

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Е. Л. Еремина, Т. А. Маслова

Электротехника и электроника

Электронное учебное пособие



Волжский
2024

УДК 621.3(07)
ББК 31.2я73
Я 702

Рецензенты:

к.т.н, доцент, филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г.Волжском
Болдырев И.А.;
зам. технического директора ООО «Волгопромавтоматика»
Щербаков А.Г.

Издается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Еремина, Е. Л.

Электротехника и электроника [Электронный ресурс] : учебное пособие / Е. Л. Еремина, Т. А. Маслова ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, ВПИ (филиал) ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 1,61 МБ). – Волжский, 2024. – Режим доступа: <http://lib.volpi.ru>. – Загл. с титул.экрана.

ISBN 978-5-9948-4893-7

Содержатся сведения, необходимые для приобретения студентом базовых навыков владения базовыми законами электротехники. Приведен перечень заданий к лабораторной работе. Описан порядок выполнения лабораторной работы, варианты заданий к лабораторной работе, примерные вопросы для подготовки к отчету по лабораторной работе, список рекомендованной к прочтению при выполнении лабораторной работы литературы.

Предназначены для студентов, обучающихся по направлениям 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» (очная и заочная формы обучения), 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» всех форм обучения в рамках курса «Разработка приложений для мобильных устройств», 09.03.04 «Программная инженерия», 18.03.01 «Химическая технология», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 08.03.01 «Строительство».

Илл. 39, табл. 3, библиограф.: 4 назв.

ISBN 978-5-9948-4893-7

© Волгоградский государственный
технический университет, 2024
© Волжский политехнический
институт, 2024

Содержание

1	Общие положения	5
1.1	Характеристики элементов электрической цепи	6
1.2	Эквивалентные преобразования электрических цепей	8
1.3	Анализ электрических цепей на основании законов Кирхгофа	11
	Контрольные вопросы:	16
2	Мгновенные и действующие значения электрических величин. Векторы	18
2.1	Мгновенные значения электрических величин.....	18
2.2	Действующие значения.....	18
2.3	Фазовое соотношение между напряжениями и токами на резисторе R , индуктивной катушке L и конденсаторе C	20
2.4	Схемы замещения пассивного двухполюсника. Параметры двухполюсника.....	22
2.5	Определение комплексного сопротивления пассивного двухполюсника методом трех вольтметров	23
2.6	Аналитический расчёт параметров двухполюсников по известным показаниям трех вольтметров.	25
2.7	Графическое определение параметров двухполюсника.....	26
2.8	Определение знака реактивной составляющей двухполюсника	27
2.9	Определение параметров пассивного двухполюсника с помощью измерений, выполненных вольтметром и фазометром.....	27
2.10	Компенсация реактивной мощности активно-индуктивных приёмников	29
	Контрольные вопросы	30
3	Полупроводниковые приборы	33
3.1	Полупроводниковые резисторы.....	33
3.2	Полупроводниковые диоды.....	34
3.3	Биполярные транзисторы (БТ).....	37
3.4	Униполярные (полевые) транзисторы.....	39
3.5	МДП- транзисторы.....	40

3.6	Полупроводниковый оптоэлектронные приборы для оптоэлектроники	44
3.7	Выпрямители переменного тока	48
3.7.1	Однополупериодная схема выпрямителя.....	49
3.7.2	Двухполупериодные выпрямители.....	50
	Контрольные вопросы	51
4	Диагностика электрических цепей по частям	53
4.1	Диагностика по частям линейных резистивных цепей	56
4.2	Предельные случаи декомпозиции резистивных цепей при их диагностике по частям	59
5	Лабораторные работы	62
5.1	Лабораторная работа №1	62
5.2	Лабораторная работа №2	63
	Список использованной литературы	65

1 Общие положения

Электрической цепью называется совокупность устройств, вырабатывающих и преобразующих электрическую энергию, а также вспомогательных устройств, соединённых проводами.

Устройства, предназначенные для вырабатывания электрической энергии, называются генерирующими. Устройства, преобразующие электрическую энергию в другие виды, называются приёмными. Вспомогательные устройства предназначаются для управления изменением энергии, для контроля и регулирования режимов в электрической цепи.

При анализе, описании и изучении реальных электрических устройств (элементов электрической цепи) пользуются условными графическими обозначениями. Графическое изображение элементов цепи с помощью идеальных элементов, которые выполняют функции части или полностью реальных элементов и параметрами которых являются параметры реальных элементов, называют схемой замещения.

Для описания элементов электрической цепи постоянного тока используют зависимость напряжения U на зажимах элемента от тока I в нем. Эта зависимость $U(I)$ называется вольт-амперной характеристикой (ВАХ) элемента. Применительно к источникам электрической энергии эта зависимость называется внешней характеристикой источника.

Генерирующие устройства (источники питания)

В настоящее время известно несколько типов генерирующих устройств постоянного тока, преобразующих механическую (машины постоянного тока), химическую (аккумуляторы, сухие химические элементы), тепловую (термоэлементы) и световую (фотоэлементы) энергию в электрическую. Кроме того, в последнее время появились устройства, использующие явления генерирования электрической энергии в кристалле при его деформации (эффект холла, магнитострикция), и эффект возникновения поперечного электрического поля в струе электропроводной жидкости или газа (МГД-генераторы).

Приёмные устройства

Приёмные устройства преобразуют электрическую энергию в другие виды энергии: световую, механическую, химическую и тепловую.

1.1 Характеристики элементов электрической цепи

При изучении элементов электрических цепей следует обращать внимание на их внешние характеристики.

Внешняя характеристика элемента электрической цепи называется зависимость $U = f(I)$. Иначе её в электротехнике называют вольт-амперной характеристикой.

С достаточной для практических расчётов точностью можно считать характеристики большинства элементов электрической цепи линейными. У приёмных элементов вольт-амперная характеристика проходит через начало координат (Рисунок 1а).

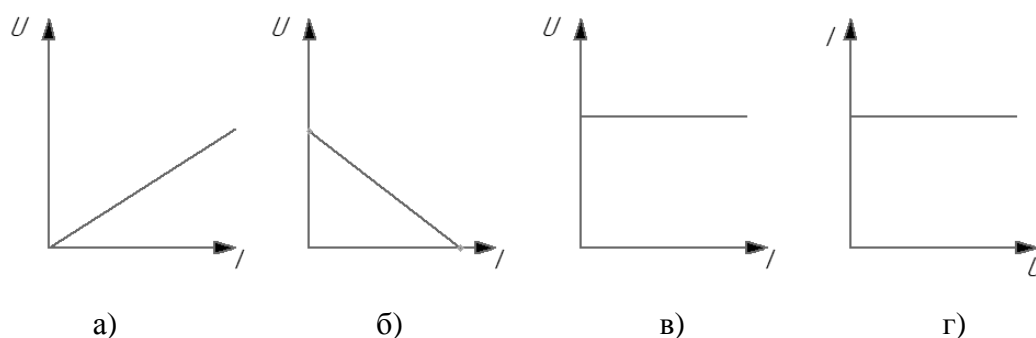


Рисунок 1 – Внешняя характеристика элемента электрической цепи

В схемах замещения цепей постоянного тока, приёмные элементы обозначаются в виде прямоугольника с выводами (Рисунок 2а) и называются резистивными элементами.

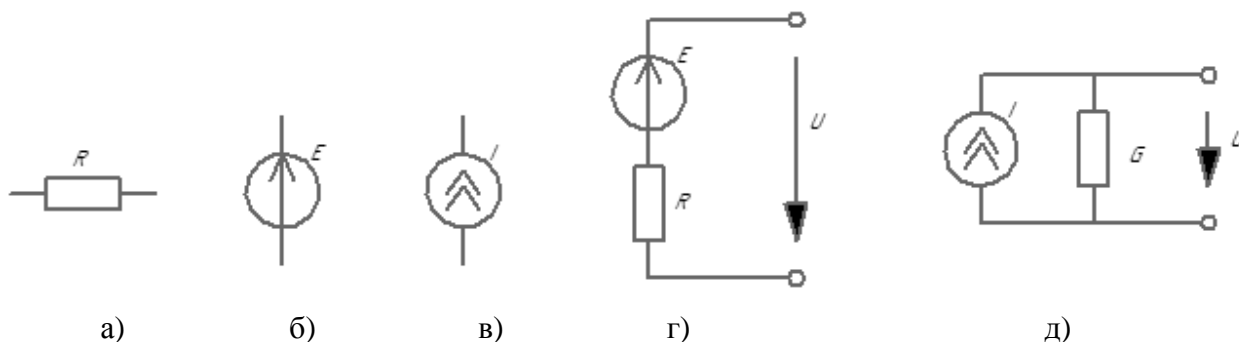


Рисунок 2 – Обозначения на схемах замещения

На резистивном элементе происходит процесс необратимого преобразования электрической энергии в её другой вид.

Напряжение на зажимах источника питания определяется уравнением равно:

$$U = E - I \cdot R$$

где R – внутреннее сопротивление источника питания;

E – его ЭДС;

I – ток, протекающий через источник питания.

Характеристика такого элемента представлена на Рисунок 1б.

Уравнение электрического состояния источника питания можно записать по-другому:

$$I = I_K - G \cdot U$$

где $I_K = \frac{E}{R}$ – ток короткого замыкания источника питания;

G – электрическая проводимость.

В первом случае говорят о схеме замещения с источником ЭДС, во втором – с источником тока.

Схемы замещения для реального источника питания образуют из идеального источника ЭДС (Рисунок 2б), его характеристика изображена на Рисунок 1в, и последовательно соединённого с ним резистивного элемента, сопротивление которого равно внутреннему сопротивлению R источника питания. Такая схема замещения является наиболее распространённый (Рисунок 2г).

Иногда целесообразно реальный источник питания представить как источник тока. Тогда его схема замещения будет состоять из идеального источника тока (Рисунок 2в), внешняя характеристика его изображена на Рисунок 2г (вольт-амперная характеристика показана на Рисунок 1г) и параллельно ему подсоединённому резистору с проводимостью G , равной внутренней проводимости источника питания. Такая схема замещения изображена на Рисунок 2д.

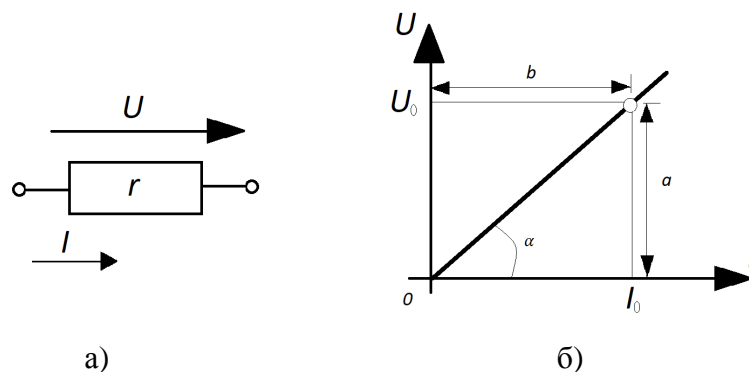


Рисунок 3 – Изображение резистора а) и его ВАХ б)

Положительное направления напряжения U от большего потенциала к меньшему на резисторах обычно не указывается, т.к. оно определяется выбираемым направлением тока I . Как токи, так и напряжения являются скалярными величинами, и их направления, указываемые на схемах, служат для определения знака их значения.

Аналитическое выражение ВАХ соответствует закону Ома $U = r \cdot I$. Значение сопротивления резистора r может быть определено из отношения напряжения U_0 к току I_0 для одного из режимов или по известному углу наклона ВАХ – α :

$$r = U_0/I_0 \text{ или } r = (m_U * a)/(m_I * b) = \frac{m_U}{m_I} * tga$$

где m_U , [В/мм]; m_I , [А/мм] – масштабы напряжения и тока на графике.

1.2 Эквивалентные преобразования электрических цепей

На Рисунок 4 представлена электрическая цепь её схемы замещения.

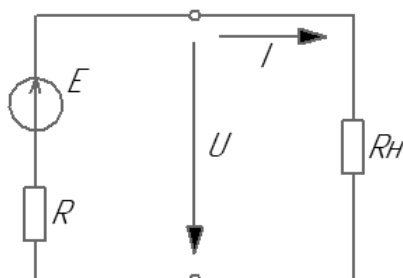


Рисунок 4 – Электрическая цепь схемы замещения

Соотношение между параметрами этой цепи определяется законом Ома, математическая запись которого для внешней цепи:

$$I = \frac{U}{R_n}$$

и для всей цепи:

$$I = \frac{U}{R_n + R_{вн}}$$

С помощью закона Ома можно рассчитывать сложные электрические цепи типа цепи, представленной на Рисунок 5 её схемой замещения, если удастся привести её к схеме, изображённой на Рисунок 4. Для этого применяются определённые правила преобразования электрических схем. Такой метод называется методом эквивалентных преобразований.

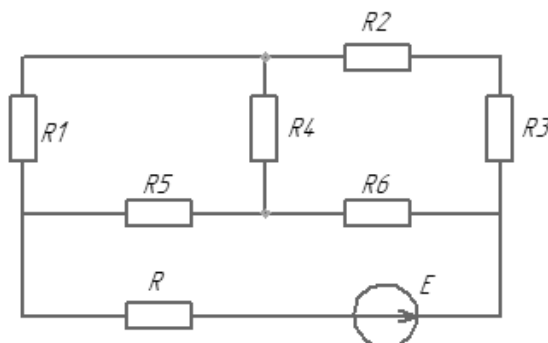


Рисунок 5 – Схема замещения сложной электрической цепи

Можно показать, что n последовательно соединённых резисторов (Рисунок 6а) можно заменить одним эквивалентным резистором, воспользовавшись соотношением:

$$R_{\text{экв}} = \sum_{i=1}^n R_i ,$$

где $R_{\text{экв}}$ – сопротивление эквивалентного резистора,

R_i – сопротивление i -го резистора исходной схемы.

Если n резисторов соединены параллельно (Рисунок бб), то их можно заменить эквивалентным резистором, проводимость которого определяется:

$$G_{\text{экв}} = \sum_{i=1}^n G_i ,$$

где $G_{\text{экв}}$ – проводимость эквивалентного резистора,

G_i – сопротивление i -го резистора исходной схемы.

