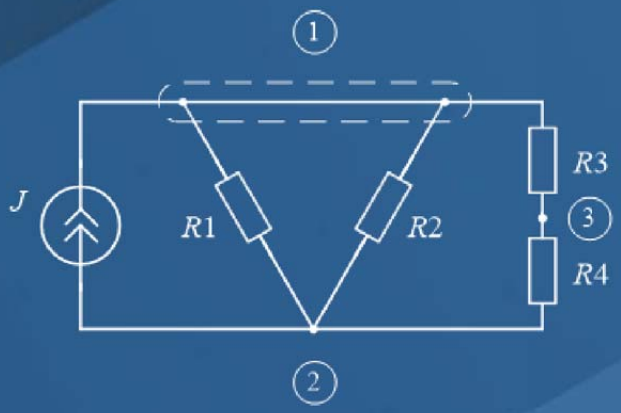
Начало 1970-х годов ознаменовалось созданием *микропроцессоров*. Первый микропроцессор Intel 4004, разработанный в фирме Intel под руководством Ф. Фаггина и Т. Хоффа, содержал 2300 транзисторов и работал на частоте 750 кГц. Современные микропроцессоры содержат миллиарды транзисторов и работают на частотах, достигающих нескольких гигагерц. Они заменяют целые блоки и устройства радиоэлектронной аппаратуры предшествующих поколений. Благодаря микропроцессорам компьютеры стали массовым, общедоступным продуктом, широко используются для автоматизации технологических процессов и в быту.

Развитие микроэлектроники привело к возникновению в 1970–80-е годы нового направления – *наноэлектроники*; ее цель – создание твердотельных приборов и устройств размером менее 100 нм. Технологии наноэлектроники существенно улучшают свойства и характеристики микроэлектронных приборов, а также позволяют создавать новые типы полупроводниковых устройств. Важную роль в создании наноэлектроники сыграли работы Ж. И. Алферова, Г. Кремера, У. Шокли. С дальнейшим развитием наноэлектроники связан прогресс в суперкомпьютерах, средствах телекоммуникаций, системах управления.

Значительное влияние на теорию и практику проектирования аналоговых и цифровых устройств оказало развитие методов математического моделирования электронных цепей. Современное программное обеспечение, использующее эти методы, избавляет специалистов-схемотехников от рутинной работы, позволяет автоматизировать основные этапы проектирования и значительно сократить сроки разработки электронных устройств.

Необходимым условием для эффективного использования программ моделирования электронных цепей является понимание алгоритмов, используемых в этих программах, а также принципов построения моделей электронных компонентов. Неправильные выбор моделей, настройка и использование вычислительных алгоритмов могут дать ошибочные результаты. От будущих специалистов требуется понимание не только принципов действия и характеристик электронных устройств, но и методов математического моделирования таких устройств.

РАЗДЕЛ I



ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ

Глава 1
ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ЗАКОНЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

1.1 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

Основными величинами, характеризующими состояние цепи, являются ток и напряжение.

Ток в проводящей среде есть явление упорядоченного движения электрических зарядов под действием электрического поля. Как известно, ток проводимости в металлах представляет собой перемещение отрицательных зарядов (электронов), а в полупроводниках – перемещение как отрицательных (электроны), так и положительных (дырки) носителей заряда.

В каждый момент времени t ток характеризуется мгновенным значением, равным скорости изменения заряда во времени:

$$i = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}, \qquad (1.1)$$

здесь Δq – заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за интервал времени, равный Δt.

Единица измерения тока в системе СИ – ампер (А). В устройствах информационной электроники ток редко превышает несколько ампер. Часто используют меньшие величины тока: миллиамперы, 1 мА = 10^{-3} А; микроамперы, 1 мкА = 10^{-6} А; наноамперы, 1 нА = 10^{-9} А.

Ток является скалярной алгебраической величиной, которая может принимать как отрицательные, так и положительные значения. Для однозначного определения тока необходимо задать его направление. За направление тока принимают направление движения положительных зарядов. Его выбирают произвольно и показывают стрелкой на выводах элемента или участка цепи (рис. 1.1).

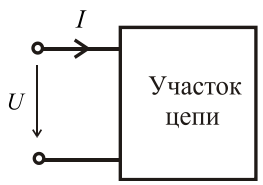


Рис. 1.1. Обозначения направлений тока и напряжения

Если в результате расчета величина тока оказывается положительной, то это означает, что его направление совпадает

с выбранным положительным направлением. Если ток отрицателен, он направлен противоположно выбранному направлению.

Перенос зарядов в цепи связан с преобразованием или потреблением энергии. Для определения энергии, затрачиваемой на перемещение заряда, используют другую величину – напряжение.

Напряжение (разность потенциалов) между двумя точками цепи определяется количеством энергии, затрачиваемой на перемещение заряда из одной точки в другую:

$$u = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta w}{\Delta q} = \frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}q}. \qquad (1.2)$$

Единица измерения напряжения в системе СИ – вольт (В). Напряжение различных электронных устройств варьируется в широких пределах. Например, для работы цветного кинескопа требуется напряжение около 20 000 В (20 кВ), а для питания микропроцессоров – менее 3 В.

Напряжение – скалярная величина, может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Для однозначного определения знака напряжения выбирают положительное направление его отсчета, которое показывают стрелкой, направленной от одного зажима к другому, либо знаками «+», «–» (рис. 1.1).

В теории электрических цепей используется термин *падение напряжения*. Он характеризует напряжение на зажимах участка цепи, через которые проходит ток.

Положительную полярность напряжения удобно выбирать согласованной с положительным направлением тока. В этом случае стрелки, обозначающие ток и напряжение, совпадают.

Важно понимать, что стрелками на схемах обозначают не направления физических величин, а положительные направления, которые выбирают произвольно. Если токи и напряжения являются переменными величинами, изменяющими с течением времени свои направления на обратные, то положительным будет одно из этих направлений. В те промежутки времени, когда токи и напряжения направлены в сторону положительных значений, их мгновенные значения считаются положительными.

Согласно (1.1) и (1.2) энергия, затрачиваемая на перемещение заряда, определяется формулой

$$w = \int_0^q u\mathrm{d}q = \int_{-\infty}^{t} ui\mathrm{d}\tau. \qquad (1.3)$$

В (1.3) принято, что при $t = -\infty$ энергия $w = 0$.

Мгновенная мощность участка цепи равна производной энергии по времени:

$$p = \frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}t} = ui\,.$$

Мощность измеряется в ваттах (Вт) и является алгебраической величиной. При согласованном направлении тока и напряжения мощность положительна ($p > 0$), т.е. она потребляется участком цепи. При встречном направлении мощность отрицательна ($p < 0$), т.е. этот участок цепи является источником энергии.

По характеру изменения во времени различают постоянные, периодические и непериодические токи и напряжения.

Для обозначения электрических величин используют прописные и строчные буквы. Прописными буквами обозначают постоянные напряжения, токи и мощности: U, I, P. Мгновенные значения переменных величин обозначают малыми (строчными) буквами: u, i, p.

1.2 ДВУХПОЛЮСНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Исследование процессов, происходящих в реальных цепях, основано на идеализации элементов, составляющих цепь. Под элементами в теории цепей понимают не реальные устройства, а их идеализированные модели, обладающие определенными свойствами физических прототипов. Такими идеализированными элементами являются резистивный, индуктивный и емкостный элементы, а также независимые и управляемые источники напряжения и тока. Соединяя между собой идеализированные элементы, получают модель, или схему замещения, приближенно отображающую процессы в реальном электронном устройстве. Чем сложнее схема замещения, тем точнее она отражает свойства реальной электронной цепи.

Таким образом, идеализированные элементы являются «кирпичиками», из которых строятся модели реальных электронных устройств.

РЕЗИСТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ. Это двухполюсный элемент (рис. 1.2, *а*, *б*), свойства которого определяются его вольт-амперной характеристикой (ВАХ) – зависимостью тока от напряжения или напряжения от тока. Резистивный элемент моделирует процесс необратимого преобразования электромагнитной энергии в тепло и другие виды энергии, при этом запасание энергии в электромагнитном поле отсутствует.

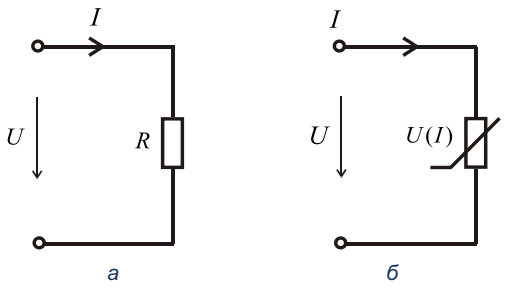


Рис. 1.2. Условное обозначение линейного (*а*) и нелинейного (*б*) резистивного элемента

По своим свойствам к идеальному резистивному элементу близки проволочный реостат, лампа накаливания, полупроводниковый диод. Вольт-амперные характеристики резистивных элементов отличаются большим разнообразием (рис. 1.3).

Если вольт-амперная характеристика резистивного элемента – прямая, проходящая через начало координат, его называют *линейным*. Условное обозначение линейного резистора показано на рис. 1.2, *а*. Любой реальный элемент можно рассматривать как линейный только в определенном диапазоне изменения напряжений и токов. Для линейного резистора связь между напряжением и током определяется *законом Ома*:

$$u = Ri; \quad I = Gu. \tag{1.4}$$

Этот закон в 1827 году установил немецкий физик Г. С. Ом. В форму лах (1.4) коэффициенты пропорциональности R и G называют *сопротивлением* и *проводимостью*. В соответствии с законом Ома мощность, поглощаемая резистором,

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R}.$$

Параметры *нелинейного* элемента зависят от величины тока или напряжения на его зажимах. Условное обозначение нелинейного резистора показано на рис. 1.2, *б*.

Вольт-амперные характеристики нелинейных резистивных элементов весьма разнообразны. Если характеристика расположена в первом и третьем квадрантах (кривая 1 на рис. 1.3), то элемент является пассивным, поскольку мгновенная мощность $p = ui$ положительна. Если

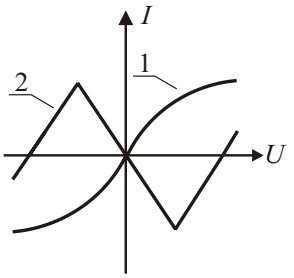


Рис. 1.3. Примеры ВАХ нелинейных резисторов

какой-либо участок ВАХ находится во втором или четвертом квадрантах (кривая 2 на рис. 1.3), то произведение напряжения и тока отрицательно, что соответствует генерированию мощности.

Для каждой точки ВАХ нелинейного резистора можно определить *статическое* и *динамическое* сопротивления. Статическим сопротивлением называют отношение постоянного напряжения нелинейного элемента к току в нем:

$$R_{\text{ст}} = \frac{U}{I}.$$

Статическое сопротивление обратно пропорционально тангенсу угла наклона прямой, проведенной из начала координат в выбранную точку ВАХ (рис. 1.4):

$$R_{\text{ст}} = k / \operatorname{tg}(\alpha). \qquad (1.5)$$

Динамическое сопротивление нелинейного резистора – это отношение малых приращений напряжения и тока:

$$R_{\text{д}} = \mathrm{d}u / \mathrm{d}i.$$

Оно характеризует элемент при малых изменениях напряжения и тока вблизи выбранной точки ВАХ. Динамическое сопротивление обратно пропорционально тангенсу угла наклона касательной, проведённой к выбранной точке ВАХ (рис. 1. 4):

$$R_{\text{д}} = k / \operatorname{tg}(\beta). \qquad (1.6)$$

Коэффициент пропорциональности k в формулах (1.5) и (1.6) равен отношению масштабных коэффициентов по осям напряжений и токов: $k = \mu_U / \mu_I$.

Вольт-амперные характеристики нелинейных элементов могут иметь немонотонный характер. В этом случае имеется участок характеристики с отрицательным динамическим сопротивлением. Примером может служить *N*-образная ВАХ туннельного диода (рис. 1.5). На интервале 0,1–0,7 В динамическое сопротивление туннельного диода отрицательно.

Вольт-амперная характеристика (рис. 1.5) является однозначной функцией напряжения, поскольку каждому значению напряжения соответствует одно значение тока. Такие ВАХ называют *характеристиками, управляемыми напряжением*.

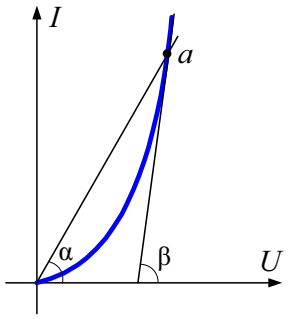


Рис. 1.4. Определение статического и динамического сопротивлений резистора

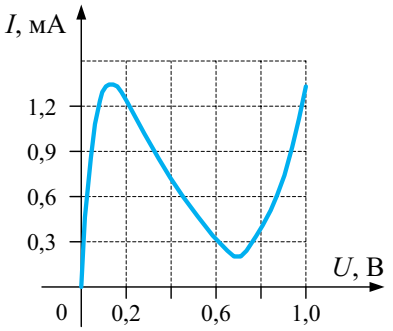


Рис. 1.5. ВАХ туннельного диода

Некоторые электронные приборы имеют характеристики *S*-образной формы, являющиеся однозначными функциями тока. Здесь каждому значению тока соответствует определенное значение напряжения. Такие ВАХ называют *характеристиками*, *управляемыми током*.

НЕЗАВИСИМЫЕ ИСТОЧНИКИ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА. *Источник напряжения* (рис. 1.6, *а*) – это двухполюсный элемент, напряжение которого не зависит от тока, отдаваемого во внешнюю цепь, и изменяется по заданному закону.

Вольт-амперная характеристика источника напряжения представляет собой прямую, параллельную оси токов (рис. 1.6, *б*).

Стрелка ЭДС источника напряжения направлена к его положительному выводу. Поэтому напряжение на внешних зажимах источника напряжения направлено в сторону, противоположную направлению ЭДС.

Внутреннее сопротивление идеального источника напряжения равно нулю, в противном случае напряжение будет зависеть от проходящего тока. Мощность такого источника бесконечна.

Если ЭДС источника напряжения равна нулю, то это эквивалентно короткому замыканию выводов, поскольку его внутреннее сопротивление равно нулю (рис. 1.7).

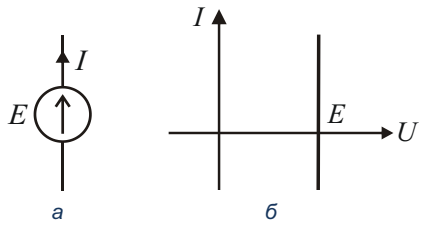


Рис. 1.6. Источник напряжения: обозначение (*а*); вольт-амперная характеристика (*б*)

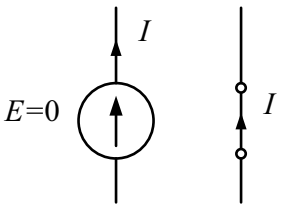


Рис. 1.7. Эквивалентная замена источника напряжения с нулевой ЭДС

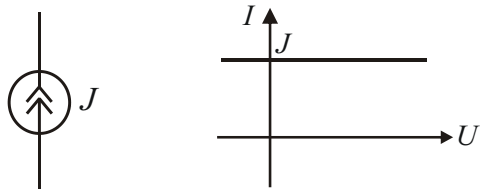


Рис. 1.8. Условное обозначение источника тока (*а*) и его вольт-амперная характеристика (*б*)

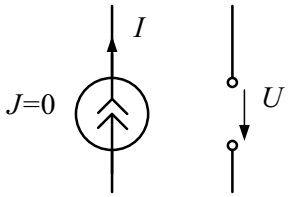


Рис. 1.9. Эквивалентная замена источника тока

Источник тока – двухполюсный элемент, ток которого не зависит от напряжения на его зажимах и изменяется в соответствии с заданным законом (рис. 1.8, *а*). Двойная стрелка показывает положительное направление тока источника.

Вольт-амперная характеристика источника тока представляет собой прямую, параллельную оси напряжений (рис. 1.8, *б*).

Внутренняя проводимость идеального источника тока равна нулю, в противном случае ток будет зависеть от напряжения на его зажимах. Соответственно, внутреннее сопротивление такого источника бесконечно велико. Мощность такого источника также бесконечна. Если ток источника тока равен нулю, то это эквивалентно разрыву его выводов (рис. 1.9).

Идеальные источники напряжения и тока в сочетании с другими элементами используются для моделирования реальных источников энергии.

1.3 УПРАВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ

Помимо независимых в теории цепей рассматривают зависимые, или управляемые, источники. Они представляют собой результат идеализации свойств реальных электронных приборов. *Управляемый источник* – это четырехполюсный резистивный элемент, состоящий из двух ветвей и двух пар выводов: входной и выходной. Он обладает следующими свойствами:

1) выходная величина пропорциональна входной;

2) выходная величина не влияет на входную.

Входной и выходной величинами управляемого источника могут быть токи или напряжения. Поэтому различают четыре вида управляемых источников.

Источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН), рис. 1.10, *а*. Входной ток этого элемента равен нулю: $I_1 = 0$. Напряжение

на выходе ИНУН пропорционально входному напряжению: $U_2 = KU_1$. Основным параметром является безразмерный *коэффициент усиления напряжения K*.

Источник тока, управляемый напряжением (ИТУН), рис. 1.10, *б*. Выходной ток этого источника пропорционален входному напряжению: $I_2 = SU_1$. Входной ток ИТУН равен нулю. Коэффициент пропорциональности *S*, имеющий размерность проводимости, называют передаточной проводимостью или *крутизной*.

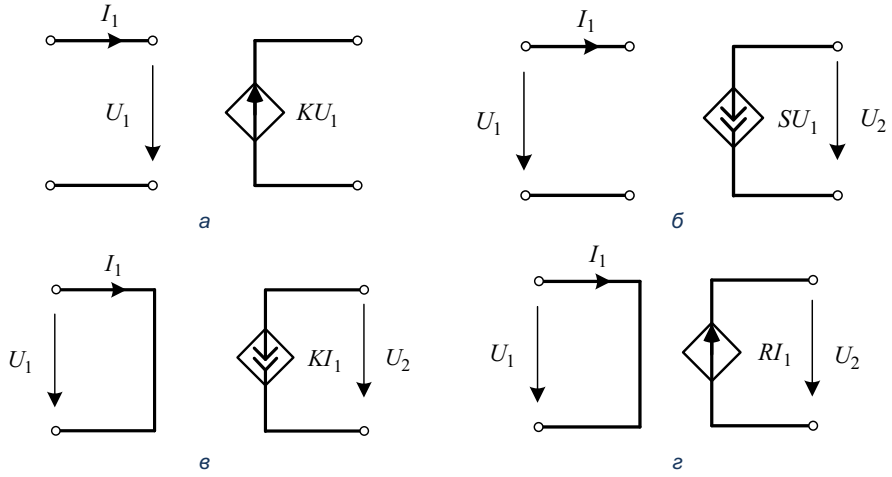


Рис. 1.10. Управляемые источники

Источник тока, управляемый током (ИТУТ), рис. 1.10, *в*. Поскольку входная ветвь представляет собой короткое замыкание, входное напряжение этого источника равно нулю: $U_1 = 0$. Выходной ток ИТУТ пропорционален входному: $I_2 = KI_1$. Безразмерный коэффициент пропорциональности *K* называют *коэффициентом усиления тока*.