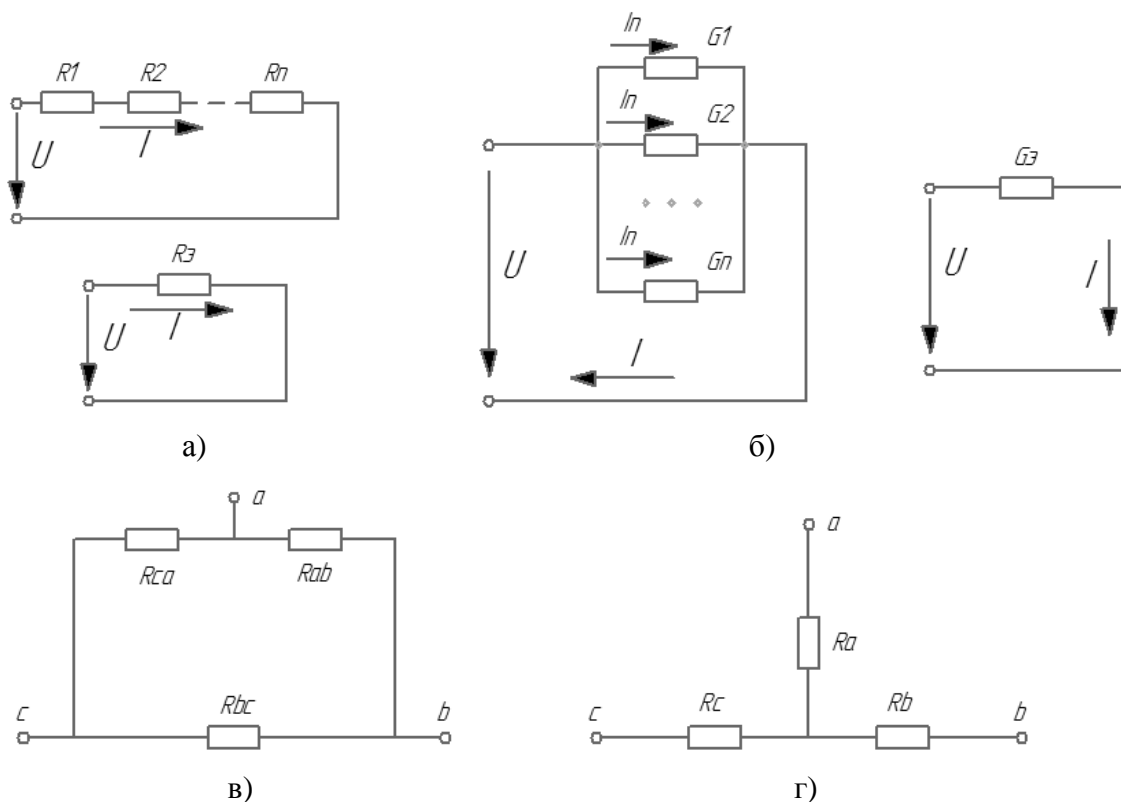


Рисунок 6 – Правила преобразования электрических схем

Зачастую применение первых двух формул не позволяет осуществить эквивалентное преобразование схемы. Например, схема, изображена на Рисунок бв, представляет собой треугольник, вершинами которого являются 3 узла, а сторонами – 3 пассивных приёмника. Такую схему целесообразно преобразовать к виду, изображенному на Рисунок бг (звезда). Соотношение для такого преобразования.

$$R_a = \frac{R_{ab} \cdot R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}$$

$$R_b = \frac{R_{bc} \cdot R_{ab}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}$$

$$R_c = \frac{R_{ca} \cdot R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}$$

Иногда целесообразно обратное преобразование из звезды в треугольник. Соотношение для такого преобразования будут:

$$R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a \cdot R_b}{R_c}$$

$$R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b \cdot R_c}{R_a}$$

$$R_{ca} = R_c + R_a + \frac{R_c \cdot R_a}{R_b}$$

Часто при анализе электрического состояния цепи слабо обращается внимание на топологию электрической цепи и связанные с этим понятия и определения.

Основными понятиями, характеризующими топологию электрической цепи, являются ветвь, узел, контур.

Ветвью называют участок цепи, в котором протекает один и тот же ток, соединяющий 2 узла. Элементы цепи в ветви соединены последовательно. Ветвь называется пассивной, если она не содержит источников питания. Если в ветви имеется источник питания, то ветвь называется активной.

Узлом называется место соединения 3х и более ветвей. Следует различать понятия геометрического и потенциального узла. Так схема на Рисунок 7 имеет 5 потенциальных узлов и 6 геометрических. Геометрические узлы 4 и 4' имеют один и тот же потенциал, поэтому их надо учитывать при расчётах как один потенциальный узел 4.

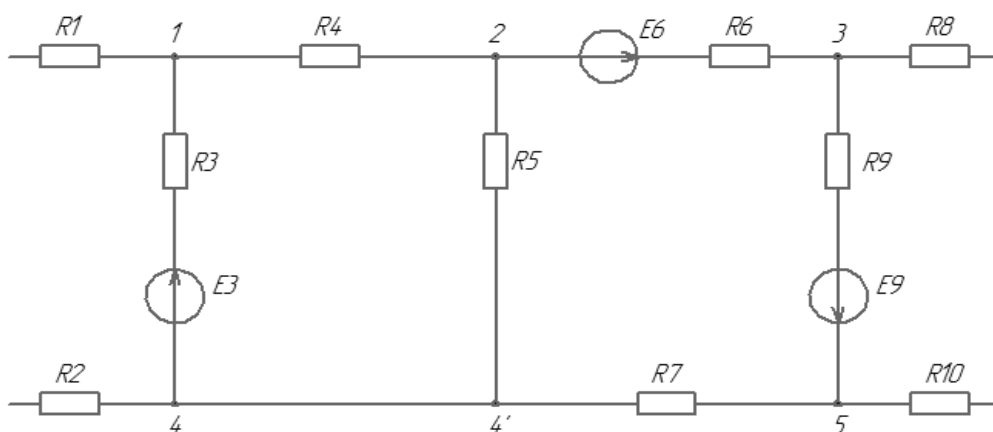


Рисунок 7 – Схема электрической цепи

Контуром называется замкнутое очертание участков цепи, проведённое через несколько ветвей и узлов разветвлённой электрической цепи, например, контур 1-2-4'-4-1 или 2-3-5-4'-2.

При расчёте электрической цепи необходимо договориться об условно-положительном направлении ЭДС, тока и напряжения.

В качестве условно-положительного направления для тока принято направленное движение положительных зарядов от точки с высоким потенциалом (плюса источника питания) к точке с более низким потенциалом.

За направление ЭДС принято направление действия сторонних сил по разделению зарядов (Рисунок 8). Согласно определениям, на рисунке видны особенности направления ЭДС, тока и напряжения внутри источника питания и во внешней цепи.

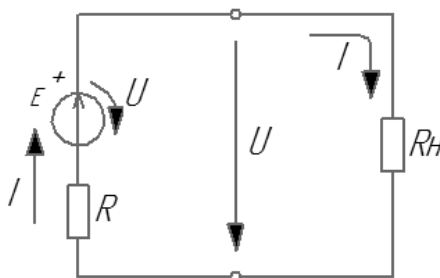


Рисунок 8 – Отображение условно-положительного направления тока

1.3 Анализ электрических цепей на основании законов Кирхгофа

Анализ электрического состояния любой сложной электрической цепи производится на основании законов Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа. Алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в узле, равна нулю: $\sum_{i=3}^n I_i = 0$. Этот закон является следствием закона сохранения заряда и означает, что заряды одного знака не могут накапливаться, убывать.

Второй закон Кирхгофа. Алгебраическая сумма падений напряжений на участках замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС, входящих в этот контур:

$$\sum_{i=2}^n (I_i \cdot R_i) = \sum_{j=0}^l E_j .$$

Количество неизвестных любой разветвлённой цепи равно количеству ветвей.

С помощью первого закона Кирхгофа составляется $m-1$ уравнение, где m – количество потенциальных (не геометрических) узлов. Для любого i -го узла уравнение по первому закону Кирхгофа не составляется, так как его можно получить из уже составленных.

По второму закону Кирхгофа составляются остальные $m-(n-1)$ уравнений, где n – количество ветвей в цепи. Величина $m-(n-1)$ определяет количество элементарных контуров цепи, то есть контуров, не содержащих в себе других контуров.

Пример 1. Пусть дана цепь, представленная схемой замещения на Рисунок 9. Составить в общем виде уравнения по законам Кирхгофа, описывающие состояние этой цепи.

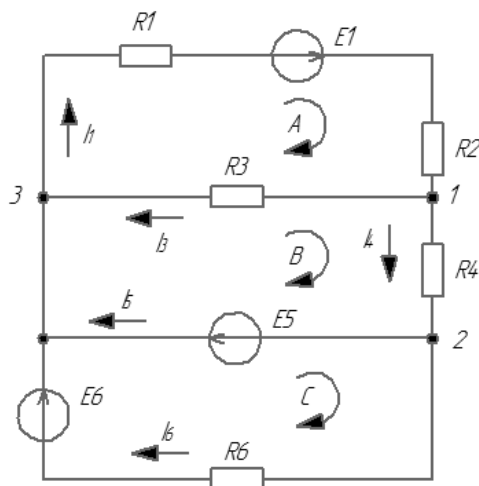


Рисунок 9 – Схема замещения электрической цепи

Количество ветвей в этой цепи – 5, количество узлов – 3.

По первому закону Кирхгофа составим 2 уравнения, по второму закону – 3.

Предписание алгоритмического типа

1. Выбираем условно положительное направление для токов и ЭДС. Для ЭДС они заданы полярностью источников питания, для токов выбираем произвольно.
2. Составляем 2 уравнения по первому закону Кирхгофа. Токи, текущие в узел, берём со знаком «+», вытекающие из узла со знаком «-».

Для узла 1: $I_1 - I_3 - I_4 = 0$

Для узла 2: $I_4 - I_5 - I_6 = 0$.

3. Выбираем условно положительное направление обхода контура. Величины падения напряжения на резисторе и ЭДС берутся со знаком «+», если направление тока и направление ЭДС совпадает с направлением обхода контур.
4. Составляем 3 уравнения по второму закону Кирхгофа:

Контур А: $(R1 + R2) \cdot I_1 + R3 \cdot I_3 = E1$

Контур В: $R4 \cdot I_4 - R3 \cdot I_3 = E5$

Контур С: $R6 \cdot I_6 = E6 - E5$.

5. Совместное решение пяти уравнений даёт искомые неизвестные токи в ветвях.

Для решения домашнего задания с помощью ЭВМ необходимо все коэффициенты уравнения записать в таблицу 1, которая составлена (в общем виде) для системы уравнений примера 1.

Для уменьшения количества уравнений при анализе цепей постоянного тока с помощью законов Кирхгофа целесообразно ввести следующее допущение. В элементарном контуре электрической цепи течёт единый для контура ток, называемый контурным. Тогда справедливо:

1. Первый закон Кирхгофа выполняется автоматически.
2. Составляется $n-(m-1)$ по количеству элементарных контуров уравнений по второму закону Кирхгофа.
3. Падение напряжения на ветви, разграничивающей два соседних контура, равно произведению сопротивления ветви на алгебраическую сумму токов в соседних контурах. Токи суммируются, если их направление в ветви совпадают, в противоположном случае берётся их разность. Причём ток контура, для которого составляется уравнение, всегда положителен.
4. Истинное направление токов в ветви соответствует направлению бóльшего тока.
5. Падение напряжения в ветви, не разграничивающий контур, определяется как произведение сопротивления ветви на контурный ток, в состав которого входит анализируемая ветвь.

Таблица 1 – Коэффициенты уравнения

Коэффициенты при неизвестных					
I_1	I_3	I_4	I_5	I_6	-
1	-1	-1	0	0	0
0	0	1	-1	-1	0
$R1+R2$	$R3$	0	0	0	$E1$
0	$-R3$	$R4$	0	0	$E5$
0	0	0	0	$R6$	$E6-E5$

Пример 2. На Рисунок 10 изображена схема замещения цепи постоянного тока. Найти токи во всех ветвях цепи методом контурных токов.

Предписание алгоритмического типа

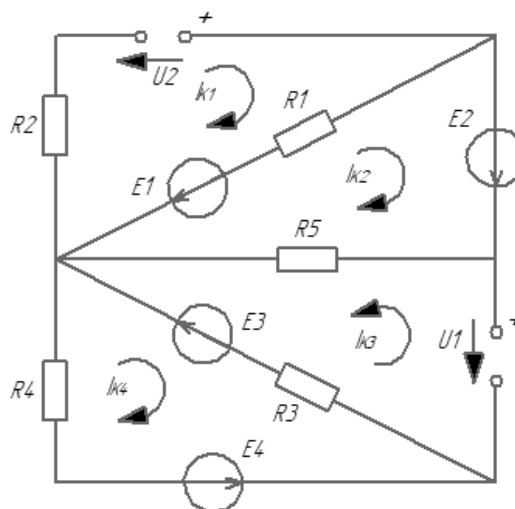


Рисунок 10 – Схема замещения цепи постоянного тока

1. Определяем направления для напряжений и ЭДС, принимаем условно-положительные направления контурных токов.
2. Составляем $n-(m-1)$ уравнения по второму закону Кирхгофа.

$$1 \text{ контур: } (I_{K1} - I_{K2}) \cdot R1 + I_{K1} \cdot R2 - U2 = E1$$

$$2 \text{ контур: } (I_{K2} - I_{K1}) \cdot R1 + (I_{K2} + I_{K3}) \cdot R5 = E2 - E1$$

$$3 \text{ контур: } (I_{K3} - I_{K2}) \cdot R5 + (I_{K4} + I_{K3}) \cdot R3 - U1 = -E3$$

$$4 \text{ контур: } (I_{K4} + I_{K3}) \cdot R3 + I_{K4} \cdot R4 = E4 - E3$$

3. Решая данные уравнения, находим неизвестные контурные токи.
4. Токи в ветвях:

$$I_1 = I_{K1} - I_{K2}$$

$$I_2 = I_{K1}$$

$$I_3 = I_{K3} + I_{K4}$$

$$I_4 = I_{K4}$$

$$I_5 = I_{K3} + I_{K2}$$

$$\text{Ток через источник питания } E2: I_6 = I_{K2}$$

$$\text{Ток в ветви с приложенным напряжением } U1: I_7 = I_{K3}$$

Коэффициенты при неизвестных контурных токах при выполнении домашнего задания сводятся в таблицу, наподобие таблицы 1, как и в методе непосредственного применения законов Кирхгофа.

Большое количество электрических цепей можно свести к схеме, представляющей собой два узла, между которыми расположены несколько параллельных ветвей, содержащих источники питания и приемные элементы (Рисунок 11) (метод двух узлов).

При изучении данного метода необходимо обратить внимание на направление ЭДС E_K , U_{ab} , токов I_K .

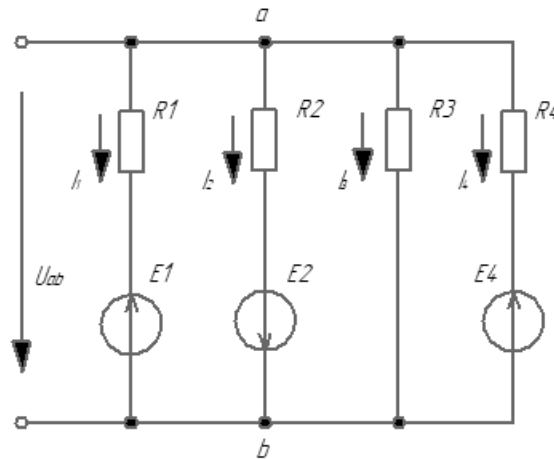


Рисунок 11 – Схема, содержащая несколько параллельных ветвей и источников питания

Для узла «а» имеем:

$$-I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0 \quad (1)$$

Возьмем контур, содержащий первую ветвь, и запишем уравнение по второму закону Кирхгофа:

$$I_1 R_1 - U_{ab} = -E_1$$

Откуда:

$$I_1 = \frac{U_{ab} - E_1}{R_1} = (U_{ab} - E_1) \cdot G_1$$

Аналогично для токов I_2 , I_3 , I_4 :

$$I_2 = (U_{ab} + E_2) \cdot G_2$$

$$I_3 = U_{ab} \cdot G_3 \quad (2)$$

$$I_4 = (U_{ab} - E_4) \cdot G_4$$

Подставим в уравнение (1) получим:

$$(U_{ab} - E_1) \cdot G_1 + (U_{ab} + E_2) \cdot G_2 + U_{ab} \cdot G_3 + (U_{ab} - E_4) \cdot G_4 = 0$$

Откуда:

$$U_{ab} = \frac{E_1 \cdot G_1 - E_2 \cdot G_2 + E_4 \cdot G_4}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4},$$

или в общем виде:

$$U_{ab} = \frac{\sum E_K G_K}{\sum G_K}.$$

Произведение $E_K G_K$ берется со знаком «+», если при направлении узлового напряжения от узла «а» к узлу «б» ЭДС E_K направлена навстречу, и «-» в другом случае.

Для нахождения тока в ветви используют закон Ома (уравнение 2):

$$I_K = \frac{U_{ab} - E_K}{R_K}.$$

В линейных цепях постоянного тока справедлив принцип суперпозиции (независимости) по отношению к источникам питания. Это значит, что ток в какой-либо ветви есть алгебраическая сумма токов, возникающих от действия каждой ЭДС, как если бы она была в электрической цепи одна. Отсюда метод расчета электрической цепи.

Предписание алгоритмического типа

1. Условно все ЭДС, кроме одной, заменяются резистивными элементами с сопротивлением равным внутреннему сопротивлению источника питания.
2. Рассчитывается цепь с одним источником питания методом эквивалентных преобразований. Находят частичные токи в ветвях от действия от одной ЭДС.
3. Выделяют другую ЭДС и проводят все действия, определяемые пунктами 1 и 2 от действий другой ЭДС и т.д.
4. Находят алгебраическую сумму частичных токов в ветвях (с учетом направления этих токов).