Источник напряжения, управляемый током (ИНУТ), рис. 1.10, *г*. Напряжение на выходе ИНУТ пропорционально входному току: $U_2 = RI_1$. Управляющий параметр ИНУТ имеет размерность сопротивления.

Входные зажимы источников, управляемых током, замкнуты накоротко, а входные зажимы источников, управляемых напряжением, разомкнуты.

Управляемые источники являются необратимыми элементами, так как передача сигнала осуществляется только от входа к выходу. Для передачи сигнала от выхода к входу источника необходима внешняя *цепь обратной связи*.

1.4 ВЕТВИ, УЗЛЫ И КОНТУРЫ. ГРАФ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Электрическая цепь, образованная путем соединения между собой идеализированных элементов, является математической моделью реального электротехнического или электронного устройства. Чем больше элементов содержит такая цепь, тем точнее отображает она характеристики моделируемого устройства.

Основные понятия, характеризующие геометрическую конфигурацию, или *топологию*, электрических цепей, – ветвь, узел и контур.

Ветвь – участок цепи с двумя выводами. Ветвью может быть отдельный элемент либо группа элементов, соединенных последовательно или параллельно.

Узел – точка соединения двух или более ветвей. Место соединения двух ветвей удобно рассматривать в качестве узла при машинных расчетах. При ручных расчетах несколько элементов, соединенных последовательно или параллельно, удобно рассматривать как одну ветвь. Поэтому при ручных расчетах узлом считают соединение трех или более ветвей.

Нередко две точки цепи соединяют перемычкой, не имеющей сопротивления (рис. 1.11). Такой узел называют *расщепленным*.

Расщепленный узел можно стянуть в одну точку (рис. 1.12). При этом токи и напряжения элементов цепи не изменятся.

Контур – замкнутый путь, проходящий через ряд ветвей и узлов.

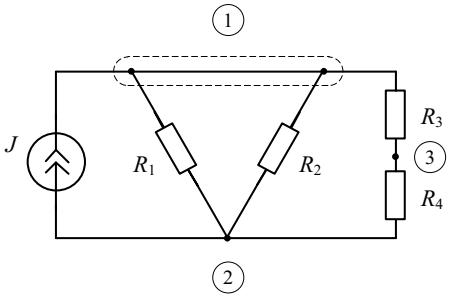


Рис. 1.11. Расщепленный узел

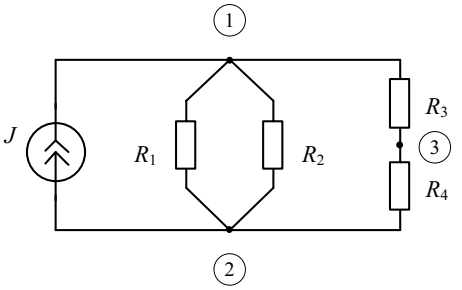


Рис. 1.12. Цепь с устраненным расщепленным узлом

Топологические свойства электрической цепи не зависят от типа и свойств элементов, образующих ветвь. Поэтому каждую ветвь цепи можно изобразить отрезком. В результате получим *граф* электрической цепи. Например, электрической цепи (рис. 1.13, *а*) соответствует граф (рис. 1.13, *б*).

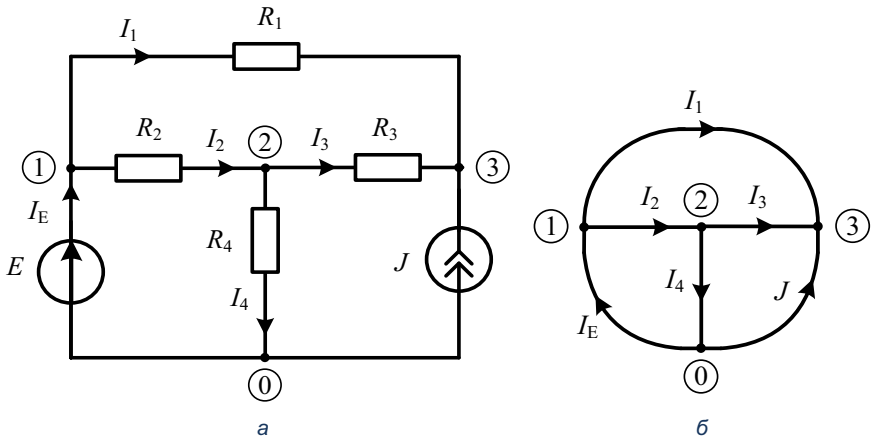


Рис. 1.13. Электрическая цепь (*а*) и ее граф (*б*)

Отрезок линии, соединяющий узлы электрической цепи, – это *ветвь* графа. Граф является связным, если любые два его узла связаны, т.е. соединены ветвями.

Часть графа называют *подграфом*. *Дерево* графа – связный подграф, включающий все узлы, но не содержащий контуров. Ветви графа, не вошедшие в дерево и дополняющие его до полного графа, называют *ветвями связи*. В общем случае для графа можно выбрать несколько деревьев.

Главный контур графа – это контур, состоящий из ветвей дерева и только одной ветви связи. Иными словами, главный контур образуется при включении ветви связи в дерево графа.

1.5 ЗАКОНЫ КИРХГОФА

Уравнения, описывающие поведение электрической цепи, составляют на основании законов Кирхгофа. Они определяют связь между токами и напряжениями элементов, образующих цепь. Уравнения, записаные согласно этим законам, называют уравнениями Кирхгофа.

Чтобы составить уравнения Кирхгофа, необходимо сначала выбрать положительные направления токов и напряжений ветвей. Положительное направление тока показывают стрелкой на выводе элемента, а направление напряжения – стрелкой, расположенной рядом с элементом. Направления токов и напряжений резистивных элементов выбирают согласованными. Сопротивление проводников, соединяющих элементы, очень мало по сравнению с сопротивлениями резисторов, и им пренебрегают.

Направления напряжений и токов источников следует рассмотреть особо. Стрелка ЭДС источника напряжения направлена к его положительному выводу. Поэтому напряжение на внешних зажимах этого источника направлено в сторону, противоположную ЭДС

ПЕРВЫЙ ЗАКОН КИРХГОФА определяет баланс токов в узлах электрической цепи: алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в узле электрической цепи, равна нулю

$$\sum_{k=1}^{n} i_k = 0 . \qquad (1.7)$$

В уравнении (1.7) токи, направленные от узла, записывают с положительным знаком, а направленные к узлу – отрицательные.

Система уравнений по первому закону Кирхгофа, составленная для всех узлов цепи, линейно зависима. В этом легко убедиться, сложив все уравнения. Поскольку ток каждой ветви входит в два уравнения с разными знаками, сумма тождественно равна нулю. Поэтому число независимых уравнений по первому закону Кирхгофа равно $n_y - 1$, где n_y – число узлов цепи.

ВТОРОЙ ЗАКОН КИРХГОФА устанавливает баланс напряжений в контуре цепи: алгебраическая сумма напряжений ветвей в контуре равна нулю

$$\sum_{k=1}^{n} u_k = 0 . \qquad (1.8)$$

Если напряжение ветви совпадает с направлением обхода контура, то напряжению приписывают знак плюс, если же нет – знак минус. Перенесем напряжения источников напряжения, равные ЭДС этих источников, в правую часть. Уравнение (1.8) примет вид

$$\sum_{k=1}^{n} u_k = \sum_{k=1}^{n} e_k .$$

В соответствии с последним равенством во всяком контуре электрической цепи алгебраическая сумма напряжений ветвей равна алгебраической сумме ЭДС источников.

Используя второй закон Кирхгофа, можно составить $n_в - n_y + 1$ независимых уравнений где $n_в$ – число ветвей цепи.

В качестве контуров удобно выбирать внутренние ячейки цепи. Можно воспользоваться и другим способом: выбрать по порядку контуры так, чтобы каждый следующий контур содержал по меньшей мере одну ветвь, не входящую в предыдущие контуры.

Законы Кирхгофа справедливы для любых цепей с сосредоточенными параметрами. Они выполняются как для линейных, так и для нелинейных цепей, при любой форме напряжений и токов.

ПОРЯДОК СОСТАВЛЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ПО ЗАКОНАМ КИРХГОФА. Выбрать положительные направления токов и напряжений ветвей. Полярности напряжений резисторов должны быть согласованы с направлениями токов. Направления токов источников напряжения должны совпадать с направлениями их ЭДС.

Составить уравнения по первому закону Кирхгофа для $n_y - 1$ узла.

Выбрать направления обхода контуров и записать уравнения по второму закону Кирхгофа. Сопротивление проводников, соединяющих элементы, очень мало по сравнению с сопротивлениями резисторов, и им можно пренебречь.

Решить полученную систему уравнений и определить токи и напряжения цепи.

Выполнить проверку необходимо после определения токов и напряжений. Для этого вычисленные значения переменных подставить в одно из уравнений, составленных по законам Кирхгофа.

При составлении уравнений в качестве неизвестных рассматривают либо токи, либо напряжения резистивных элементов.

В первом случае уравнения цепи составляют относительно неизвестных токов резистивных элементов и напряжений на источниках тока. Напряжения на резистивных элементах, входящие в уравнения по второму закону Кирхгофа, выражают через токи по закону Ома. Такой способ составления уравнений называют *методом токов ветвей*.

Число совместно решаемых уравнений в методе токов ветвей можно сократить, если контуры выбирать так, чтобы они не включали источники тока. Неизвестными тогда будут только токи резистивных элементов, а по второму закону Кирхгофа достаточно составить $n_в - n_y - n_{ИТ} + 1$ уравнений, где $n_{ИТ}$ – количество источников тока.

В других случаях уравнения цепи составляют относительно напряжений ветвей цепи (*метод напряжений ветвей*) или токов одних ветвей и напряжений других (*гибридный метод*).

В дальнейшем для решения задач будем использовать в основном метод токов ветвей.

1.6 АНАЛИЗ РЕЗИСТИВНЫХ ЦЕПЕЙ С ПОМОЩЬЮ УРАВНЕНИЙ КИРХГОФА

Резистивными называют цепи, у которых напряжения и токи связаны линейными алгебраическими соотношениями. Такие цепи содержат резистивные элементы, независимые и управляемые источники. В этих элементах напряжения и токи связаны линейными алгебраическими соотношениями, такими же соотношениями связаны токи и напряжения линейных резистивных цепей, состоящих из этих элементов.

Пример 1.1. Уравнения Кирхгофа для цепи (рис. 1.14)

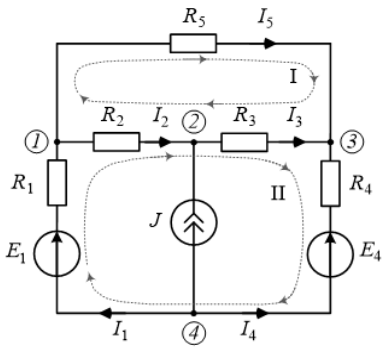


Рис. 1.14. Цепь к примеру 1.1

Решение. Сначала выберем направления токов резистивных элементов и пронумеруем узлы. Направления токов показаны стрелками на выводах элементов. Неизвестными переменными являются токи резистивных элементов I_1 – I_5. Поэтому всего необходимо составить пять уравнений. Цепь содержит четыре узла; это означает, что по первому закону Кирхгофа можно составить три независимых уравнения. Оставшиеся два уравнения составим по второму закону Кирхгофа.

Записываем уравнения по первому закону Кирхгофа для узлов 1–3. Контуры I и II выбираем так, чтобы они не включали источник тока, иначе в системе уравнений появится дополнительная переменная – напряжение источника тока. Направления обхода контуров совпадают с направлением движения часовой стрелки. В результате получим систему из пяти уравнений с пятью неизвестными токами:

Узел 1: $-I_1 + I_2 + I_5 = 0$;
Узел 2: $-I_2 + I_3 = J$;
Узел 3: $-I_3 - I_4 - I_5 = 0$;
Контур I: $-R_2I_2 - R_3I_3 + R_5I_5 = 0$.
Контур II: $R_1I_1 + R_2I_2 + R_3I_3 - R_4I_4 = E_1 - E_4$.

Для решения системы уравнений целесообразно использовать математические пакеты, например MathCAD или Matlab.

Напряжение на зажимах источника тока можно затем найти, записав уравнения для контуров, включающих R_1, R_2, E_1, J или R_3, R_4, E_4, J.

Пример 1.2. Расчет токов в цепи (рис. 1.15)

Номиналы элементов: R_1 = 0,1 кОм; R_2 = 0,6 кОм; R_3 = 0,4 кОм; R_4 = 1,0 кОм; R_5 = 0,8 кОм; R_6 = 1,6 кОм; E_1 = 10 В; E_5 = 12 В; J = 0,02 А.

*Решение. В*ыбираем направления токов резистивных элементов и нумеруем узлы. В рассматриваемой схеме шесть неизвестных токов (I_1 – I_6), следовательно, необходимо составить шесть уравнений. Цепь содержит четыре узла; это означает, что по первому закону Кирхгофа можно составить три независимых уравнения, а оставшиеся три уравнения – по второму закону Кирхгофа.

Уравнения по первому закону Кирхгофа составляем для узлов 1–3. По второму закону Кирхгофа записываем уравнения для контуров I, II и III. Направления обхода контуров выбраны совпадающими с направлением движения часовой стрелки

В результате получим систему из шести уравнений с шестью неизвестными токами:

$$\begin{cases} -I_1 + I_2 + I_6 = 0 \\ -I_2 - I_3 + I_4 = 0 \\ -I_4 - I_5 - I_6 = J \\ R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_3 I_3 = E_1 \\ -R_2 I_2 - R_4 I_4 + R_6 I_6 = 0 \\ R_3 I_3 + R_4 I_4 - R_5 I_5 = -E_5 \end{cases}$$

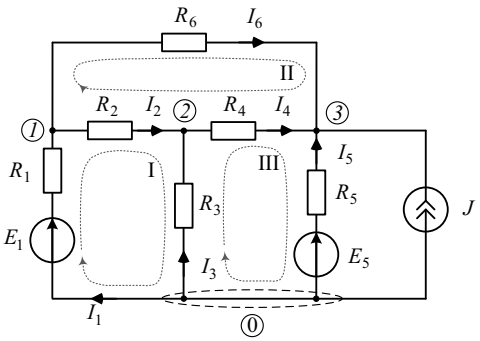


Рис. 1.15. Цепь к примеру 1.2

В матричной форме записи система уравнений имеет вид:

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ R_1 & R_2 & -R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_2 & 0 & -R_4 & 0 & R_6 \\ 0 & 0 & R_3 & R_4 & -R_5 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ J \\ E_1 \\ 0 \\ -E_5 \end{bmatrix}.$$

Решением системы являются следующие значения токов: I_1 = 1,6 мА; I_2 = 5,7 мА; I_3 = –15,9 мА; I_4 = –10,1 мА; I_5 = –5,6 мА; I_6 = –4,2 мА.

Знак минус в численных значениях токов означает, что направление токов при заданных условиях выбрано навстречу истинному.

Пример 1.3. Анализ цепи с управляемым источником

Определить напряжение на выходе цепи с усилителем напряжения (рис. 1.16). Коэффициент передачи усилителя равен K, его входное сопротивление бесконечно, а выходное равно нулю.

Решение. Заменим усилитель простейшей моделью – источником напряжения, управляемым напряжением (рис. 1.17). Выходное напряжение в схеме (рис. 1.17): $U_{вых} = KU_д$.

Поскольку входное сопротивление усилителя бесконечно, токи резисторов одинаковы: $I_1 = I_2 = I$. Запишем уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$R_1 I + R_2 I = E - KU_д;$$

$$R_1 I - U_д = E.$$

Решив эти уравнения, найдем, что

$$U_д = -\frac{R_2}{(K+1)R_1 + R_2} E\ ; \qquad (1.9)$$

$$U_{вых} = KU_д = -\frac{KR_2}{(K+1)R_1 + R_2} E\ . \qquad (1.10)$$

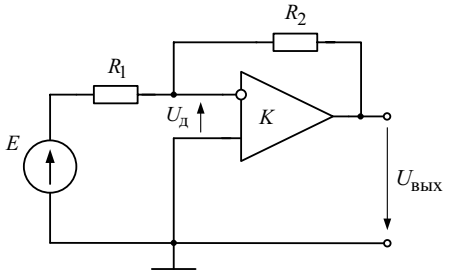


Рис. 1.16. Цепь с усилителем напряжения

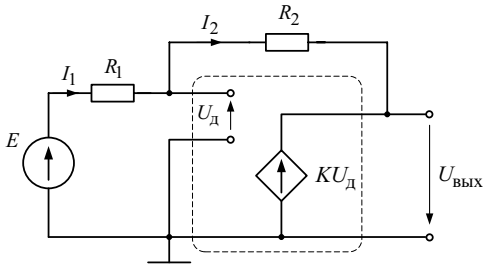


Рис. 1.17. Цепь с источником напряжения, управляемым напряжением

Итак, выходное напряжение рассматриваемой схемы зависит как от коэффициента усиления K, так и сопротивлений R_1 и R_2. Резисторы R_1 и R_2 образуют цепь отрицательной обратной связи. Она служит для передачи части выходного напряжения на вход усилителя. При этом часть входного напряжения усилителя компенсируется.

Особый интерес представляет вариант, когда коэффициент усиления K очень велик. Такой усилитель называют *операционным*. Из формул (1.9) и (1.10) следует, что при $K \to \infty$ напряжение на входе усилителя $U_д \to 0$, а выходное напряжение не зависит от коэффициента усиления активного элемента:

$$U_{вых} = -\frac{R_2}{R_1}E.$$

На основе операционного усилителя получили схему инвертирующего усилителя, коэффициент передачи которого определяется отношением сопротивлений резисторов R_1 и R_2.

1.7 ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ УЧАСТКА ЦЕПИ

При анализе разветвленных электрических цепей часто целесообразно преобразовать участок цепи в более простой и удобный для расчета. Например, последовательно или параллельно соединенные элементы заменить одним. Цепь с несколькими источниками часто можно преобразовать в одноконтурную или в схему с двумя узлами, что значительно упрощает последующий расчет.

Два участка цепи являются *эквивалентными*, если при замене одного участка на другой токи и напряжения остальной части цепи остаются неизменными.

Одним из основных видов преобразования является замена источника напряжения эквивалентным источником тока. Часто используют также преобразование треугольника ветвей в эквивалентную звезду.

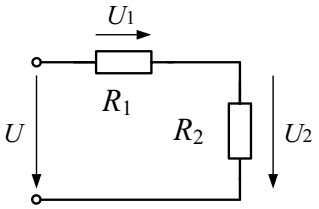


Рис. 1.18. Последовательное соединение двухполюсников

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЯ ДВУХПОЛЮСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. При *последовательном соединении* двухполюсников (рис. 1.18) их токи равны. Общее напряжение равно сумме напряжений отдельных элементов:

$$U = U_1 + U_2.$$

В соответствии с законом Ома

$$U = R_1 I + R_2 I = R_Э I, \qquad (1.11)$$

здесь

$$R_Э = R_1 + R_2.$$

Итак, последовательно соединенные резисторы можно заменить одним, сопротивление которого равно сумме сопротивлений элементов, образующих последовательную цепь.