По последнему пункту предписания алгоритмического типа при нахождении алгебраической суммы частичных токов от действия каждой ЭДС происходит условное наложение нескольких схем друг на друга, откуда и название метода суперпозиции «метод наложения».

Контрольные вопросы:

1. Что понимают под электрической цепью? Из каких основных элементов она состоит и каковы их функции?
2. Что такое вольт-амперная характеристика? Как ее называют применительно к источнику энергии?
3. В чем состоит различие линейных и нелинейных элементов?
4. Что такое схема электрической цепи?
5. Сформулируйте и запишите закон Ома?
6. Сформулируйте и запишите первый и второй законы Кирхгофа. Как определяется количество уравнений по первому и второму законам Кирхгофа для расчета разветвлённой электрической цепи?
7. Каким должно быть соотношение классов точности образцового и поверяемого амперметров?

8. На шкале измерительного прибора имеется обозначение 1,0. Что это значит?
9. Что понимается под поверкой средств измерений?
10. Прибор какого класса точности следует выбрать для поверки амперметра класса 1,5; 2,5?
11. Возможно ли проведение поверки амперметра класса 1,5 с помощью амперметра класса 0,2?
12. Напишите уравнение шкалы приборов магнитоэлектрической системы.

2 Мгновенные и действующие значения электрических величин.

Векторы

2.1 Мгновенные значения электрических величин

Мгновенные значения синусоидального напряжения u и тока i определяются функциями времени: $u = U_m \sin(\omega t + \alpha_u)$ и $i = I_m \sin(\omega t + \alpha_i)$.

Три величины: амплитуда, начальная фаза и частота – определяют мгновенное значение напряжения и тока в любой момент времени t .

Амплитуды U_m , I_m синусоидальных u и i равны их положительным наибольшим значениям.

Начальные фазы α_u и α_i позволяют найти напряжение и ток при $t = 0$, то есть $u(0) = U_m \sin \alpha_u$ и $i(0) = I_m \sin \alpha_i$.

Угловая частота ω , используемая в расчётах, определяется скоростью изменения полной фазы $(\omega t + \alpha)$. На практике частоту изменения напряжения и токов определяют числом периодов T (циклов) в одну секунду, то есть циклической частотой $f = 1/T$, Гц. Так как изменению угла на 2π соответствует период T , то угловая частота $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$, рад/с.

Разность начальных фаз определяет угол сдвига фаз. Между напряжением и током угол сдвига равен: $\varphi = \alpha_u - \alpha_i$.

Если $\varphi > 0$, то напряжение опережает по фазе тока на угол φ .

При $\varphi < 0$ напряжение отстает от тока на угол φ .

2.2 Действующие значения

В качестве обобщённой количественной оценки, определяющей режим цепи в электротехнике, вводится понятие действующего значения напряжения и тока, иногда называемого эффективным и обозначаемым $U_{эфф}$, $I_{эфф}$. В виду частого использования этого понятия в электротехнической практике и теории, в отечественной литературе употребляются обозначения без индексов U , I .

Физический смысл действующих значений U , I переменного тока состоит в том, что они равны по механическому и тепловому проявлению этим же значениям постоянным во времени напряжениям и токам.

Математически действующее значение для периодически изменяющейся величины равно среднеквадратичному:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}, \quad I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

Для синусоидальных величин получается:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Действующее значение не зависит от времени, частоты и начальной фазы.

Вольтметр и амперметр переменного тока чаще всего предназначены для измерения действующих значений.

Векторы

Расчёт цепей синусоидального тока становится значительно проще, если синусоидальные электрические величины представить векторами и комплексными числами.

Так, синусоидальному напряжению $u = U_m \sin(\omega t + \alpha_u)$ ставится в соответствие комплексная амплитуда $\dot{U}_m = U_m e^{j\alpha_u}$ на комплексной плоскости (Рисунок 12). По оси абсцисс откладывается действительная составляющая комплексной амплитуды, по оси ординат – мнимая составляющая.

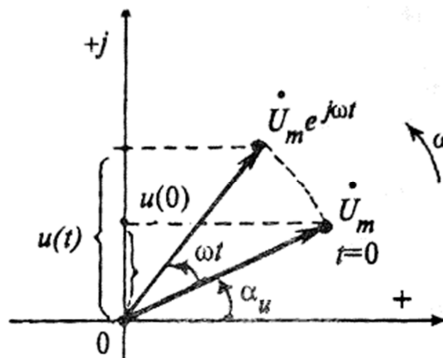


Рисунок 12 – Синусоидальное напряжение на комплексной плоскости

Положительные углы отсчитываются от действительной оси против часовой стрелки. Таким образом, длина вектора \dot{U}_m равна амплитуде U_m и расположена под углом α_u относительно действительной оси. Если эту комплексную амплитуду вращать со скоростью ω против часовой стрелки, то её проекция на мнимую ось даст мгновенное значение напряжения $u(t)$.

Таким образом, $u(t) = I_m (\dot{U}_m e^{j\alpha u})$. Символ I_m означает, что берётся мнимая часть функции $\dot{U}_m e^{j\alpha u}$.

Часто векторы представляют на комплексной плоскости для действующего значений при $t = 0$.

2.3 Фазовое соотношение между напряжениями и токами на резисторе R , индуктивной катушке L и конденсаторе C

Пусть по элементам R, L, C протекает синусоидальный ток

$$i = I_m \sin \omega t .$$

Мгновенное значение напряжения на резисторе R

$$u_R = R i = R I_m \sin \omega t ,$$

то есть напряжение на резисторе совпадает по фазе с током. В комплексной форме это равенство имеет вид $\dot{U}_R = R \dot{I}$. Осциллограммы u_R, i и векторная диаграмма \dot{U}_R и \dot{I} представлены на Рисунок 13.

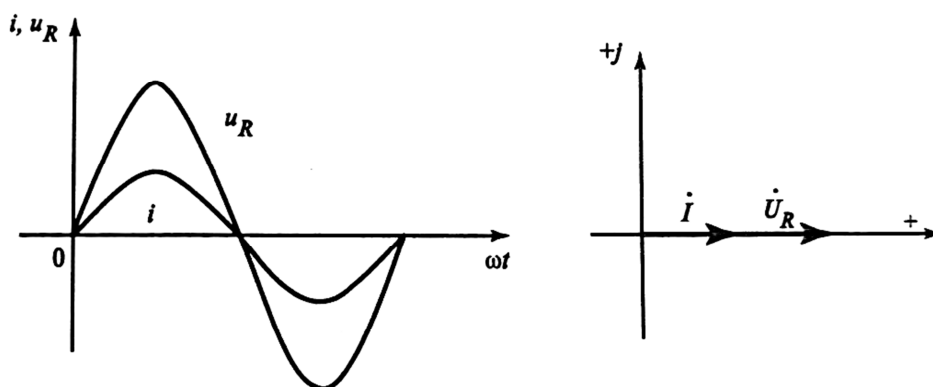


Рисунок 13 – Осциллограммы и векторная диаграмма тока и напряжения при мгновенном значении напряжения на резисторе

Мгновенное значение напряжения на катушке L

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos \omega t = \omega L I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}),$$

то есть напряжение на катушке индуктивности опережает по фазе ток на угол $\pi/2$.

Комплексная форма этого равенства $\dot{U}_L = j \omega L \dot{I} = j x_L \dot{I}$. Осциллограммы u_L, i и векторная диаграмма \dot{U}_L, \dot{I} представлены на Рисунок 14.

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt = -\frac{1}{\omega C} I_m \cos \omega t = \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}),$$

то есть напряжение на конденсаторе отстаёт по фазе от тока на угол $\pi/2$.

Комплексная форма этого равенства $\dot{U}_C = -j \frac{1}{\omega C} \dot{I} = -j x_C \dot{I}$. Осциллограммы u_C , i и векторная диаграмма \dot{U}_C , \dot{I} представлены на Рисунок 15.

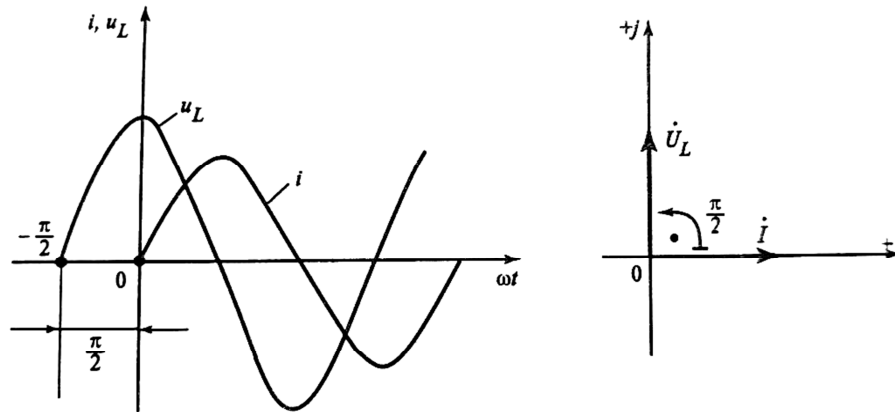


Рисунок 14 – Осциллограммы и векторная диаграмма тока и напряжения при мгновенном о напряжении на катушке

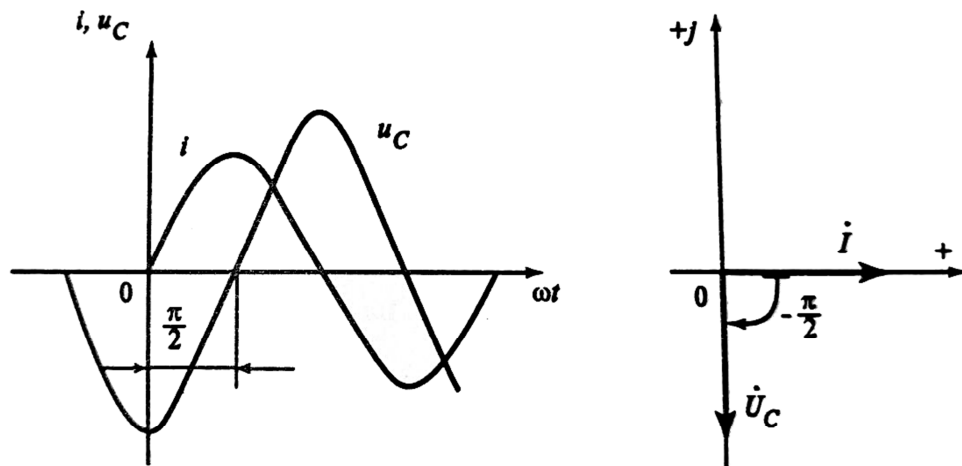


Рисунок 15 – Осциллограммы и векторная диаграмма тока и напряжения при мгновенном о напряжении на конденсаторе

Значение $j = \sqrt{-1} = 1e^{j\frac{\pi}{2}} = 1e^{j90^\circ}$. Часто j используется как символ, обозначающий мнимую составляющую комплексного числа. Умножение какого-либо вектора на j соответствует его повороту на угол, равный $\pi/2$ в положительном направлении. Таким образом, j может рассматриваться и как оператор поворота с модулем равным 1 и аргументом, равным $\pi/2$. Последнее становится очевидным при рассмотрении векторных диаграмм Рисунок 14, Рисунок 15 и соответствующих им аналитических выражений, устанавливающих связь между напряжениями и токами в комплексной форме.

2.4 Схемы замещения пассивного двухполюсника. Параметры двухполюсника

Рассматриваем цепь как пассивный двухполюсник, на фиксированной частоте, можно охарактеризовать её эквивалентными параметрами r и x последовательной схемы замещения, g и b параллельной схемы замещения. Схемы и векторные диаграммы для индуктивного двухполюсника представлены на Рисунок 16а, а для емкостного двухполюсника – на Рисунок 16б.

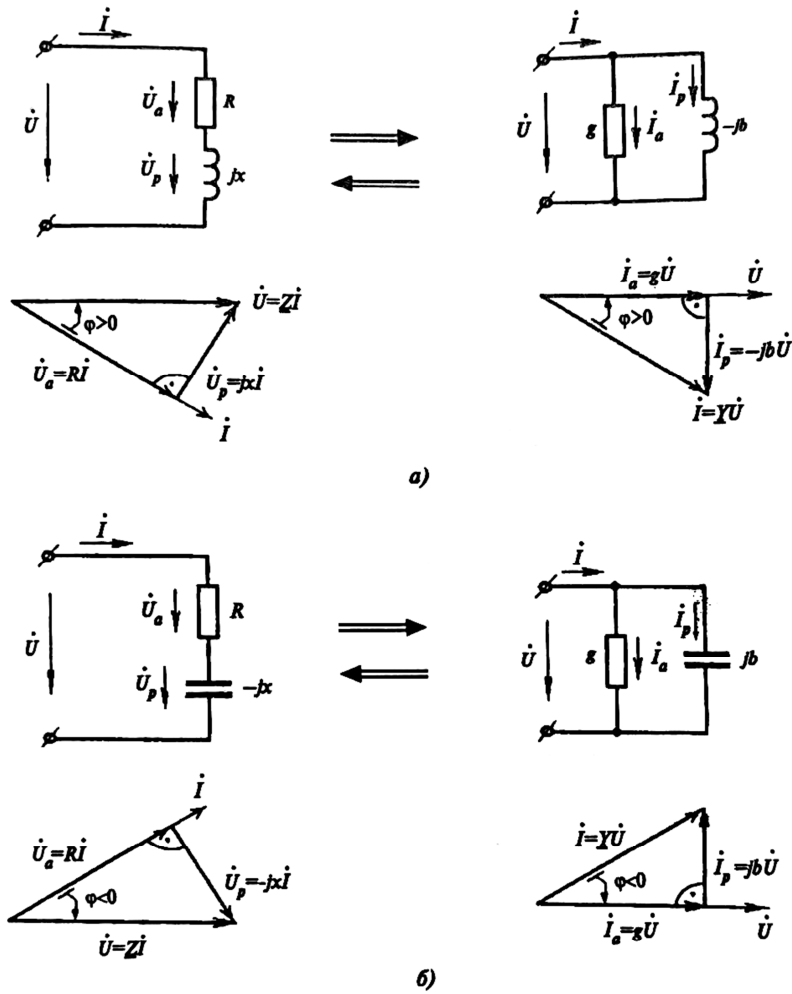


Рисунок 16 – Схемы замещения пассивного двухполюсника

Последовательная и параллельная схемы замещения двухполюсника эквивалентны, поскольку потребляют от источника одинаковый ток. Для последовательно и параллельной схемы замещения пассивного двухполюсника имеет место закон Ома в виде $\dot{U} = \underline{Z} \dot{I}$ и $\dot{I} = \underline{Y} \dot{U}$.

Найдём связь параметров последовательной и параллельной схем замещения.

Для индуктивного двухполюсника имеем:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{R + jx_L} = \frac{R - jx_L}{R^2 + x_L^2} = \frac{R}{R^2 + x_L^2} - j \frac{x_L}{R^2 + x_L^2} = g - jb_L,$$

то есть

$$g = \frac{R}{R^2 + x_L^2};$$

$$b_L = \frac{x_L}{R^2 + x_L^2};$$

$$\underline{Z} = \frac{1}{\underline{Y}} = \frac{1}{g + jb_L} = \frac{g - jb_L}{g^2 + b_L^2} = \frac{g}{g^2 + b_L^2} + j \frac{b_L}{g^2 + b_L^2} = R + jx_L,$$

то есть

$$R = \frac{g}{g^2 + b_L^2};$$

$$x_L = \frac{b_L}{g^2 + b_L^2}.$$

Для ёмкостного двухполюсника имеем:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{R - jx_C} = \frac{R + jx_C}{R^2 + x_C^2} = \frac{R}{R^2 + x_C^2} + j \frac{x_C}{R^2 + x_C^2} = g + jb_C,$$

то есть

$$g = \frac{R}{R^2 + x_C^2};$$

$$b_C = \frac{x_C}{R^2 + x_C^2};$$

$$\underline{Z} = \frac{1}{\underline{Y}} = \frac{1}{g + jb_C} = \frac{g - jb_C}{g^2 + b_C^2} = \frac{g}{g^2 + b_C^2} - j \frac{b_C}{g^2 + b_C^2} = R - jx_C,$$

то есть

$$R = \frac{g}{g^2 + b_C^2};$$

$$x_C = \frac{b_C}{g^2 + b_C^2}.$$

2.5 Определение комплексного сопротивления пассивного двухполюсника методом трех вольтметров

При использовании метода трех вольтметров пассивный двухполюсник Z_A , как и двухполюсник Z_B , последовательно соединяют резистором r и подключают к источнику синусоидального напряжения, как показано на Рисунок 17.

Сопротивление резистора r задано, его значение для удобства проведения измерений должно быть того же порядка, что и измеряемое полное сопротивление двухполюсника. Напряжения U_1 , U_2 , U_3 , как модули, измеряют одним и тем же вольтметром. При этом для согласования земляных зажимов генератора и вольтметра практически пользуются двумя схемами с изменением порядка включения элементов Z_A и r . Эти схемы приведены на Рисунок 18 и на Рисунок 19 напряжение питания в обеих схемах должно быть одинаковым.

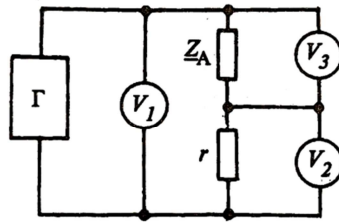


Рисунок 17 – Подключение по методу трех вольтметров

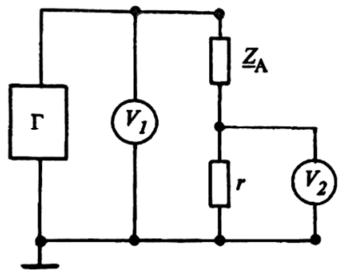


Рисунок 18 – Схема 1 для согласования земляных зажимов генератора и вольтметра

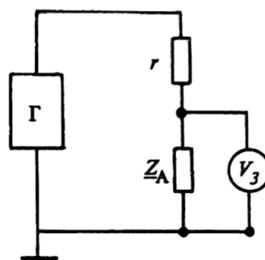


Рисунок 19 – Схема 2 для согласования земляных зажимов генератора и вольтметра

2.6 Аналитический расчёт параметров двухполюсников по известным показаниям трех вольтметров

По значениям напряжения U_2 и сопротивления резистора r вычисляют ток двухполюсника

$$I = \frac{U_2}{r}.$$

Далее находят модуль сопротивления двухполюсника Z_A и модуль сопротивления всей ветви Z , то есть модульного сопротивления:

$$Z_A = \frac{U_3}{I},$$
$$Z = \frac{U_1}{I}.$$

Найденные значения модулей Z_A и Z связаны с активным r_A и реактивным x_A сопротивлениями двухполюсника следующими равенствами:

$$Z_A^2 = r_A^2 + x_A^2,$$
$$Z^2 = (r_A + r)^2 + x_A^2.$$

Взяв разность левых и правых частей этих уравнений, получим

$$Z^2 - Z_A^2 = r^2 + 2rr_A.$$

Отсюда активное сопротивление двухполюсника

$$r_A = \frac{Z^2 - Z_A^2 - r^2}{2r}.$$

Реактивное сопротивление двухполюсника:

$$x_A = \pm \sqrt{Z_A^2 - r_A^2}.$$

Положительное значение x_A соответствует активно-индуктивному, а отрицательное значение – активно-емкостному двухполюснику Z_A . Сопротивление в комплексной форме:

$$\underline{Z}_A = r_A \pm jx_A.$$

Метод трех вольтметров не позволяет без дополнительных опытов определить знак реактивного сопротивления двухполюсника. Один из способов определения знака будет рассмотрен далее.

2.7 Графическое определение параметров двухполюсника

По данным показаний трех вольтметров комплексное сопротивление двухполюсника рассчитывается графически с помощью построение векторных диаграмм. Сначала строится вектор тока \dot{I} , направленный по действительной оси; далее, как видно из Рисунок 20, – вектор напряжения на резисторе \dot{U}_2 , совпадающий по фазе с током \dot{I} . Положение векторов напряжения \dot{U}_1 и \dot{U}_3 , учитывая то, что $\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \dot{U}_3$, определяется точкой пересечения окружностей с радиусами соответствующими модулям \dot{U}_1 и \dot{U}_3 , которые проводят из конца и начала вектора \dot{U}_2 . Эти построения показаны на Рисунок 20.

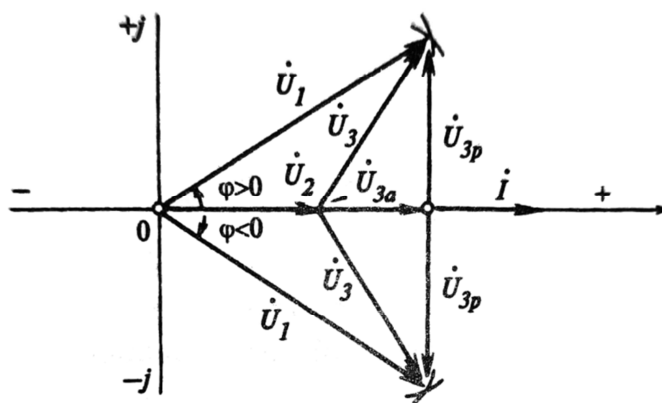


Рисунок 20 – Векторные диаграммы напряжений

В соответствии с приведёнными построениями получаются два решения. Верхняя часть построения соответствует индуктивному ($\varphi > 0$), а нижняя часть – емкостному ($\varphi < 0$) характеру сопротивления двухполюсника Z_A . Для определения характера сопротивления в методе трёх вольтметров нужны дополнительные измерения.

Напряжение \dot{U}_3 раскладывается на активную \dot{U}_{3a} (совпадает по фазе с \dot{I}) и реактивную \dot{U}_{3p} (перпендикуляр на току \dot{I}) составляющие.

При этом активное и реактивное сопротивление двухполюсника Z_A находится из соотношений

$$r_A = \frac{U_{3a}}{I},$$

$$x_A = \pm \frac{U_{3p}}{I}.$$

а комплексное сопротивление \underline{Z}_A запишем в виде

$$\underline{Z}_A = r_A \pm jx_A = Z_A \angle \pm \varphi_A.$$

2.8 Определение знака реактивной составляющей двухполюсника

Для определения знаков реактивных составляющих сопротивлений двухполюсников рекомендуется воспользоваться способом, основанным на зависимости сопротивления двухполюсника от частоты.

Необходимо использовать генератор, который позволяет измерять частоту питающего напряжения. Если двухполюсник Z_A , имеет индуктивный характер, то с ростом частоты его реактивное сопротивление $x_A = \omega L$ возрастает, а при неизменном напряжении генератора U_1 общий ток цепи I уменьшается, уменьшается и напряжение U_2 . Если двухполюсник Z_A имеет емкостной характер, то с ростом частоты ω его реактивное сопротивление $x_A = \frac{1}{\omega C}$ уменьшается, а при неизменном напряжении генератора U_1 , общий ток цепи I увеличивается, увеличивается и напряжение U_2 .

Таким образом, если при увеличении частоты питания (например, на 10%) напряжение U_2 уменьшается, то характер \underline{Z}_A индуктивный:

$$\underline{Z}_A = r_A + jx_A = Z_A \angle \varphi_A.$$

если U_2 увеличивается – ёмкостной:

$$\underline{Z}_A = r_A - jx_A = Z_A \angle -\varphi_A.$$

2.9 Определение параметров пассивного двухполюсника с помощью измерений, выполненных вольтметром и фазометром

Для нахождения действительной и мнимой составляющих сопротивления двухполюсника

$$\underline{Z}_A = r_A + jx_A$$

собирается цепь Рисунок 21. При этом последовательно с двухполюсником \underline{Z}_A включается резистор r , необходимый для измерения тока двухполюсника и использования напряжения на нём как опорного с начальной фазой равной нулю.

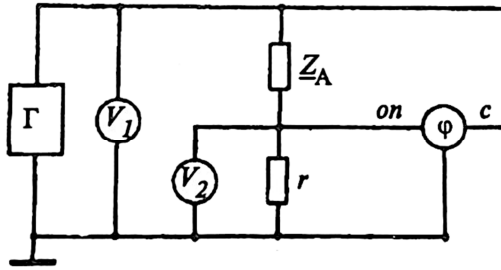


Рисунок 21 – Цепь для нахождения действительной и мнимой составляющих двухполюсника

Вольтметром V_1 измеряется напряжение питания U_1 . Это напряжение равно модулю суммы падений напряжений на двухполюснике \underline{Z}_A и резисторе r . Очевидно, входное сопротивление цепи $\underline{Z} = \underline{Z}_A + r$.

Вольтметром V_2 измеряется напряжение U_2 на резисторе r с известным сопротивлением.

Фазометр включён таким образом, что опорное напряжение снимается с резистора r , совпадающее по фазе с током в цепи. Напряжение сигналов фазометра представляет собой напряжение питания U_1 . Учитывая, что начальная фаза опорного напряжения равна нулю, фазометр в рассматриваемой схеме показывает фазу φ напряжения питания \dot{U}_1 относительно тока \dot{I} в последовательной цепи.

Таким образом, модуль тока двухполюсника

$$I = \frac{U_2}{r},$$

модуль входного сопротивления цепи

$$Z = \frac{U_1}{I}.$$

Показания фазометра φ определяет фактически аргумент этого сопротивления.

Входное сопротивление цепи в комплексной форме

$$\underline{Z} = Z \angle \varphi = Z \cos \varphi + jZ \sin \varphi$$

или

$$\underline{Z} = \underline{Z}_A + r = r_A + r + jx_A.$$

Подставляя выражение Z и приравнявая в последних двух равенствах отдельно действительные и мнимые части, получают формулы

$$r_A = \frac{U_1 r}{U_2} \cos \varphi - r,$$

$$x_A = \frac{U_1 r}{U_2} \sin \varphi.$$

Эти формулы позволяют находить искомые значения сопротивлений, если известны измеренные по схеме рисунка 5 величины U_1 , U_2 , φ и резистор r .

Очевидно, если $\varphi > 0$, то $x_A > 0$ и двухполюсник активно-индуктивный, то есть напряжение опережает по фазе ток. При $\varphi < 0$, $x_A < 0$ – двухполюсник активно-емкостной и напряжение отстает по фазе от тока.

Модуль Z_A и аргумент φ_A сопротивления двухполюсника определяются из выражений

$$Z_A^2 = r_A^2 + x_A^2,$$

$$\cos \varphi_A = \frac{r_A}{Z_A}.$$

2.10 Компенсация реактивной мощности активно-индуктивных приёмников

Для повышения коэффициента мощности активно-индуктивных приёмников применяют компенсацию их реактивной мощности с помощью конденсаторов. При этом используют параллельное включение приёмника и компенсирующего конденсатора, что позволяет сохранить режим работы приёмника неизменным.

На Рисунок 22 представлены: схема параллельного включения двухполюсника Z_n и конденсатора C (Рисунок 22а), векторные диаграммы токов и напряжения (Рисунок 22б), треугольники проводимостей (Рисунок 22в) и треугольники мощностей (Рисунок 22г). Векторная диаграмма токов и треугольники мощностей построены исходя из условия, что напряжение U на двухполюснике остаётся неизменным при осуществлении компенсации реактивной мощности.

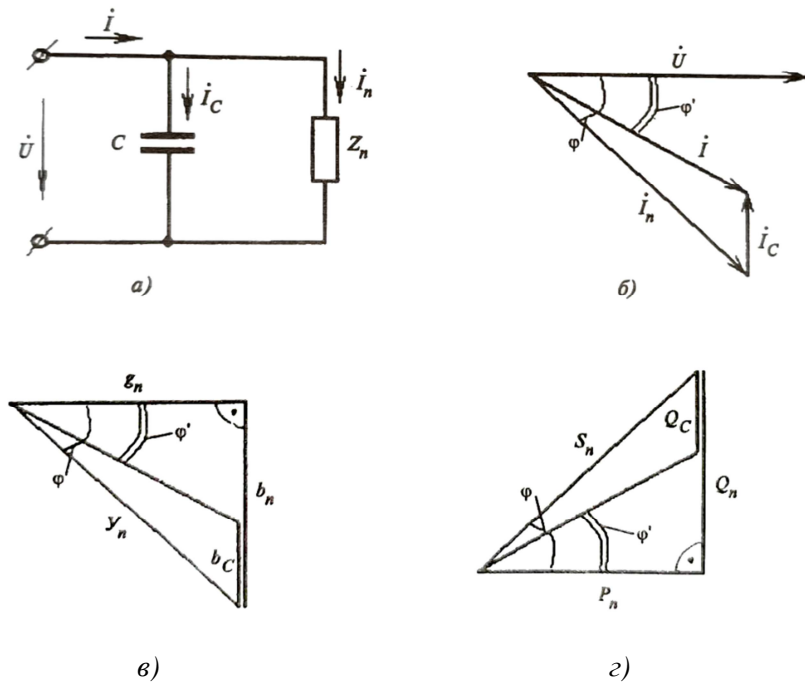


Рисунок 22 – Схема параллельного соединения двухполюсника и конденсатора

Из треугольника мощностей (Рисунок 22г) видно, что компенсирующий конденсатор позволяет снизить реактивную мощность приёмника на значение Q_c . Зная параметры параллельной схемы замещения g_n и b_n двухполюсника, можно на основании треугольников проводимостей (Рисунок 22в) рассчитать ёмкость компенсирующего конденсатора, который позволит повысить коэффициент мощности $\cos \varphi$ приёмника до требуемого значения $\cos \varphi'$. Как очевидно,

$$b_c = b_n - g_n \operatorname{tg} \varphi',$$

поэтому

$$C = \frac{b_c}{\omega} = \frac{b_n - g_n \operatorname{tg} \varphi'}{\omega}.$$

Контрольные вопросы

1. Какие методы применяют для определения параметров последовательной и параллельной схем замещения пассивного двухполюсника? В чем заключается суть каждого метода?

2. Как определяют параметры последовательной схемы замещения пассивного двухполюсника методом трех вольтметров при аналитическом расчете и построением векторных диаграмм? Каким способом устанавливают знак реактивного сопротивления двухполюсника?

3. Что такое действующее значение напряжения синусоидальной формы? Как оно связано с амплитудным значением синусоиды?
4. Как записать по заданному комплексу мгновенное значение гармонического напряжения?
5. Как записать по заданному мгновенному гармоническому напряжению соответствующий ему комплекс?
6. Какое значение напряжения показывает вольтметр, используемый в работе?
7. Как измерить ток цепи с помощью электронного вольтметра?
8. Как нужно включить фазометр для измерения фазы напряжения относительно тока?
9. Как нужно включить фазометр для измерения фазы тока относительно напряжения?
10. Как перейти от параметров последовательной схемы замещения к параметрам параллельной схемы замещения пассивного двухполюсника?
11. Как перейти от параметров параллельной схемы замещения к параметрам последовательной схемы замещения пассивного двухполюсника?
12. Как определить параметры последовательной схемы замещения двухполюсника, эквивалентного двум последовательно включенным пассивным двухполюсникам, если известны:
 - а) комплексные сопротивления;
 - б) комплексные проводимости этих двухполюсников?
13. Как определить параметры параллельной схемы замещения двухполюсника, эквивалентного двум параллельно включенным пассивным двухполюсникам, если известны:
 - а) комплексные проводимости;
 - б) комплексные сопротивления этих двухполюсников?
14. Что такое коэффициент мощности приемника и как его определяют по известным параметрам последовательной и параллельной схем замещения?
15. С какой целью и каким образом осуществляют компенсацию реактивной мощности активно-индуктивного приемника?
16. Как рассчитать емкость компенсирующего конденсатора при включении его параллельно активно-индуктивному приемнику, если необходимо повысить коэффициент мощности $\cos \varphi$ приёмника до требуемого значения $\cos \varphi'$?