Из (1.11) следует, что в цепи (рис. 1.18) ток

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}.$$

Напряжения на отдельных элементах делятся пропорционально их сопротивлениям:

$$U_1 = R_1 I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U;$$

$$U_2 = R_2 I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U.$$

Поэтому цепь, образованная последовательным соединением элементов, является *делителем напряжения*.

Если в цепи имеется несколько источников напряжения, соединенных последовательно, в соответствии с вторым законом Кирхгофа их можно заменить одним источником, напряжение которого равно сумме напряжений источников, входящих в соединение.

Отличительной особенностью *параллельного соединения* двухполюсных элементов является равенство напряжений на их зажимах (рис. 1.19).

Общий ток такой цепи равен сумме токов отдельных элементов:

$$I = I_1 + I_2.$$

В соответствии с законом Ома ток

$$I = G_1 U + G_2 U = G_Э U,$$

где $G_Э = G_1 + G_2$.

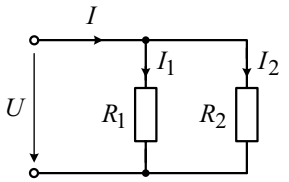


Рис. 1.19. Параллельное соединение резисторов

Итак, при параллельном соединении линейных резисторов общая проводимость участка цепи равна сумме проводимостей отдельных элементов. Сопротивление цепи (рис. 1.19) можно найти по формуле

$$R_э = \frac{1}{G_э} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Токи в параллельных ветвях делятся обратно пропорционально их сопротивлениям:

$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2},$$

$$I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Эти равенства называют *формулами разброса* (или *чужой ветви*), а параллельную цепь – *делителем тока*.

Если в схеме имеется несколько источников тока, включенных параллельно, то в соответствии с первым законом Кирхгофа их можно заменить одним источником, ток которого равен алгебраической сумме токов источников, входящих в соединение.

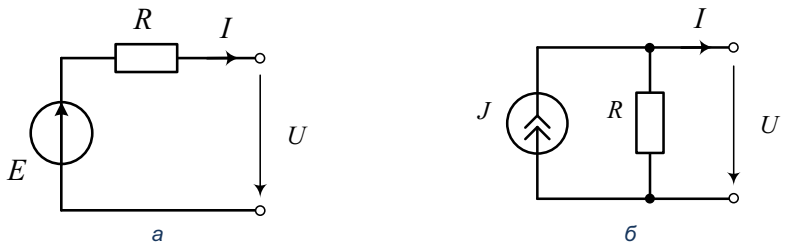


Рис. 1.20. Эквивалентные источники напряжения и тока

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА. Один из основных видов эквивалентного преобразования – замена источника напряжения эквивалентным источником тока. Для цепи, образованной последовательным соединением источника напряжения и резистора (рис. 1.20, *а*) справедливо равенство

$$U + RI = E.$$

Выразим из этого уравнения ток:

$$I = -\frac{U}{R} + \frac{E}{R} = -\frac{U}{R} + J_Э\,. \qquad (1.12)$$

Равенству (1.12) соответствует цепь, образованная параллельным соединением источника тока $J_Э = E / R$ и резистора сопротивлением R (рис. 1.20, *б*). Поскольку токи и напряжения на внешних зажимах схем одинаковы, они эквивалентны. Возможно и обратное преобразование источника тока в эквивалентный источник напряжения, при этом $E_Э = RJ$.

В некоторых случаях замена источника напряжения эквивалентным источником тока (или наоборот) позволяет существенно упростить расчет.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТРЕУГОЛЬНИКА ВЕТВЕЙ В ЭКВИВАЛЕНТНУЮ ЗВЕЗДУ. При расчетах разветвленных цепей возникает задача преобразования треугольника ветвей в эквивалентную звезду. Эквивалентность треугольника и звезды заключается в том, что при одинаковых напряжениях между одноименными зажимами токи, входящие в них, одинаковы. Выведем формулы, позволяющие выполнить такое преобразование.

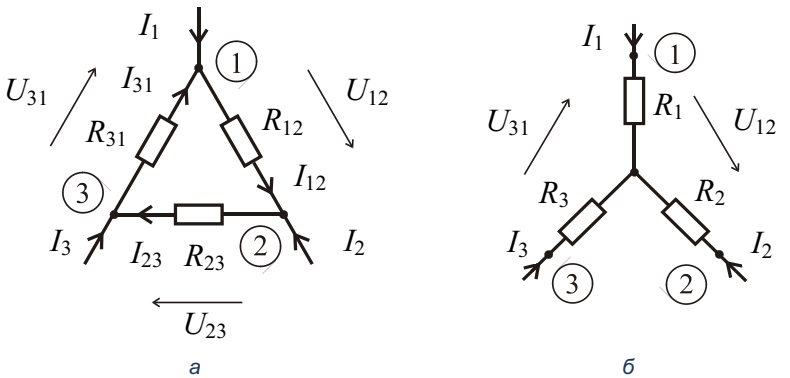
Для схемы треугольника (рис. 1.21, *а*) справедливы уравнения:

$$I_{12} - I_{31} = I_1\,; \qquad (1.13а)$$

$$I_{23} - I_{12} = I_2\,; \qquad (1.13б)$$

$$I_{31} - I_{23} = I_3\,; \qquad (1.13в)$$

$$R_{12}I_{12} + R_{23}I_{23} + R_{31}I_{31} = 0\,. \qquad (1.13г)$$



а *б*

Рис. 1.21. Преобразование треугольника ветвей в эквивалентную звезду

Решая систему уравнений (1.13, *а–г*) относительно I_{12}, получим

$$I_{12} = \frac{R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} I_1 - \frac{R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} I_2 .$$

Напряжение между узлами 1 и 2

$$U_{12} = R_{12} I_{12} = \frac{R_{12} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} I_1 - \frac{R_{12} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} I_2 . \qquad (1.14)$$

Решая систему (1.13) относительно I_{23}, получим

$$U_{23} = R_{23} I_{23} = \frac{R_{12} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} I_2 - \frac{R_{31} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} I_3 . \qquad (1.15)$$

Уравнениям (1.14) и (1.15) соответствует эквивалентная схема (рис. 1.21, *б*), в которой резисторы соединены звездой. Сопротивления резисторов определяются равенствами:

$$R_1 = \frac{R_{12} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} ;$$

$$R_2 = \frac{R_{12} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} ;$$

$$R_3 = \frac{R_{31} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} .$$

Итак, *сопротивление луча эквивалентной звезды равно произведению сопротивлений прилегающих сторон треугольника, деленному на сумму сопротивлений сторон треугольника*.

Можно выполнить и обратное преобразование, заменив звезду ветвей эквивалентным треугольником. Сопротивления резисторов, образующих стороны треугольника, определяются равенствами:

$$G_{12} = \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2 + G_3} ;$$

$$G_{23} = \frac{G_2 G_3}{G_1 + G_2 + G_3};$$

$$G_{31} = \frac{G_3 G_1}{G_1 + G_2 + G_3}.$$

Следовательно, *проводимость стороны треугольника равна произведению проводимостей прилегающих лучей звезды, деленному на сумму проводимостей лучей звезды*.

ЦЕПИ С ДВУМЯ УЗЛАМИ. При расчетах разветвленных цепей встречаются случаи, когда анализируемая цепь образована параллельным соединением нескольких ветвей, т.е. является схемой с двумя узлами (рис. 1.22).

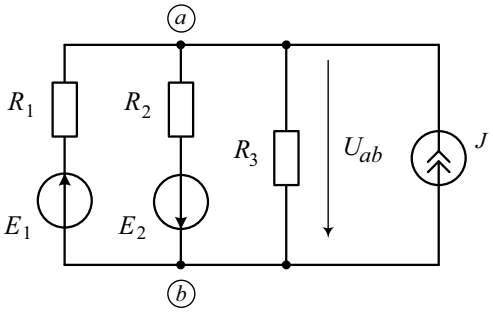


Рис. 1.22. Схема с двумя узлами

Анализ таких цепей можно упростить, определив сначала напряжение между узлами *a* и *b*. Преобразовав источники напряжения в эквивалентные источники тока, получим

$$U_{ab} = \frac{\sum\limits_{(j)} E_j / R_j + \sum\limits_{(i)} J_i}{\sum\limits_{(j)} 1/R_j}. \qquad (1.16)$$

При вычислении напряжения U_{ab} с положительным знаком записываются те слагаемые числителя, которые соответствуют источникам, направленным к узлу *a* (источники E_1 и J на рис. 1.22).

После того, как определено напряжение U_{ab}, можно легко вычислить токи ветвей.

Выражение (1.16) широко используется для расчета цепей с двумя узлами, а также более сложных цепей, которые могут быть представлены в виде схем с двумя узлами. Рассмотренный метод является частным случаем общего *метода узловых напряжений* (см. гл. 2).

1.8 ИДЕАЛЬНЫЙ КЛЮЧ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Электронный ключ – это элемент, который служит для коммутации цепей под воздействием управляющего сигнала. Область применения ключей в современной электротехнике и электронике очень широка. На их основе реализуются цифровые системы обработки информации, а также устройства преобразования электрической энергии.

Для упрощения анализа ключи полагают идеальными. Переход идеального ключа из одного состояния в другое происходит мгновенно. Сопротивление идеального ключа в разомкнутом состоянии бесконечно, а в замкнутом равно нулю (рис. 1.23).

Управляющий электрод ключа называют затвором (З). Два других электрода называют стоком (С) и истоком (И). Ключ может находиться в замкнутом (проводящем) или разомкнутом (непроводящем) состоянии. Переключение из одного состояния в другое происходит под действием управляющего напряжения $U_У$, приложенного между затвором и истоком. Если величина $U_У$ превышает пороговое значение U_0, ключ замыкается. Если $U_У < U_0$, ключ разомкнут.