17. Как экспериментально определить ток ветви при отсутствии амперметра? Какому условию должно удовлетворять сопротивление резистора, используемого при измерениях?

18. Чему равны комплексное и полное сопротивления последовательного соединения:

- а) индуктивной катушки и резистора;
- б) конденсатора и резистора?

19. В каких пределах может изменяться разность фаз напряжения и тока для последовательного соединения:

- а) индуктивной катушки и резистора;
- б) конденсатора и резистора?

Приведите векторные диаграммы.

20. Чему равны комплексное и полное сопротивления последовательного соединения резистора, индуктивной катушки и конденсатора?

21. В каких пределах может изменяться разность фаз напряжения и тока для последовательного соединения резистора, индуктивной катушки и конденсатора?

Приведите векторные диаграммы.

22. Чему равны комплексная и полная проводимости параллельного соединения:

- а) индуктивной катушки и резистора;
- б) конденсатора и резистора?

23. В каких пределах может изменяться разность фаз напряжения и тока для параллельного соединения:

- а) индуктивной катушки и резистора;
- б) конденсатора и резистора?

Приведите векторные диаграммы.

24. Чему равны комплексная и полная проводимости параллельного соединения резистора, индуктивной катушки и конденсатора?

25. В каких пределах может изменяться разность фаз напряжения и тока для параллельного соединения резистора, индуктивной катушки и конденсатора? Приведите векторные диаграммы.

3 Полупроводниковые приборы

3.1 Полупроводниковые резисторы

Полупроводниковые резисторы – полупроводниковый прибор в двумя выводами, где используется зависимость электрического сопротивления полупроводника от напряжения, температуры, освещенности и от других внешних воздействий.

Для производства большой группы резисторов используют полупроводник, равномерно легированный примесями. В зависимости от типа примесей, их соотношения и конструкции получают различные зависимости от управляющих параметров.

Условно полупроводниковые резисторы можно разделить на две группы: линейные и нелинейные.

Удельное электрическое сопротивление линейных резисторов мало зависит от напряженности магнитного поля и плотности электрического тока. По этой причине сопротивление линейного полупроводникового резистора остается практически постоянным в широком диапазоне токов и напряжений.

Нелинейные резисторы широко используют в качестве преобразователей неэлектрических величин в электрический сигнал. К этой группе резисторов относят терморезисторы, фоторезисторы, тензорезисторы и др.

Терморезисторы – полупроводниковый резистор, в котором используется зависимость электрического сопротивления полупроводника от температуры. Различают два вида: термистор (сопротивление с ростом температуры падает), позистор (сопротивление возрастает с ростом температуры). Терморезисторы применяют в схемах регулирования температуры, тепловой защиты, противопожарной сигнализации.

Фоторезистор – полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит от освещенности.

Тензорезистор – полупроводниковый резистор, в котором используется зависимость электрического сопротивления от механической деформации.

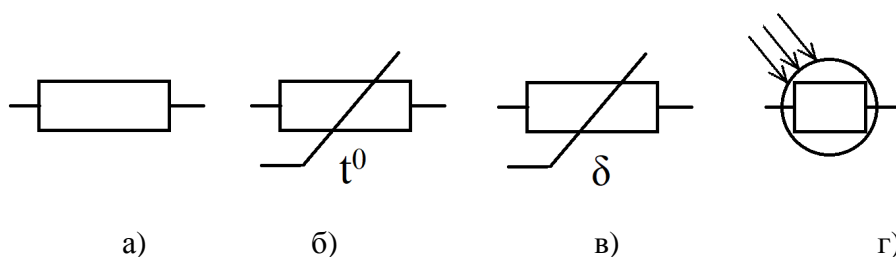


Рисунок 23 – Условные обозначения резисторов (а – линейные резисторы, б – терморезисторы, в – тензорезисторы, г – фоторезисторы)

3.2 Полупроводниковые диоды

Полупроводниковые диоды – это полупроводниковые прибор с одним р-п – переходом и двумя выводами. Все полупроводниковые диоды делятся на два класса: точечные и плоскостные. В точечном диоде используется пластина германия или кремния с электропроводимостью n-типа, толщиной 0,1- 0,6 мм и $S=0,5 – 1,5 \text{ мм}^2$. С пластинкой соприкасается зачищенная стальная проволоочка. Из-за малой площади контакта прямой ток и межэлектродная емкость таких диодов малы. Применяются в выпрямителях переменного тока.

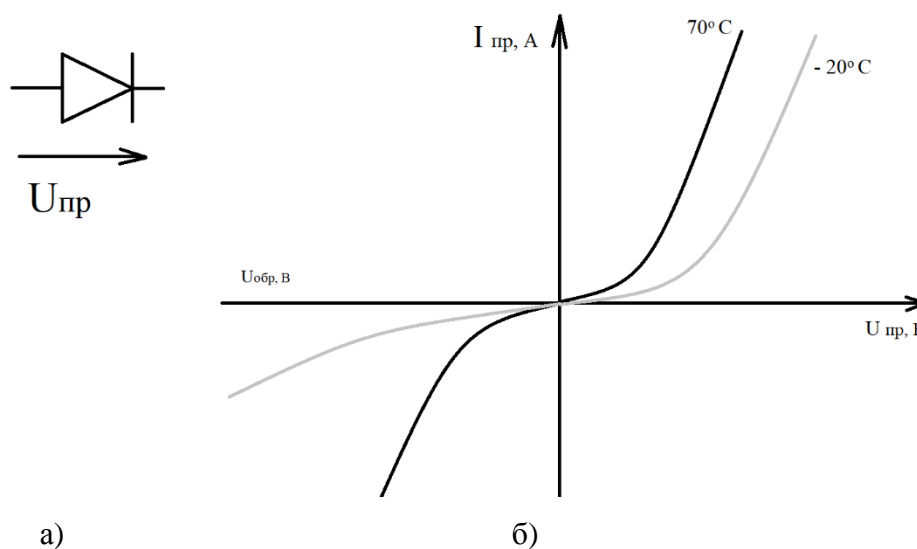


Рисунок 24 – Графические изображения диода (а – условные обозначения диода, б – вольт-амперная характеристика диода)

В плоскостных диодах р-п–переход образуется двумя полупроводниками с разными типами электронной проводимости. По способу внедрения примесей диоды делятся сплавные и диффузионные.

Электрические характеристики плоскостного диода определяется характеристиками р-п–перехода.

Выпрямительный полупроводниковый диод предназначен для выпрямления переменного тока промышленной частоты. Благодаря большой площади перехода прямой ток плоскостных диодов составляет от 1 до нескольких тысяч ампер. Температура нагрева такого диода не должно превышать 85°C . Кремневые диоды могут работать до 150°C . Для охлаждения используют радиаторы, обдув. Диоды допускают 50-100 кратную перегрузку в течение 0,1 сек.

В случае приложения к диоду большого обратного напряжения может произойти лавинный пробой p-n-перехода; обратный ток при этом резко увеличивается, что вызывает нагрев диода. Большинство диодов могут надежно работать при обратных напряжениях не выше 0,7 – 0,8 величины пробивного напряжения.

Таблица 2 – Основные параметры диода

Прямое напряжение	$U_{пр}$
Максимально допустимый ток диода	$I_{пр.мах}$
Максимально допустимое обратное напряжение	$U_{обр.мах}$
Обратный ток диода	$I_{обр}$

Для получения более высокого обратного напряжения диоды можно включать последовательно, подбирая при этом диоды идентичными характеристиками. Сложные соединения диодов имеются в силовых диодных сборках. В них для увеличения прямого тока диоды соединяют параллельно, а для увеличения обратного напряжения – последовательно.

Группы идентичных маломощных диодов выпускают в виде диодных матриц и диодных скобок. В матрицах диоды присоединены к одному общему выводу, что облегчает их использование в логических устройствах и дешифраторах; в диодных сборках применяются последовательные, параллельные, мостовые и другие соединения.

Полупроводниковый стабилитрон – это диод, напряжение на котором в области электрического пробоя слабо зависит от тока, который служит для стабилизации напряжения (Рисунок 25).

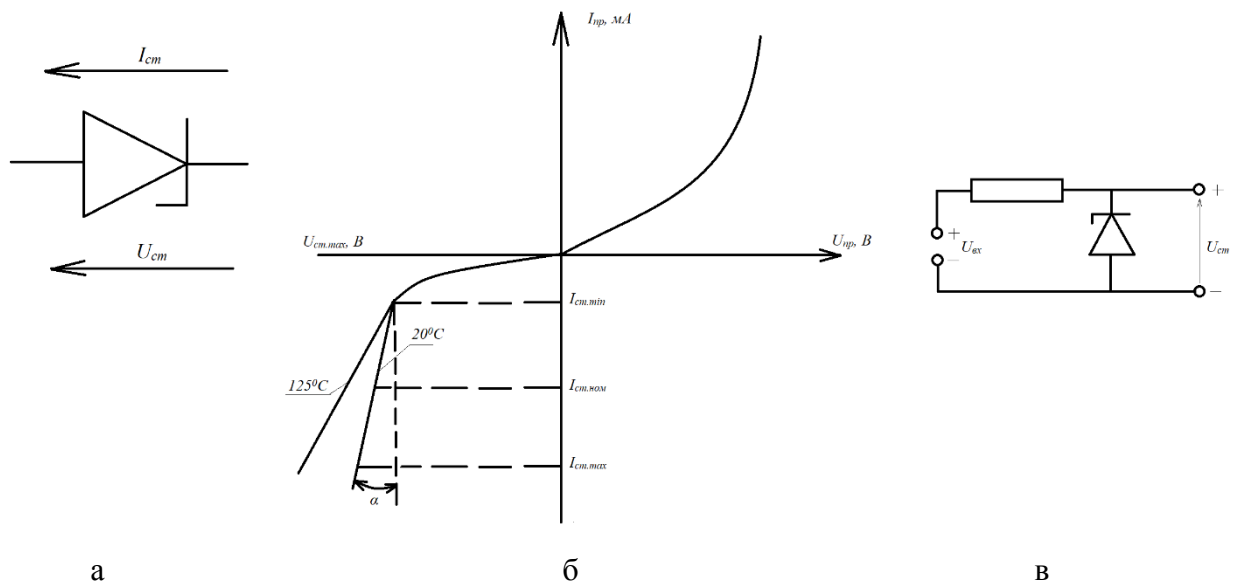


Рисунок 25 – Графические изображения полупроводникового стабилитрона (а – условные обозначения стабилитрона, б – вольт-амперная характеристика стабилитрона, в – схема подключения стабилитрона)

Если подключить к диоду напряжение обратной полярности (минус к области с дырочной проводимостью), то собственное поле р-п-перехода и поле внешнего источника складываются. Это приводит к некоторому увеличению обратного тока, обусловленного неосновными носителями. По мере увеличения обратного напряжения, ток внезапно резко возрастает – происходит электрический пробой р-п-перехода. При этом неосновные носители ускоряются электрическим полем р-п-перехода настолько, что их энергия оказывается достаточной для ударной ионизации атомов полупроводника.

Вольтамперная характеристика в режиме электрического пробоя практически параллельна оси тока. Ток $I_{об}$ резко возрастает, а напряжение $U_{ст}$ постоянно. Это позволяет использовать полупроводниковые диоды в режиме пробоя в качестве стабилитронов напряжения – стабилитронов. Стабилитроны выполняются из кремния и могут стабилизировать напряжение в пределах единиц сотен В. Принципиальная схема простейшего стабилитрона напряжения $U_{вх}$ на основе стабилитрона КС133 и резистора R приведен на Рисунок 26.

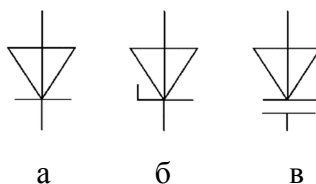


Рисунок 26 – Принципиальная схема простейшего стабилитрона напряжения
(а – выпрямительные, импульсные, СВЧ, б – стабилитроны, в – варикапы)

Стабилизация напряжений ниже 1В достигается использованием кремниевых диодов, включённых в прямом направлении (называемых стабистор) и обеспечивающих стабильное напряжение 0,7-1 В.

Варикап – это полупроводниковый диод, в котором используется зависимость ёмкости р-п-перехода от обратного напряжения. Если к диоду приложено небольшое напряжение обратной полярности, то в зоне перехода практически отсутствуют носители тока, в то же время они имеют как n- , так и p- области. Таким образом образуется плоский конденсатор, где р-п-переход играет роль изолятора между двумя проводящими областями. Увеличение напряжения приводит к расширению зоны перехода, уменьшение её – к сужению, и соответственно, уменьшается или увеличивается эквивалентная электрическая ёмкость р-п-перехода в широких пределах при изменении приложенного напряжения.

Диоды, работающие на сверхвысоких частотах, обычно точечные, и p-n-переходы в них очень часто образуют контакты металл-полупроводник (такие диоды называются

диодами Шотки). Вследствие этого в области р-п-перехода почти не происходит накопления и сравнительно медленного распределения носителей заряда (как это происходит в обычных диодах) и процессы выпрямления, переключения или выпрямления СВЧ сигналов протекают и весьма быстро.

Условные обозначения основных видов диодов электронных схемы приведены на Рисунок 26.

3.3 Биполярные транзисторы (БТ)

Транзистор (или полупроводниковый триод), являясь управляемым элементом, нашёл широкое применение в схемах усиления, а также в импульсных схемах. Отсутствие накала, малые габариты и стоимость, высокая надёжность – таковы преимущества, благодаря которым транзистор вытеснил электронные лампы.

БТ представляет собой трёхслойную полупроводниковую структуру и содержит два р-п-перехода. В качестве исходного материала для получения трёхслойной структуры используют германий и кремний (кремниевые и германиевые транзисторы). В зависимости от чередования слоёв существует транзисторы р-п-р-типа и п-р-п-типа. Их условные обозначения на электронных схемах показаны на Рисунок 27.

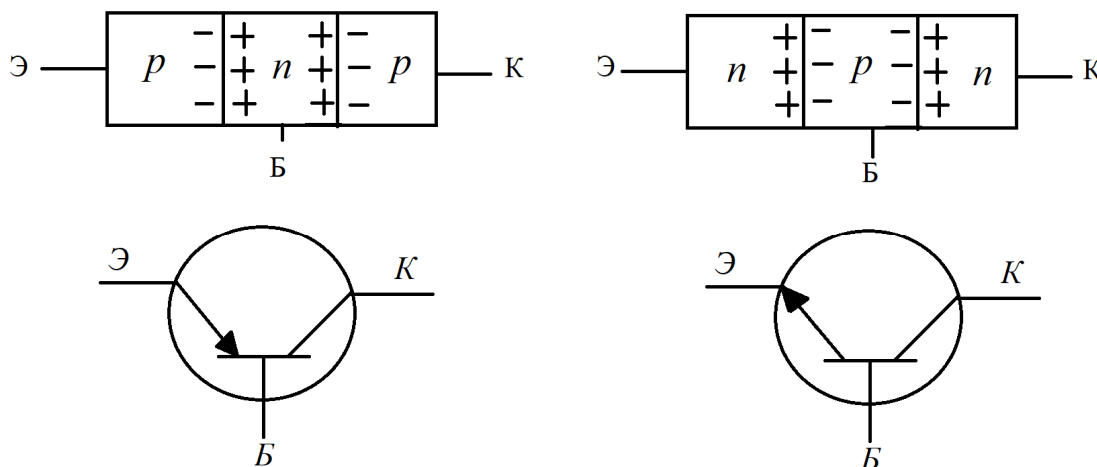


Рисунок 27 – Условные обозначения транзисторов на электронных схемах

В транзисторах п-р-п-типа функции всех трёх слоев и их названия аналогичны, изменяется лишь тип носителя заряда, происходящих через базу; в приборах р-п-р-типа – это дырки, в приборах п-р-п-типа – электроны. На переход Э-Б напряжение подаётся в прямом направлении, поэтому даже при небольших напряжениях в нём возникают значительные токи. На переход К-Б напряжение $U_{КБ}$ подаётся в обратном направлении. Оно обычно в несколько раз больше $U_{ЭБ}$.