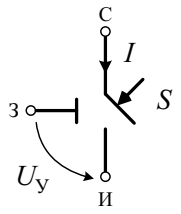


Рис. 1.23. Условное обозначение ключа, управляемого напряжением

Если ключ рассматривается только в замкнутом или только в разомкнутом состоянии, управляющий электрод ключа и управляющее напряжение не показывают.

Вольт-амперная характеристика идеального ключа образована двумя перпендикулярными прямыми (рис. 1.24). Если управляющее напряжение $U_У < U_0$, идеальный ключ эквивалентен разрыву цепи, т.е. ток $I = 0$ при любом значении напряжения. В этом случае ВАХ ключа совпадает с осью абсцисс. При $U_У < U_0$ идеальный ключ эквивалентен короткому замыканию, т.е. напряжение между стоком и

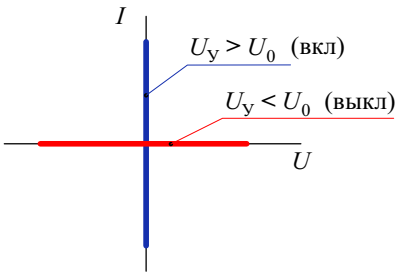


Рис. 1.24. Вольт-амперная характеристика идеального ключа

истоком равно нулю при любом значении тока, и ВАХ ключа совпадает с осью ординат.

Для идеального ключа направление тока через него и полярность напряжения не имеют значения.

Мощность, потребляемая идеальным ключом в проводящем и непроводящем состояниях, равна нулю. Поскольку ток управляющего электрода равен нулю, мощность, затрачиваемая на управление идеальным ключом, тоже равна нулю.

Электронные ключи реализуются на основе полупроводниковых приборов – полевых и биполярных транзисторов. Реальные ключи имеют ненулевое сопротивление в замкнутом состоянии и конечное сопротивление в разомкнутом. Однако использование идеального ключа позволяет значительно упростить анализ электронных схем.

АНАЛИЗ ЦЕПЕЙ С ИДЕАЛЬНЫМИ КЛЮЧАМИ. Идеальный ключ является нелинейным элементом. Однако для расчета цепей с ключами можно использовать методы анализа линейных цепей. Для этого рассматривают две линейных подсхемы: в первой ключ находится в замкнутом состоянии, а во второй – в разомкнутом.

Пример 1.4. Расчет тока и напряжения резистивной цепи для двух случаев (рис. 1.25). В первом случае ключ находится в разомкнутом состоянии, а во втором – ключ замкнут. Параметры элементов цепи: R_1 = 10 кОм, $R_2 = R_3$ = 20 кОм, E = 30 В.

Случай 1. Ключ находится в разомкнутом состоянии (рис. 1.26). В расчетной схеме ключ заменен разрывом цепи.

Резисторы R_1 и R_2 соединены последовательно и образуют делитель напряжения, поэтому токи

$$I_1 = I_2 = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{30}{(10+20)\cdot 10^3} = 1 \text{ мА}.$$

Поскольку ключ разомкнут, ток третьего резистора равен нулю. Выходное напряжение

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E = \frac{20}{10+20} 30 = 20 \text{ В}.$$

Случай 2. Ключ замкнут. В расчетной схеме (рис. 1.27) ключ заменен коротким замыканием.

Поскольку резисторы R_2 и R_3 в схеме (рис. 1.27) соединены параллельно, сопротивление этого участка цепи $R_{23} = R_1R_2/(R_1 + R_2)$ = 10 кОм. Ток первого резистора

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_{23}} = \frac{30}{(10+10)\cdot 10^3} = 1{,}5 \text{ мА}.$$

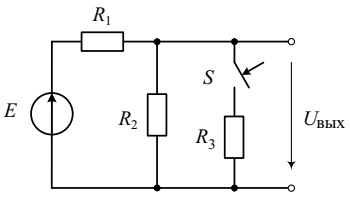


Рис. 1.25. Резистивная цепь с идеальным ключом

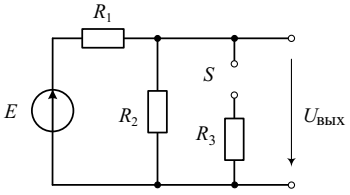


Рис. 1.26. Ключ разомкнут

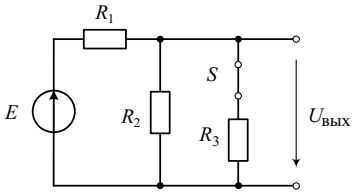


Рис. 1.27. Ключ замкнут

Сопротивления резисторов R_2 и R_3 равны, поэтому токи I_2 и I_3 одинаковы:

$$I_2 = I_3 = \frac{I_1}{2} = \frac{1{,}5}{2} = 0{,}75 \text{ мА}.$$

Выходное напряжение

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_{23}}{R_1 + R_{23}} E = \frac{10}{10 + 10} 30 = 15 \text{ В}.$$

РЕАЛИЗАЦИЯ ЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ИДЕАЛЬНЫХ КЛЮЧЕЙ. Математическим аппаратом, на основе которого реализуются цифровые устройства, является алгебра логики. Основные операции алгебры логики – логическое сложение (операция ИЛИ), логическое умножение (операция И), логическое отрицание (операция НЕ).

Электронный ключ является базовой ячейкой, на основе которой выполняются логические операции. С помощью ключа реализуются два состояния логической переменной (0 и 1).

Логическую операцию И выполняет цепь, состоящая из последовательно соединенных источников напряжения, ключей S_A и S_B, лампы накаливания EL (рис. 1.28). Лампа загорается, когда ключи S_A и S_B замкнуты.

Итак, логическая операция И реализуется схемой, содержащей последовательно соединенные ключи.

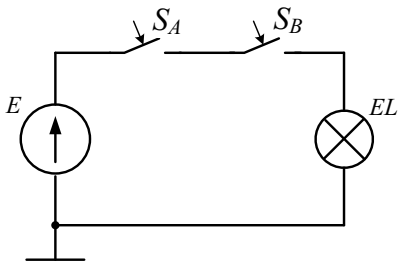


Рис. 1.28. Реализация логической операции И

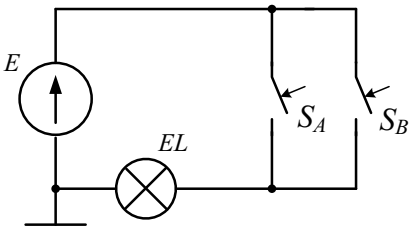


Рис. 1.29. Реализация логической операции ИЛИ

Логическую операцию ИЛИ выполняет схема с параллельным соединением ключей (рис. 1.29). Лампа в этой схеме загорится, если замкнут ключ S_A или S_B. Таким образом, логическая операция ИЛИ реализуется схемой, содержащей параллельно соединенные ключи.

В устройствах цифровой электроники используются сигналы двух уровней – высокого и низкого. Обычно в качестве сигналов рассматри-

вают напряжения. Высокий и низкий уровни напряжения соответствуют логическим состояниям 1 и 0.

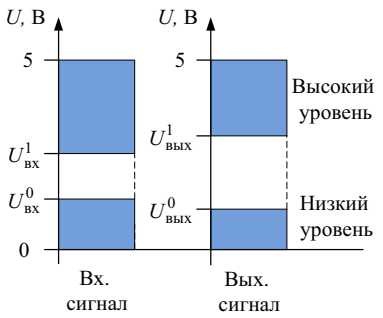


Рис. 1.30. Диапазоны напряжения для входных и выходных сигналов

Высокому и низкому уровням на входе и выходе логического элемента – определенные диапазоны значений напряжения. Цифровые схемы конструируют таким образом, чтобы воздействие сигнала определялось не конкретным значением напряжения, а тем, какой уровень (высокий или низкий) этот сигнал имеет. Если напряжение, подаваемое на вход цифрового устройства, находится в установленных границах, то конкретное значение сигнала не влияет на реакцию этого устройства.

На диаграммах (рис.1.30) показано напряжение низкого и высокого уровня на входе и выходе цифровой схемы. Напряжение питания составляет 5 В. Напряжение низкого уровня на входе изменяется в диапазоне от 0 до 0,6 В, а на выходе – от 0 до 0,3 В. Напряжению высокого уровня на входе соответствует диапазон от 2,5 до 5 В, а на выходе – от 2 до 5 В.

Заштрихованные прямоугольники обозначают уровни напряжений на входах и выходах логического элемента. Напряжение $U^0_{вх}$ – это максимальное значение входного напряжения, соответствующее логическому нулю. Любое напряжение, меньшее $U^0_{вх}$, также соответствует логическому нулю; $U^1_{вх}$ – это минимальное значение входного напряжения, соответствующее логической единице.

МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЗОВЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ ИДЕАЛЬНЫХ КЛЮЧЕЙ. Электронные схемы, выполняющие простейшие операции И, ИЛИ, НЕ, называют базовыми логическими элементами (ЛЭ). Уровень напряжения на выходе ЛЭ определяется уровнями напряжения на входах и характером реализуемой логической функции.

Простейшим базовым логическим элементом является инвертор, выполняющий операцию НЕ (рис. 1.31, *а*, *б*).

Свойства инвертора характеризует его передаточная характеристика $U_{вых} = f(U_{вх})$, представляющая собой зависимость выходного напряжения $U_{вых}$ от медленно изменяющегося напряжения на входе $U_{вх}$ (рис. 1.32). Характеристика построена в предположении, что в схеме (рис. 1.31) пороговое напряжение ключа $U_0 = E_{пит} / 2$.