Существует три способа включения транзистора: с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ) и общим коллектором (ОК). Наиболее распространённая схема включения транзистора с ОЭ.

В схеме с ОЭ вывод эмиттера является общим для входной и выходной цепей транзистора. Эта схема используется для расчета и анализа устройств с биполярными транзисторами, применяя h -параметры транзистора.

Выходные характеристики транзистора в схеме с ОЭ определяют зависимость коллекторного тока $I_K = F(U_{KЭ})$ при $I_B = \text{const}$ (Рисунок 28а).

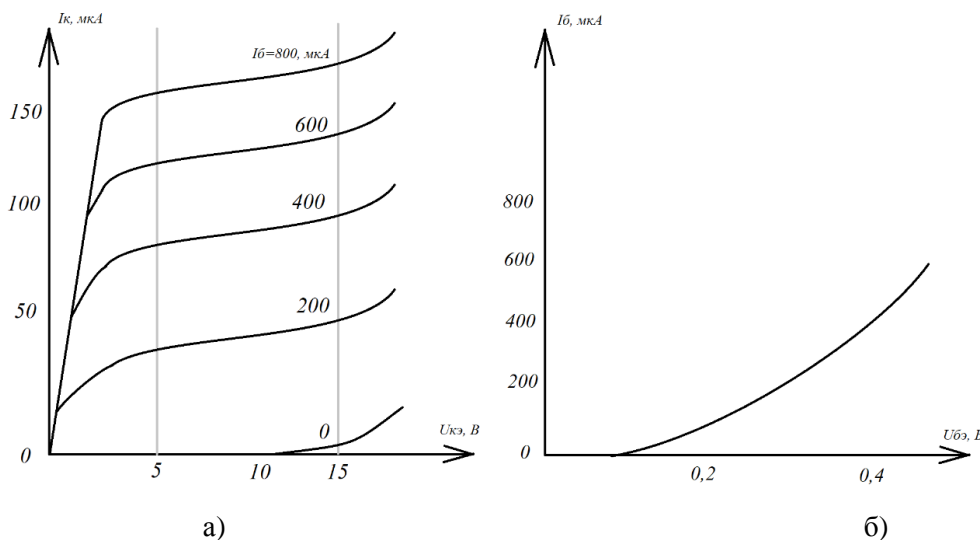


Рисунок 28 – Входные и выходные характеристики транзистора

Входные (базовые) характеристики транзистора отражают зависимость тока базы от напряжения Б-Э при фиксированном напряжении К-Э: $I_B = F(U_{BЭ})$ при $U_{KЭ} = \text{const}$ (Рисунок 28б).

Характеристики транзисторов сильно зависят от температуры, поэтому для стабилизаторов параметров транзистора применяют специальные меры, а для улучшения теплоотвода транзисторы устанавливают на радиаторы.

Для повышения мощности выпускаются мощные транзисторные блоки (могут работать при токах до 500 А). В маломощных транзисторных сборках транзисторы не соединены между собой и могут использоваться самостоятельно.

Биполярные транзисторы – усилительные приборы универсального назначения, широко используются в различных типах усилителей, генераторов, логических и импульсных устройствах.

3.4 Униполярные (полевые) транзисторы

К классу униполярных относятся транзисторы, принцип действия которых основан на использовании носителей и заряда только одного знака (электронов или дырок). Управление током в неполярных транзисторах осуществляется изменением проводимости канала, через которую протекает ток транзистора под воздействием электрического поля. Вследствие этого униполярные транзисторы называют также полевыми.

Повышенный интерес к этим приборам обусловлен их высокой технологичностью, хорошей воспроизводимостью требуемых параметров, а также меньшей стоимостью по сравнению с биполярными транзисторами. Из электрических параметров выделяется высокое входное сопротивление.

Анализ работы полевого транзистора с р-п-переходом проведём на его модели в соответствии с Рисунок 29.

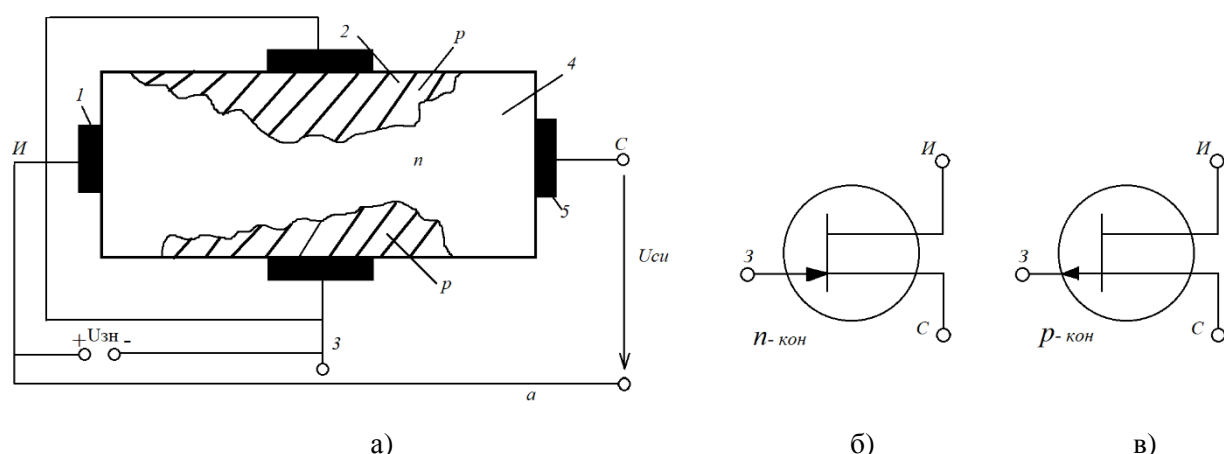


Рисунок 29 – Полевой транзистор

(1 – вывод истока, 2 – затвор, 3 – вывод затвора, 4 – канал, 5 – вывод стока)

В приведённой конструкции (Рисунок 29а) канал протекания тока транзистора представляет собой слой проводника n-типа. Канал имеет контакты с внешним электродами прибора. Электрод, от которого начинают движение носители заряда, называют истоком, а электрод к которому они движутся, – стоком. Электрод, служащий для регулирования поперечного сечения канала, носит название затвора.

В зависимости от электропроводимости исходного материала полевые транзисторы делятся на транзисторы с р-каналом и с n-каналом. В транзисторе с n-каналом основными носителями зарядов является электроны, которые движутся вдоль канала от истока с низким потенциалом к стоку с более высоким потенциалом, образуя ток – стока I_c . Между

затвором и истоком приложено напряжение, запирающее р-п-переход, образованный п-областью канала и р-р-областью затвора. Это полевой транзистор с управляющим переходом (ПТУП).

В транзисторе с р-каналом основным носителем заряда являются дырки, которые движутся в направлении снижения потенциала, поэтому полярности приложенных напряжений должны быть $U_{СИ} < 0$ и $U_{ЗИ} \geq 0$.

Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора с р-п-переходом и каналом п-типа показан на Рисунок 30а.

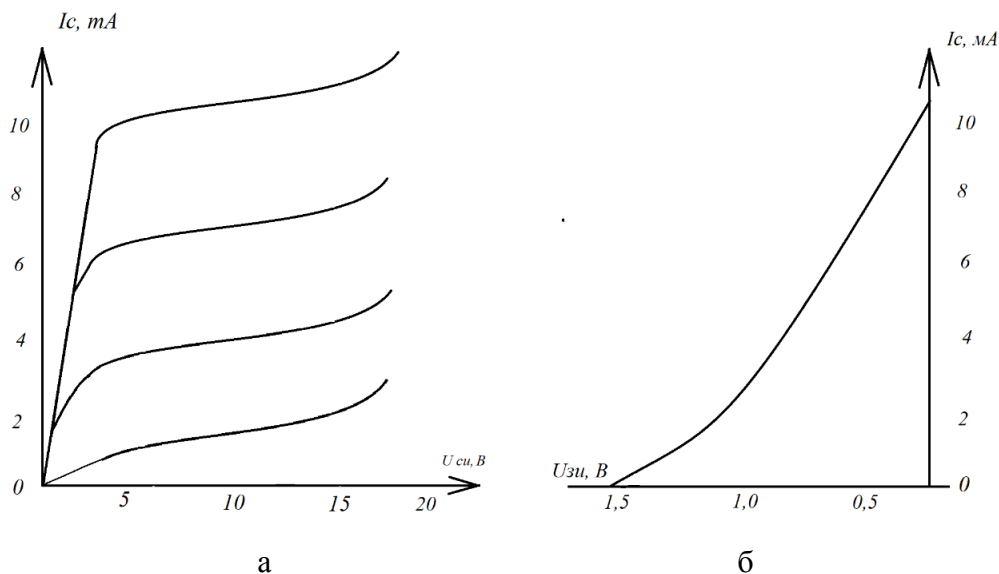


Рисунок 30 – Характеристики полевого транзистора

Они отражают зависимость тока стока от напряжения сток-исток при фиксированном напряжении затвор-исток $I_c = F(U_{СИ}) / U_{ЗИ} = \text{const}$ и представляются в виде семейства кривых.

Определённый интерес представляет стоково-затворная характеристика полевого транзистора, показывающая зависимость тока стока от напряжения сток-исток: $I_c = F(U_{ЗИ})$ при $U_{СИ} = \text{const}$ (Рисунок 30б).

Основными параметрами полевого транзистора являются: максимальный ток стока $I_{c \text{ max}}$, максимальное напряжение стока-истока $U_{СИ \text{ max}}$, внутреннее сопротивление R_i , крутизна S , входное сопротивление $R_{вх}$, а также межэлектронные ёмкости затвор-исток $C_{ЗИ}$, затвор-сток $C_{ЗС}$ и сток-исток $C_{СИ}$.

3.5 МДП-транзисторы

В отличие от полевых транзисторов с р-п-переходом, в которых затвор имеет непосредственный электрический контакт с ближайшей областью проводящего канала, в

МДП-транзисторах затвор изолирован от указанной области слоем диэлектрика. По этой причине МДП-транзисторы относятся к классу полевых транзисторов с изолированным затвором.

МДП-транзисторы (структура металл-диэлектрик-полупроводник) выполняют из кремния. В качестве диэлектрика используют окисел кремния SiO_2 . Отсюда другое названия этих транзисторов МОП-транзисторы (структура металл-окислитель-полупроводник). МДП-транзисторы выполняют двух типов: со встроенным и индуцированным каналом и в общем случае представляют собой четырех электродный прибор. Четвёртым электродом (подложкой), выполняющим вспомогательную функцию, является вывод от подложки исходной полупроводниковой пластины. МДП-транзисторы могут быть с каналом р-типа п-типа. Условные обозначения МДП-транзистора показано на Рисунок 31.

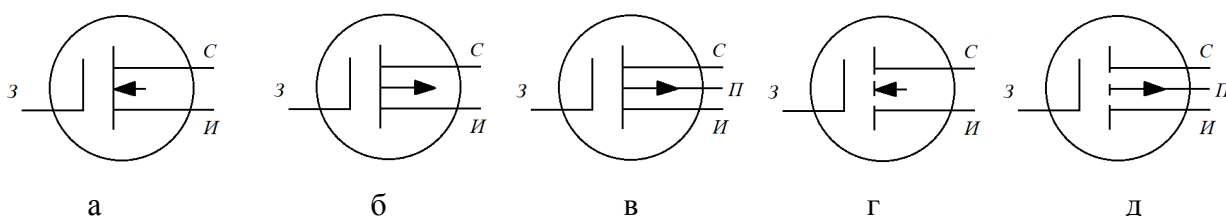


Рисунок 31 – Условные обозначения МДП-транзистора (а – со встроенным каналом п-типа, б – з-типа и выводом от подложки, в – с индуцированным каналом п-типа, г – с выводом от подложки)

Стоковые (выходные) характеристики полевого транзистора со встроенным каналом п-типа близки по виду к характеристикам полевого транзистора с р-п-переходом.

Вид стоково-затворной характеристики транзистора с индуцированным каналом показаны на Рисунок 32.

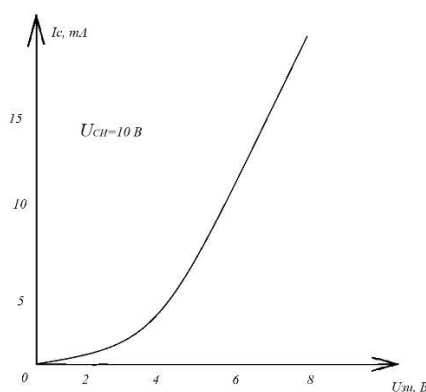


Рисунок 32 – Стоково-затворная характеристика транзистора с индуцированным каналом

МДП-транзисторы имеют лучший показатели, чем транзистор с р-п-переходом относительно входного сопротивления и межэлектродных емкостей. Транзисторы этого типа широко применяются в интегральном исполнении.

Тиристором называют электропреобразовательный полупроводниковый, переключающий прибор с тремя (или более) p-p-переходами. В зависимости от числа выводов различают динисторы, имеющие два электрода, тринисторы – трёхэлектродные приборы и бинисторы – приборы с четырьмя выводами.

Устройство четырехслойного тиристора и его эквивалентные схемы приведены на Рисунок 33.

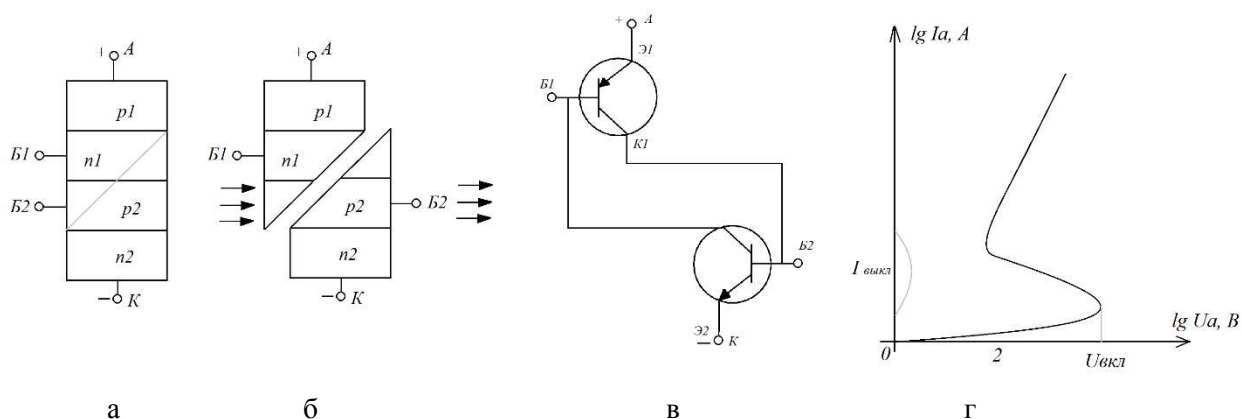


Рисунок 33 – Устройство четырехслойного тиристора и его эквивалентные схемы

Внешние напряжения от источника питания подаются на верхний (анод А) и нижний (катод К) слои в полярности: плюс на p₁-слой и - на n₂- слой. При этом на средний n₁-p₂-переход напряжение подаётся в запирающей полярности, вследствие чего через тиристоры протекает лишь сравнительно небольшой ток I_а (Рисунок 33а). По мере увеличения анодного напряжения U_а энергия носителей заряда, подходящих через запертый n₁-p₂-переход, возрастает, пока не оказывается столь большой, что возникает ударная ионизация атомов полупроводника в зоне n₁-p₂-перехода; так резко, лавинообразно увеличивается и сопротивление тиристора, которое можно трактовать и по-другому: эквивалентная схема тиристора может быть представлена в виде двух последовательно-параллельных включённых биполярных транзисторов (Рисунок 33б, в) со структурой p₁-n₁-p₂ (где p₁ – эмиттер; n₁ – база; p₂ – коллектор) и n₁-p₂-n₂ (n₁ – коллектор К₂; p₂ – база Б₂; n₂ – эмиттер Э₂), вследствие чего коллекторный ток одного транзистора является базовым током другого. Это приводит к тому, что если в цепи базы одного транзистора появится ток, то появится усиленный ток и в его коллекторной цепи, который пойдёт в базу второго транзистора и после усиления попадёт опять в базу первого транзистора, и процесс вновь и вновь будет повторяться, пока оба транзистора не откроют полностью и падение напряжения на них не уменьшится до 1-2 В.

Таким образом, можно говорить о том, что включение тиристора обусловлено положительной обратной связью: воздействия с вывода схемы вновь и вновь усиленным

подаётся на вход, все возрастая и возрастая, пока дальнейшее увеличение станет невозможным.

Включение тока в двух электронных тиристорах (динисторах) возможно разрывом цепи питания, уменьшением тока меньше некоторой величины $I_{\text{выкл}}$ (Рисунок 33г) или подачи на анод А обратного запирающего напряжения. Тиристоры и бинисторы могут включать подачу импульсов запирающей полярности на базы.

Четырёхслойные тиристоры имеют электрическую одностороннюю проводимость и могут применяться для выпрямления переменных токов. Однако если тиристор выполнить пятислойным, то он может работать при любых полярностях приложенного к аноду напряжения. Такого вида тиристора называют симисторами и применяют в цепях переменного тока, позволяя стабилизировать или регулировать его значение в широких пределах.

Тиристоры по своей сути – переключающие приборы, ибо имеют всегда два устойчивых состояния: проводящее «включено» и непроводящее «выключено». Поэтому их можно применять в различных радиоэлектронных устройствах в качестве мощных бесконтактных переключателей, позволяющих коммутировать с большой скоростью весьма большие токи (до нескольких тысяч А) при больших рабочих напряжениях (до нескольких тысяч В). При этом внутреннее сопротивление тиристора во включённом состоянии столь мало, что падение напряжения на нём не превышает 1-2В, почти независимо от значения протекающего через прибор тока. Большое применение тиристоры находят в устройствах преобразования напряжения, частоты, управляемых выпрямителях, в системах автоматизированного электропривода.

Важным параметром триодного тиристора является отпирающий ток управления $I_{\text{у,вкл}}$ – ток управляемого электрода, который обеспечивает переключение тиристора в открытое состояние. Во избежание пробоя тиристора в обратном направлении (тепловой пробой электрода) необходимо, чтобы обратное напряжение было меньше $U_{\text{обр.мах}}$.

Если тиристор имеет только два основных электрода (анод, катод), то включение его достигается путём изменения полярности напряжения питания. Такие тиристоры называются неуправляемыми. Если у тиристора второй электрод выполняет функции органы управления ЭУ, то перевод тиристора из закрытого состояния в открытое может быть выполнен с помощью тока управления. Такие тиристоры называются управляемыми.

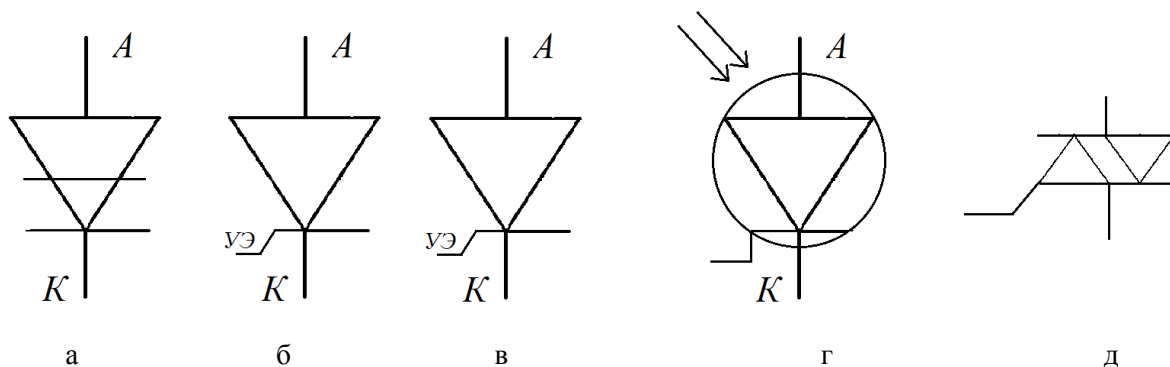


Рисунок 34 – Условное обозначение тиристорov (а – динистор б – однооперационный тиристор, в – двухоперационный тиристор, г – фототиристор, д – симистор)

3.6 Полупроводниковый оптоэлектронные приборы для оптоэлектроники

Оптоэлектроникой принято называть направление современной электроники, занимающейся передачей, приёмом, обработкой и хранением информации, переносимой световыми (оптическими) и электрическими сигналами. В основе оптоэлектроники лежат процессы преобразования электрических сигналов в световые, а световые – в электрические в зависимости от того, в каком виде – оптическом или электрическом – удобнее передавать, обрабатывать и хранить информацию. Приём и преобразование световых (фотоэлектронных) сигналов в электрические осуществляются фотоэлектронными приборами. Излучение и преобразование электрических сигналов в световые производятся электросветовыми (излучающими) приборами.

На настоящем этапе микроэлектроника не решила проблему всеобщей микроминиатюризации электронной аппаратуры. Например, трансформаторы, разъёмные контакторы, конденсаторы большой ёмкости плохо совмещаются с интегральными компонентами из-за больших габаритов. Особые трудности вызывает обеспечение электрической изоляции при связи двух систем: высоковольтной и низковольтной. В частности, такая задача возникает при создании устройств управления высоковольтными установками большой мощности. На помощь приходит оптоэлектроника. Применение оптического канала связи позволяет обеспечить надёжную электрическую изоляцию любых систем, исключив громоздкие реактивные и контактные компоненты, повысить надёжность работы и оборудования.

Элементарная база оптоэлектроники включает в себя:

- 1) оптоизлучатели – преобразователь электрической энергии в световую;
- 2) фотоэлектрические приёмники (фотоприёмники) – преобразователи световой энергии в электрическую;

3) оптопары – оптоэлектрические приборы для электрической изоляции при передаче энергии и информации по световому каналу;

4) световоды.

Одним из широко используемых в современной радиоэлектронике оптоэлектронных приборов является оптрон. Оптрон выполняется на основе излучателя и приёмника света, близко расположенных друг к другу и оптически связанных между собой.

Фоторезистивный оптрон (Рисунок 35а) состоит из полупроводникового светодиода и фоторезистора. При передаче на светодиод напряжение $U_{вх}$ (в прямой полярности) светодиод начинает излучать свет, который взаимодействует на фоторезистор, меняет его сопротивление, изменяя тем самым входное напряжение $U_{вх}$. Важной особенностью оптрона является то, что его вход и выход электрически не связаны, изолированы между собой, поскольку связь между светодиодом и фоторезистором осуществляется световым потоком.

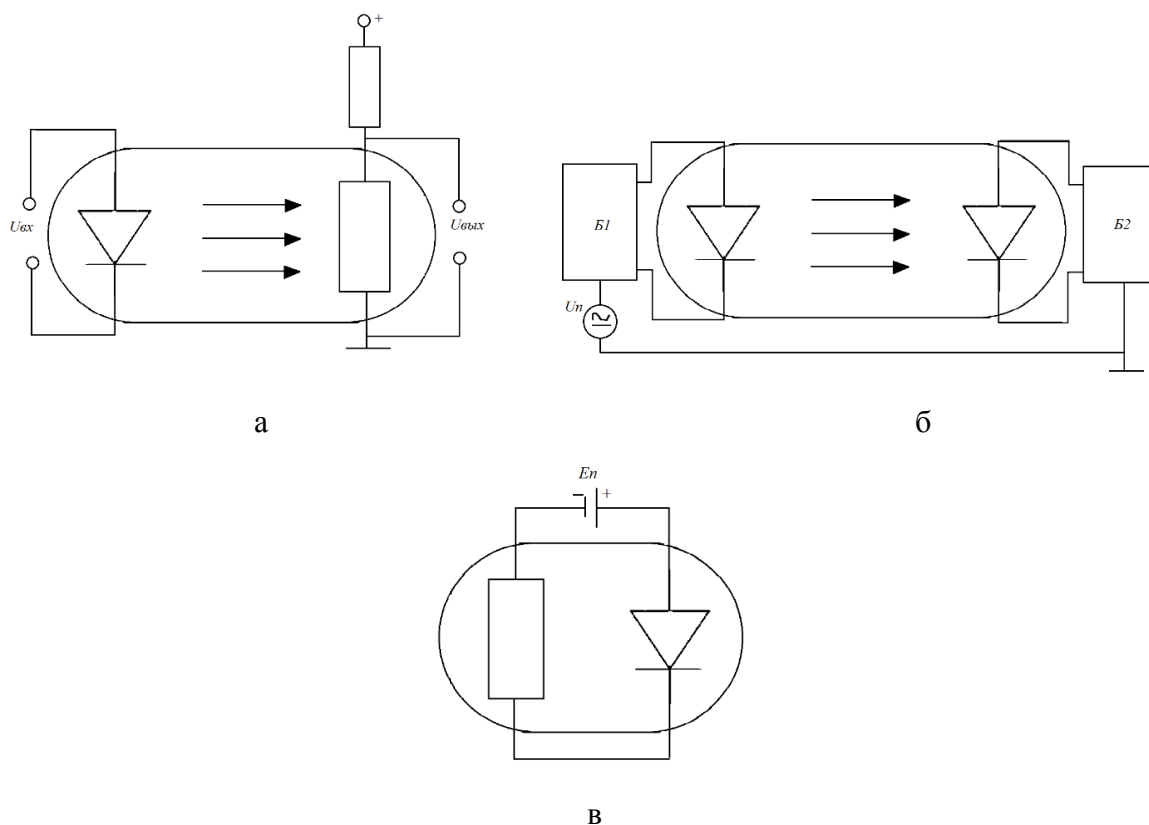


Рисунок 35 – Графическое изображение оптрона

Это позволяет, например, передавать сигналы от одного блока Б1 к другому Б2 устройства (Рисунок 35б), даже если между их корпусами действует очень высокое напряжение U_n (постоянное или переменное). В принципе это задача может быть решена использованием разделительного трансформатора, однако трансформатор не может

работать на постоянном токе и на очень низких частотах, и трудно обеспечить хорошую изоляцию между первичной и вторичной обмотками при напряжении выше 10^5 В.

В качестве приёмника света может быть применён не только фоторезистор, но и фототиристор, фотодиод и фототранзистор.

Оптроны могут быть использованы для усиления импульсных световых сигналов, если в них осуществляется внутренняя положительная связь по световому потоку (Рисунок 35в). При воздействии светового сигнала на фоторезистор его сопротивление уменьшается, и появляется ток в цепи светодиода (отбираемый от источника питания Еп). Светодиод начинает излучать свет, часть которого уходит через выходное окно наружу, другая часть воздействует на фото резистор, уменьшая его сопротивление и тем самым увеличивая ток в цепи светодиода и его свечение. Это приводит к ещё большему уменьшению сопротивления фоторезистора и ещё большему свечению светодиода. Наконец, сопротивление фоторезистора может стать минимальным, при этом свечение светодиода будет максимальным.

Оптроны, рассмотренные выше, могут быть использованы как преобразователи чистоты световых сигналов: например, на фоторезистор можно действовать невидимым (инфракрасным или ультрафиолетовым) светом, а на выходе светодиода излучение может быть видимым (белым, красным, зелёным и т.д.).

Оптрон с положительной связью может быть использован не только для усиления и преобразования световых сигналов, но и для выполнения различных операций над световыми сигналами, таких как генерирования, запоминания, сложения и вычитания, умножения и деления частоты и т.д.

В общем недостатком оптопар является нелинейность зависимости выходного сигнала от входного, обусловленного нелинейностью характеристик оптопар.

В качестве полупроводникового измерителя света используется светоизмерительный Диод. Он выпускается в виде отдельных элементов или групп (матриц) для индикации информации в виде букв, цифр и различных символов. Они входят также в состав оптопар.

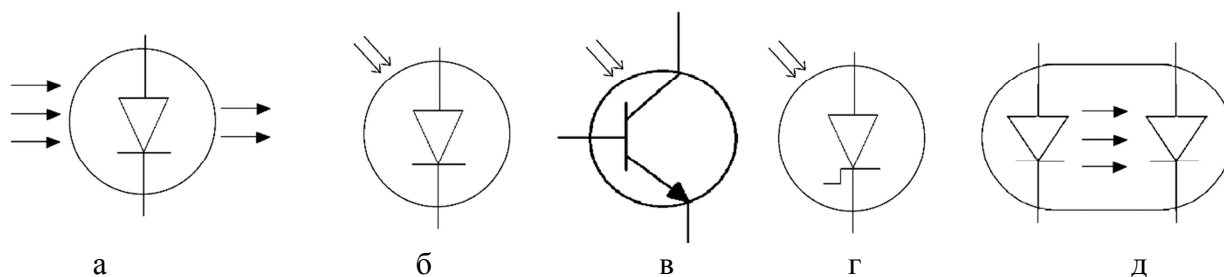


Рисунок 36 – Условные обозначения (а – светоизмерительный диод, б – фотодиод, в – фототранзистор, г – фототиристор, д – диодный оптрон)

К числу фотоприёмников относятся фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры и др. приборы. Следует отметить, что управляемые полупроводниковые приборы (транзистор, тиристор) в качестве сигнала управления могут использовать световое излучение.

К фототранзисторам относятся полупроводниковые фотодиоды и фототриоды, которые конструктивно отличаются от обычных полупроводниковых диодов и биполярных транзисторов лишь тем, что у них в корпусе имеется окно, пропускающее световой поток и фокусирующее его на области p-p-перехода. Фототранзисторы включаются в электрическую цепь так же, как и биполярные транзисторы: на них подаётся напряжение питания в полярности – обратной на коллектор, прямой на эмиттер.

Фототиристоры отличаются от обычных тиристоров тем, что в их корпусах имеется прозрачное окно для света, вследствие чего он может воспринимать световой сигнал. Передача информации от излучателя к фотоприёмнику может производиться с помощью световодов: гибких шлангов, состоящих из отражающей оболочки и сердцевины из органического или неорганического стекла.

Передача информации по световодам обеспечивает полную защищённость от электромагнитных полей.

На этапе развития измерительной техники всё более тщательно прослеживается возрастающая роль оптоэлектроники при создании самых разнообразных контрольно-измерительных устройств. С помощью оптоэлектронных датчиков можно точно и надёжно измерять статические и динамические давления, температуру, параметры электрических, магнитных и гравитационных полей, линейные и угловые скорости, ускорение, перемещение и т.д. Использование волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) определило новую задачу создания удобных и надёжных устройств стыковки первичных датчиков с ВОЛС. Известно, что преимуществом ВОЛС является их высокая пропускная способность, нечувствительность к электромагнитным помехам, меньшая полная масса, полное отсутствие наводок и взаимных помех при объединении нескольких линий в жгут. Однако сложность и несовершенство стыковочных устройств, наличие в них значительного количества полупроводниковых элементов могут свести на нет названные преимущества.

Очевидно, что наиболее перспективными являются такие типы и конструкции оптоэлектронных датчиков, которые без промежуточных преобразований могут подсоединяться к ВОЛС.

3.7 Выпрямители переменного тока

Выпрямителем называется устройство, предназначенное для преобразования энергии источника переменного тока в постоянный ток. Необходимость в подобном преобразовании возникает, когда питание потребителя осуществляется постоянным током, а источником электрической энергии является источник переменного тока, например, промышленная сеть частотой 50 Гц.

Современные электронные полупроводниковые устройства в дискретном и особенно в микроэлектронном исполнении предъявляют очень жёсткие требования к качеству потребляемой электрической энергии, которая должна иметь:

- 1) высокую стабильность питающего напряжения;
- 2) требуемую форму переменного напряжения;
- 3) высокую стабильность чистоты и угла сдвига фаз переменного питающего напряжения;
- 4) минимально возможный уровень пульсации питающего напряжения.