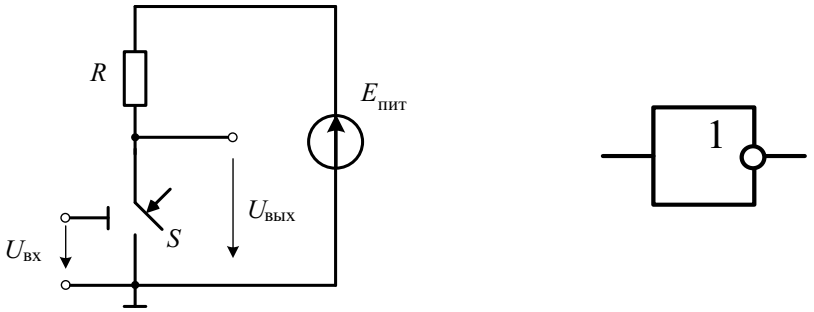


Рис. 1.31. Схема логического инвертора (*а*) и его условное обозначение (*б*)

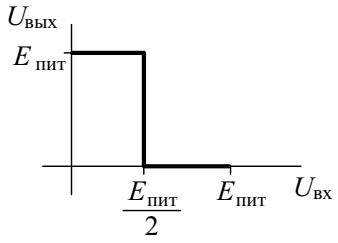


Рис. 1.32. Передаточная характеристика логического инвертора

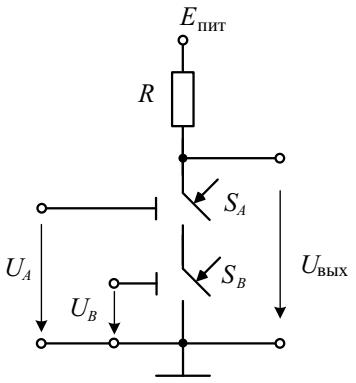


Рис. 1.33. Реализация логической операции 2И-НЕ

Схема логического элемента, выполняющего операцию 2И-НЕ, содержит два последовательно соединенных ключа (рис. 1.33).

В схеме, реализующей операцию 2ИЛИ-НЕ, ключи соединены параллельно (рис. 1.34).

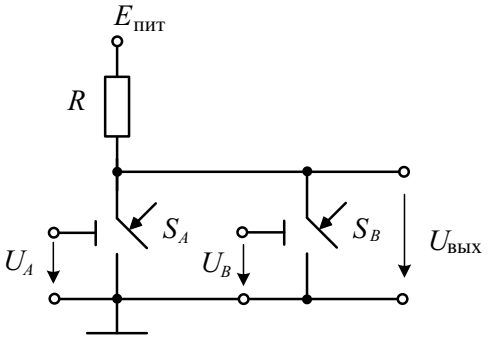


Рис. 1.34. Реализация логической операции 2ИЛИ-НЕ

МОЩНОСТЬ, ПОТРЕБЛЯЕМАЯ ЛОГИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ. Цифровые интегральные схемы содержат большое количество логических элементов и потребляют много энергии. Если один ЛЭ потребляет 10 мВт, то схема из 100 000 элементов будет потреблять 1 кВт (полагаем, что все элементы переключаются одновременно). Поэтому снижение мощности, потребляемой цифровыми устройствами, является очень актуальной задачей.

Определим мощность, которую потребляет логический инвертор в статическом режиме. В таком режиме ключ постоянно находится в замкнутом или разомкнутом состоянии. Этим состояниям соответствуют логические 0 или 1 на выходе инвертора.

Случай 1. Ключ замкнут (рис. 1.35, *а*). Напряжение на выходе инвертора $U_{\text{вых}} = 0$. Ток $I = E_{\text{пит}} / R$. Мощность, потребляемая инвертором в режиме логического нуля

$$P_0 = E_{\text{пит}} I = \frac{E_{\text{пит}}^2}{R}.$$

Случай 2. Ключ разомкнут (рис. 1.35, *б*). Ток $I = 0$. Мощность, потребляемая инвертором в режиме логической единицы $P_1 = E_{\text{пит}} I = 0$.

При расчете мощности, потребляемой логическими элементами, полагают, что половину времени инвертор находится в режиме логической единицы, а вторую половину – в режиме логического нуля. Поэтому мощность, потребляемую инвертором в статическом режиме, определяют по формуле

$$P_{\text{ст}} = \frac{P_0 + P_1}{2} = \frac{E_{\text{пит}}^2}{2R}.$$

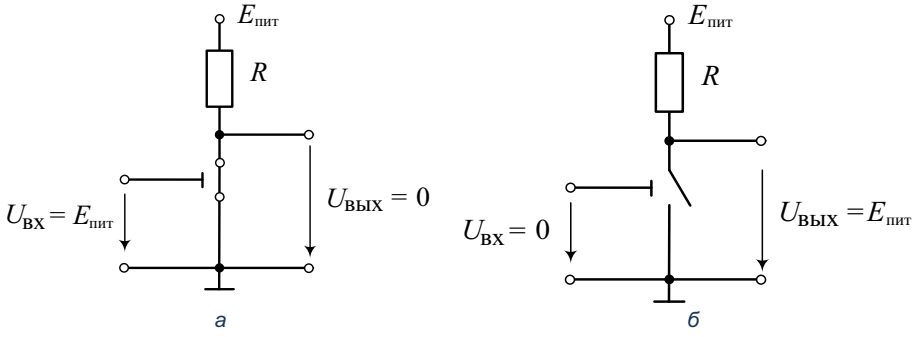


Рис. 1.35. Схемы замещения инвертора

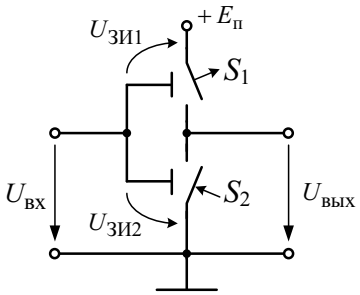


Рис. 1.36. Инвертор на основе комплементарных ключей

Очень малую мощность в статическом режиме потребляет инвертор на основе комплементарных (дополняющих) ключей. В схеме (рис. 1.36) нагрузочный резистор заменен комплементарным ключом S_1. Этот ключ замыкается, если управляющее напряжение $U_У < U_0$. Пороговое напряжение ключа S_1 отрицательно: $U_{01} < 0$.

В каждом из статических режимов один из ключей разомкнут. Ток между источником питания и «землей» равен нулю. Соответственно, равна нулю статическая мощность, потребляемая инвертором на основе комплементарных ключей.

ВЫВОДЫ

- Элементы электрических цепей являются идеализированными моделями, обладающими основными свойствами физических прототипов. Схему замещения, отображающую процессы в реальном электронном устройстве, получают на основе идеализированных элементов.
- Резистивный элемент моделирует процесс преобразования электромагнитной энергии в тепло и другие виды энергии, при этом запасание энергии в электромагнитном поле отсутствует. Свойства резистивного элемента определяются связью между напряжением и током – вольт-амперной характеристикой.
- Источник напряжения – двухполюсный элемент, напряжение которого не зависит от тока через него и изменяется по заданному закону. Внутреннее сопротивление идеального источника напряжения равно нулю.
- Источник тока – двухполюсный элемент, ток которого не зависит от напряжения на его зажимах и изменяется в соответствии с заданным законом. Внутреннее сопротивление идеального источника тока бесконечно.
- Управляемый источник – четырехполюсный элемент, у которого напряжение (ток) на выходе пропорционально входному напряжению (току). Различают четыре вида управляемых источников: источник напряжения, управляемый напряжением; источник тока, управляемый напряжением; источник тока, управляемый током; источник напряжения, управляемый током.

Законы Кирхгофа лежат в основе методов анализа электрических цепей. Они справедливы как для линейных, так и для нелинейных цепей, при любой форме токов и напряжений.

ЗАДАЧИ

ЗАДАЧА 1.1. На графике представлен ток линейного резистивного элемента (рис. 1.37). Построить график мощности, выделяемой в резисторе. Сопротивление резистора R равно 1000 Ом.

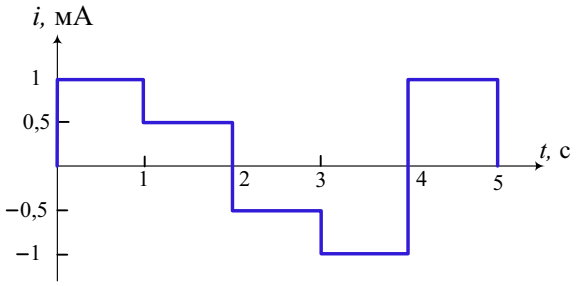


Рис. 1.37

ЗАДАЧА 1.2. Вольт-амперные характеристики резистивных элементов описываются уравнениями:

$$U = 10I;\ I = 2e^{-U};\quad U = 0{,}5I^2;\quad I = 0{,}1 - 0{,}3U\ .$$

Определить, какие из резисторов являются нелинейными.
Какие из резисторов являются пассивными, а какие – активными?

ЗАДАЧА 1.3. Вольт-амперная характеристика нелинейного резистора определяется уравнением

$$U = 20I + I^2\ .$$

Определить напряжение резистора, если ток изменяется по закону

$$i(t) = \sin\omega t + 2\sin 2\omega t\ .$$

Рекомендация: представить напряжение в виде суммы синусоид кратных частот.

ЗАДАЧА 1.4. Источник тока, источник напряжения и линейный резистор соединены последовательно (рис. 1.38). Ток источника тока $J = 1$ А, ЭДС источника напряжения $E = 5$ В. Сопротивление резистора $R = 10$ Ом. Определить мощность каждого элемента.

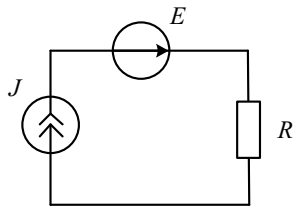


Рис. 1.38

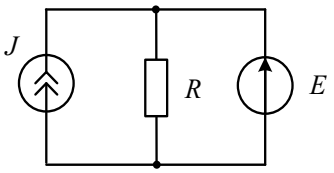


Рис. 1.39

ЗАДАЧА 1.5. Источник тока, источник напряжения и линейный резистор соединены параллельно (рис. 1.39). Ток источника тока $J = 1$ А, ЭДС источника напряжения $E = 5$ В. Сопротивление резистора $R = 10$ Ом. Определить мощность каждого элемента.

ЗАДАЧА 1.6. Источник тока, источник напряжения и линейный резистор соединены параллельно (рис. 1.39). Источник напряжения и источник тока отдают мощность 10 Вт каждый. Определить мощность элементов при последовательном соединении.

ЗАДАЧА 1.7. Вольт-амперная характеристика кремниевого солнечного элемента показана на рис. 1.40. Построить график мощности на выводах элемента. Определить максимальную мощность, отдаваемую элементом во внешнюю цепь.

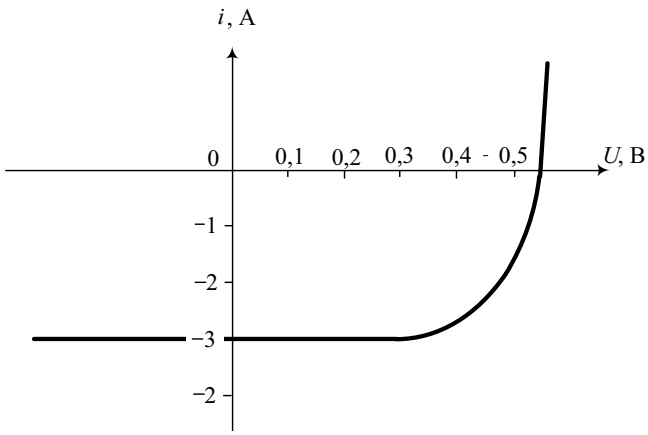


Рис. 1.40

ЗАДАЧА 1.8. Какой резистор нужно включить параллельно резистору сопротивлением R для того, чтобы получить результирующее сопротивление, равное $0{,}1R$, $0{,}05\,R$, $0{,}5\,R$?

ЗАДАЧА 1.9. Определить эквивалентное сопротивление цепи (рис. 1.41), если $R = 1$ кОм.

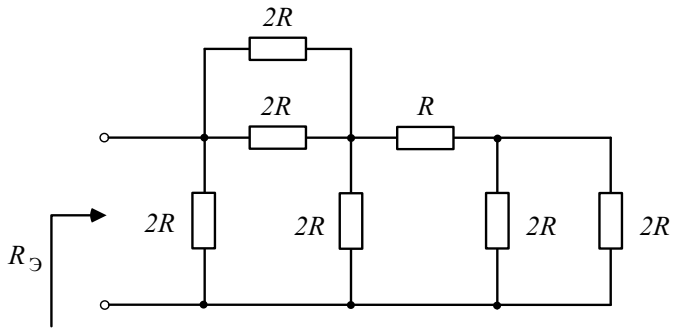


Рис. 1.41

ЗАДАЧА 1.10. Рассчитать токи и мощности элементов лестничной цепи (рис. 1.42), если $E = 10$ В, $R_1 = 2{,}5$ Ом, $R_2 = 30$ Ом, $R_3 = 6$ Ом, $R_4 = 5$ Ом, $R_5 = 20$ Ом.

ЗАДАЧА 1.11. Рассчитать делитель напряжения (рис. 1.43) так, чтобы его входное сопротивление составляло 50 кОм, а выходные напряжения были равны 12,5 В, 10 В, 5 В. Напряжение U_0 на входе равно 25 В.

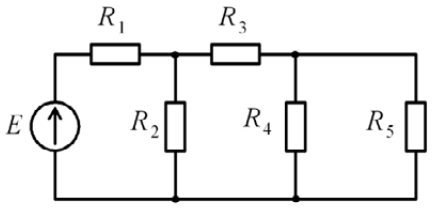


Рис. 1.42

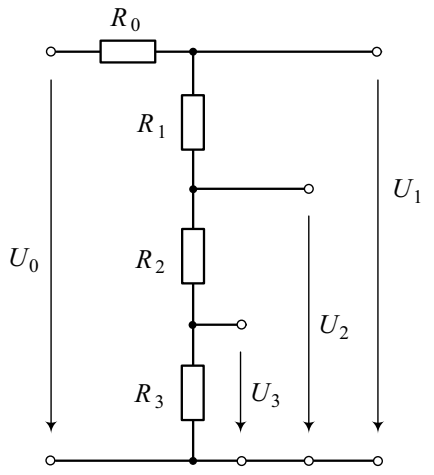


Рис. 1.43

ЗАДАЧА 1.12. С помощью трех резисторов можно реализовать различные варианты делителей напряжения. Определить напряжение на выходе этих делителей, если сопротивление резисторов одинаково и равно 10 кОм. Входное напряжение равно 9 В.

ЗАДАЧА 1.13. Два резистора сопротивлением 4,7 кОм и 10 кОм используются в схеме делителя напряжения. Входное напряжение делителя равно 15 В. Какое напряжение можно получить на выходе делителя? Какой дополнительный резистор нужно включить (и каким образом) для того, чтобы получить выходное напряжение, равное 10 В?

ЗАДАЧА 1.14. С помощью трех резисторов можно реализовать различные варианты делителей тока. Определить коэффициент передачи этих делителей. Сопротивление резисторов одинаково и равно 10 кОм.

ЗАДАЧА 1.15. В схеме (рис. 1.44) рассчитать напряжение U_{ab}, если $E_1 = 12$ В, $E_3 = 10$ В, $R_1 = 200$ Ом, $R_2 = 100$ Ом, $R_3 = 40$ Ом.

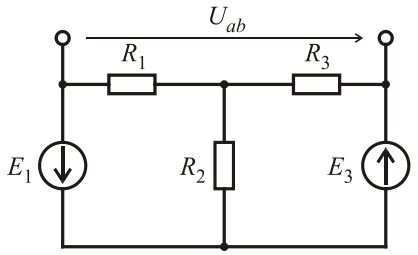


Рис. 1.44

ЗАДАЧА 1.16. Рассчитать напряжение на выходе цепи с управляемым источником (рис. 1.45), если $E_1 = 1$ В, $R_1 = 1$ кОм, $R_2 = 9$ кОм. Коэффициент усиления управляемого источника напряжения K принимает значения, равные 10, 100, 1000.

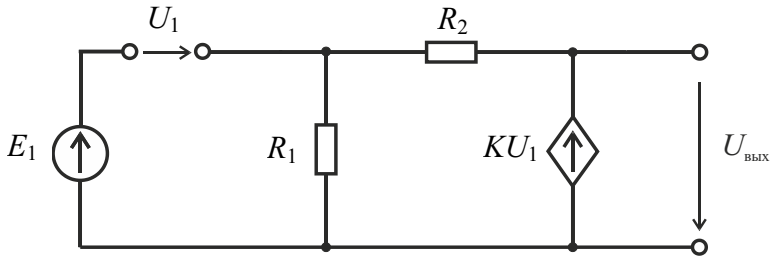


Рис. 1.45

ЗАДАЧА 1.17. Рассчитать напряжение на выходе цепи (рис. 1.46), если $E_1 = 1$ В, $R_1 = 1$ кОм, $R_2 = 10$ кОм. Коэффициент усиления управляемого источника напряжения K принимает значения, равные 10, 100, 1000.

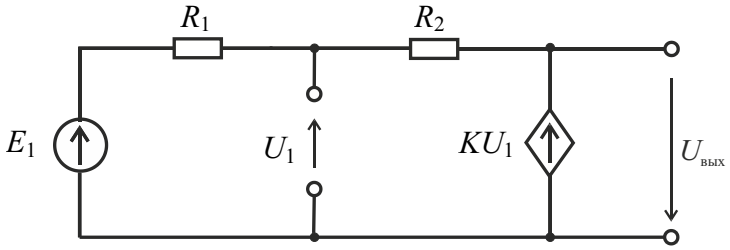


Рис. 1.46

ЗАДАЧА 1.18. Определить напряжение на выходе цепи (рис. 1.47). Пунктиром выделен источник тока, управляемый током (ИТУТ). Рассчитать выходное напряжение $U_{вых}$, мощность источника и мощность, выделяемую на сопротивлении нагрузки R_2, если $R_1 = 100$ Ом, $R_2 = 1000$ Ом, $\beta = 99$, $E = 1$ В.

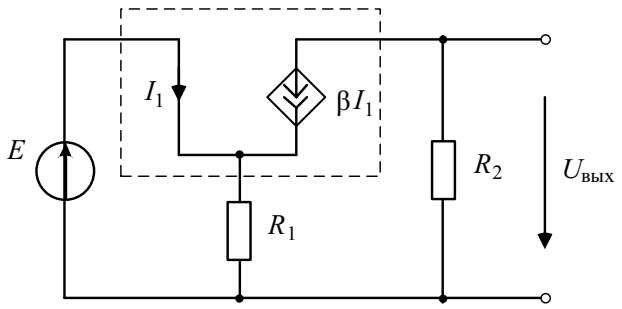


Рис. 1.47

ЗАДАЧА 1.19. Определить напряжение на выходе цепи (рис. 1.48), если $R_1 = 100$ Ом, $R_2 = 1$ кОм, $R_3 = 5$ кОм, $\beta = 99$, $E_1 = 1$ В, $E_2 = 15$ В.

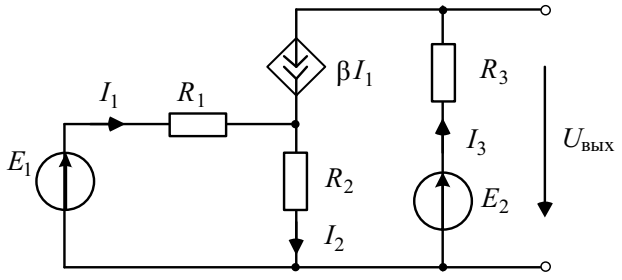


Рис. 1.48