Различают выпрямители неуправляемые и управляемые. С помощью неуправляемых выпрямителей на выходе устройства получают выпрямленные (постоянные) напряжения неизменной величины. Управляемые выпрямители имеют возможность изменить значение выпрямленного тока и напряжения.

В зависимости от числа фаз первичного источника питания различают однофазные и многофазные выпрямители. Как правило, выпрямители малой и средней мощности – это однофазные выпрямители, а выпрямители большой мощности – трёхфазные.

По форме выпрямленного напряжения выпрямители подразделяются на однополупериодные и двухполупериодные.

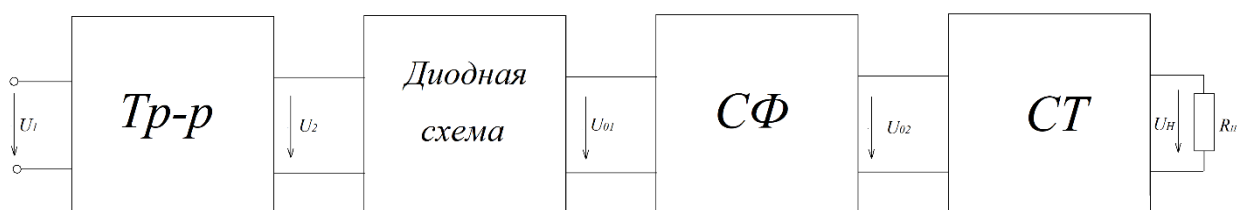


Рисунок 37 – Структурная схема однофазного выпрямленного устройства

На вход выпрямителя подаётся переменное напряжение U_1 , которое с помощью трансформатора Тр-р изменяется до требуемой величины. Кроме того, трансформатор осуществляет электрическую развязку источника выпрямленного напряжения и нагрузочного устройства, что позволяет получить с помощью нескольких вторичных обмоток различные значения напряжения U_2 , гальванически не связанных друг с другом.

После трансформатора переменная напряжение U_2 с помощью диодной схемы преобразуется в пульсирующее напряжение U_{01} .

В выпрямленном напряжении U_{01} , помимо постоянной составляющей, присутствует переменная составляющая, которая с помощью сглаживающего фильтра СФ снижается до требуемого уровня. После сглаживающего фильтра следует стабилизатор постоянного напряжения СТ, задача которого поддерживать неизменным значения U_H на нагрузочном устройстве при изменении значений выпрямленного напряжения или сопротивление нагрузки R_H .

3.7.1 Однополупериодная схема выпрямителя

Для упрощения анализа работы выпрямителей трансформатор и диод считаются идеальными, т.е. принимают следующие допущения: у трансформатора активные сопротивления обмоток, а у диода прямое сопротивление равны нулю, а обратное сопротивление диода равно бесконечности.

Работу выпрямителя удобно рассматривать с помощью временных диаграмм. В первый полупериод, т.е. в интервале времени от нуля до двух, диод открыт, так как потенциал источника выше потенциала точки В и под действием напряжения в цепи вторичной обмотки трансформатора возникает ток нагрузки i_H . В интервале $\Pi-2\Pi$ диод закрыт, ток в нагрузочном резисторе отсутствует, а к запертому диоду прикладывается обратное напряжение U_2 . Основными электрическими параметрами однополупериодного выпрямителя и всех выпрямителей являются:

- 1) средние значения выпрямленного тока и напряжения;
- 2) мощность нагрузочного устройства;
- 3) амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения;
- 4) коэффициент пульсации выпрямленного напряжения;
- 5) действующее значение тока и напряжение первичной и вторичной обмоток трансформатора;
- б) коэффициент полезного действия.

Коэффициент пульсации – это отношение амплитуды основной гармоники (первой), частота которой в данном случае равна W , к выпрямленному напряжению.

Основным преимуществом однополупериодного выпрямителя является его простота. К недостаткам выпрямителей этого типа относятся: большой коэффициент пульсации; малые значения выпрямленного тока и напряжения. Кроме указанных, следует отметить ещё один недостаток однополупериодного выпрямителя тока, он имеет довольно значительную постоянную составляющую, которая вызывает подмагничивание

сердечника трансформатора, что приводит к уменьшению магнитной проницаемости сердечника. Это снижает индуктивность обмоток трансформатора. Как следствие этого, увеличивается ток холостого хода трансформатора, а следовательно, снижается КПД всего выпрямленного устройства.

Область применения: рассмотренный однополупериодный выпрямитель обычно применяют для питания высокоомных нагрузочных устройств (например, электронно-лучевых трубок), допускающих повышенную пульсацию. Такие выпрямители можно использовать и для зарядки аккумуляторов.

3.7.2 Двухполупериодные выпрямители

Двухполупериодные бывают двух типов: мостовыми и с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора. Выпрямители этого типа являются более мощными, чем однополупериодные, т.к. с их помощью нагрузочные устройства используют для своего питания оба полупериода напряжения сети, имеют более высокий КПД. Наиболее распространение получила мостовая схема двухполупериодного выпрямителя (Рисунок 38).

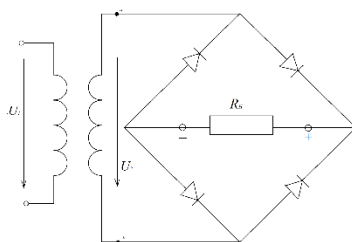


Рисунок 38 – Мостиковая схема двухполупериодного выпрямителя

Схема выпрямления состоит из трансформатора и четырёх диодов, подключённых ко вторичной обмотке трансформатора по мостовой схеме. К одной диагонали моста подключается вторичная обмотка трансформатора, а к другой сопротивление нагрузки. Каждая пара диодов работает поочередно, диоды первой пары открыты в положительной полупериод вторичной обмотки трансформатора, когда потенциал точки выше А потенциала точки В. Следующий полупериод потенциал точки В выше потенциала точки А, диоды второй пары открыты, а диоды первой пары закрыты. Следует отметить, что в оба полупериода ток через нагрузочный резистор имеет одно и то же напряжение.

Сравнение однополупериодных и двухполупериодных выпрямителей: при одинаковых значениях параметров трансформатора и сопротивления мостовой выпрямитель имеет следующие преимущества: среднее значение выпрямленных токов и напряжения в два раза больше, а пульсации значительно меньше.

Амплитуда основной гармоники частотой 2ω равна $2/3$. Таким образом, в мостовой схеме выпрямителя используются четыре диода, что является недостатком схемы. С другой стороны, схема позволяет более эффективно использовать вторичное напряжение трансформатора, причём есть возможность применения схемы выпрямления без трансформатора.

Помимо указанного недостатка, в двухполупериодном выпрямителе габариты, масса и стоимость трансформатора значительно больше, чем в однополупериодном и мостовом выпрямителях, поскольку вторичная обмотка имеет вдвое большее число витков и необходим вывод от средней точки вторичной обмотки трансформатора.

Рассмотренные двухполупериодные выпрямители используют для питания нагрузочных устройств малой и средней мощности.

Контрольные вопросы

1. Что такое полупроводниковый диод? Как строятся вольт-амперные характеристики идеального и реального диодов?
2. Какие материалы используются для изготовления полупроводниковых диодов? Как создавать в полупроводниковой подложке области того или иного типа проводимости?
3. Что такое собственное электрическое поле в кристалле на границе $p-n$ -перехода? Как оно видоизменяется при подаче внешнего напряжения?
4. Чем объясняется эффект односторонней проводимости $p-n$ -перехода в полупроводнике?
5. Как изменяются вольт-амперные характеристики $p-n$ -переходов для германиевых и кремниевых диодов при изменении внешней температуры?
6. Как определяется дифференциальное сопротивление диода?
7. Как строятся вольт-амперные характеристики диода с нагрузочной прямой?
8. Объясните механизм формирования барьерной и диффузионной ёмкостей диода. Как они сказываются при работе диода в цепях переменного тока?
9. Что такое стабилитрон? Его вольт-амперная характеристика и цели применения в электрических схемах. Схема замещения стабилитрона.
10. Какова цель применения стабистора в электрических схемах?
11. Какова схема параметрического стабилизатора постоянного тока, его работа при изменении питающего напряжения?

12. Сформулируйте классификацию основных типов полупроводниковых диодов, характеристики и области применения каждого из них.
13. Что такое диодный оптрон? Его назначение и области применения.
14. Объясните различие условного обозначения биполярных транзисторов $p-n-p$ - и $n-p-n$ -типов, схемы их замещения. Какой смысл заложен в названии «биполярный»?
15. Как протекают процессы в различных областях биполярного транзистора при прохождении электрического тока, на чём основаны усилительные свойства прибора?
16. Что обозначают термины «униполярный» и «полевой» в названии полевых транзисторов?
17. Изобразите структурные схемы полевого транзистора с изолированным затвором и управляющим переходом. Как они работают?
18. Что обозначают аббревиатуры МДП, МОП или MOS в обозначении типов полевых транзисторов?
19. Объясните вид типовых передаточных характеристик полевых транзисторов. Как по ним можно установить полярность управляющего напряжения, направление тока в канале и диапазон изменения управляющего напряжения?
20. Поясните принцип работы ПТУП с каналом n -типа. Его выходные характеристики и особенности работы полевых транзисторов в линейной области и в области насыщения.
21. Схема замещения полевого транзистора, построение на его базе усилителя. Крутизна вольт-амперной характеристики.
22. Каким требованиям должна соответствовать электронная схема, чтобы её можно было назвать операционным усилителем?
23. Какова практическая ценность схемы ОУ с единичным коэффициентом усиления?
24. Поясните работу схемы двухполупериодного выпрямления переменного тока. Почему эта схема нашла применение при выпрямлении сигналов малой амплитуды различных датчиков?

4 Диагностика электрических цепей по частям

Анализ, синтез, диагностика – три основные задачи теории электрических цепей. В классических задачах теории – анализе и синтезе цепей – исследуются исключительно математические модели, соответствующие схемам замещения цепей. В прикладном плане – это задачи преимущественно проектирования электротехнических устройств и систем. В сравнительно новой задаче теории – диагностике электрических цепей – объектом исследования являются реальные цепи. В прикладном плане задача диагностики обеспечивает нужды эксплуатации последних. В теории цепей под диагностикой цепи известной топологической структуры понимается задача определения неизвестных параметров ее элементов (сопротивлений или проводимостей резисторов, емкостей конденсаторов и т.п.) по известным реакциям на заданные воздействия. При этом иногда к подлежащим определению параметрам относят и ненаблюдаемые параметры режимов (токи и напряжения элементов цепей), а к известным данным – часть параметров элементов. В предельном случае к известным данным можно отнести параметры элементов цепи и частично данные, характеризующие воздействия и реакции (напряжения, мощности источников и т.п.), а неизвестными и подлежащими определению считать данные параметров режима. Классическим примером такой диагностики является оценка состояния электроэнергетических систем, при которой по данным измерений токов, напряжений, мощностей и т.п. различных элементов систем находят наиболее вероятные значения (математические ожидания) параметров режима систем. Но все же для теории цепей более типична такая постановка задачи диагностики, при которой определяются именно параметры элементов цепей, в частности, при диагностике пассивных резистивных цепей – сопротивления или проводимости резисторов.

При диагностике цепей исключительно важным представляется оптимальное размещение измерительной аппаратуры и организация измерений наблюдаемых параметров режимов. В этом смысле теоретическая проработка вопросов диагностики является полезной и для этапа проектирования соответствующих устройств. Так, она позволяет, например, выбрать минимальное число измерительных приборов, позволяющих оценивать как параметры режима цепи, так и значения параметров ее элементов, изменяющихся в ходе эксплуатации цепи. Типичной задачей подобного типа является задача определения минимального числа измерений токов и напряжений цепи, содержащей определенное количество узлов и ветвей, необходимых для однозначного определения токов и напряжений всех ветвей, а также параметров соответствующих

элементов цепи. Для решения этой задачи достаточно вспомнить классические положения анализа цепей о возможности однозначного расчета всех токов ветвей по токам ветвей дополнений любого дерева графа цепи и всех напряжений по напряжениям ветвей любого дерева графа цепи, в частности по узловым напряжениям. Таким образом, разместив амперметры в ветвях дополнений дерева (ветвях связей), а вольтметры в ветвях дерева, можно рассчитать режим цепи и далее, воспользовавшись компонентными уравнениями ветвей цепи, решить задачу диагностики. При этом если узлы цепи доступны для подключения приборов, то можно использовать только один вольтметр, с помощью которого измеряются все узловые напряжения.

Отсюда следует, что решение задачи диагностики цепей состоит из двух этапов – экспериментального и расчетного. На одном из них – экспериментальном этапе – организуются и/или наблюдаются воздействия на цепь, осуществляются измерения их количественных характеристик, а также наблюдаются (измеряются) реакции цепи, на другом – расчетном этапе – составляется математическая модель цепи, обработка которой дает искомые параметры цепи, например, сопротивления или проводимости резисторов. Рассмотрим эти этапы решения задачи диагностики подробнее.

Экспериментальный этап диагностики цепей: тестовая и функциональная диагностика. По возможностям проведения экспериментального этапа диагностики последнюю принято подразделять на тестовую и функциональную. В тестовой диагностике исследователь сам может задавать режимы работы цепи, т.е. выбирать воздействия на цепь (подключать источники ЭДС и/или тока к тем или иным узлам). Проводимые обычно на специальных испытательных стендах, оборудованных высокоточной измерительной аппаратурой, в условиях свободы проведения экспериментов результаты такой диагностики, как правило, более информативны, чем результаты функциональной диагностики, проводимой при реальных нагрузочных режимах цепи. Проведение функциональной диагностики усложнено, как правило, неблагоприятными воздействиями (вибрационными, тепловыми, электромагнитными) внешней среды на цепь, использованием стандартной, часто непротестированной измерительной аппаратуры, ограниченностью возможностей вариации исследуемых режимов. Усложнённым в этом случае оказывается соответственно и последующее выполнение расчетного этапа диагностики. Однако ценность функциональной диагностики для практики заключается в ее оперативности, особенно если ее организация позволяет вести непрерывное наблюдение за искомыми параметрами элементов цепи и их изменениями, что исключительно важно для прогнозирования надежности работы цепи, управления ее режимами и т.д.

Расчетный этап диагностики цепей – формирование и обработка математических моделей цепей. При диагностике, так же как и при анализе и синтезе цепей важную роль играет формирование канонических математических моделей, т.е. таких моделей, которые отличаются лаконичностью, а также простотой последующей их обработки. Подобные диагностические модели формируются на основе законов теории электрических цепей, но в отличие от моделей, используемых при анализе цепей, в качестве неизвестных содержат не токи и напряжения, а, например, сопротивления и проводимости. Подобные модели можно строить, используя перестановку («рокировку») параметров схем и параметров режимов в уравнениях Кирхгофа.

Другой тип канонических диагностических моделей – матричные уравнения – можно сформировать на основе любой канонической системы матрично-векторных уравнений анализа, таких как уравнения контурных токов, узловых напряжений, смешанных величин (гибридных уравнений), если объединить уравнения различных режимов в одно, имеющее однозначное решение. Далее определяются искомые параметры.

Главной проблемой как расчетного, так и экспериментального этапа диагностики является проблема размерности, поскольку для получения необходимой экспериментальной информации и затем для ее численной обработки требуется слишком большое количество измерительной аппаратуры, измерений, диагностических экспериментов, а затем вычислительных операций по обработке данных измерений для диагностирования даже относительно небольших по размерности цепей. Все это заставляет по-иному подходить к проблеме диагностики цепи, определяя не одновременно все ее параметры, а последовательно группы параметров отдельных подсхем цепи, т.е. осуществляя диагностику по частям.

Диагностика электрических цепей по частям. Необходимость проведения диагностики электрических цепей по частям обусловлена не только неприемлемо большим количеством требуемых измерений и измерительной аппаратуры при исследовании цепей большой размерности, но и, самое главное, неприемлемо большим количеством требуемых режимов при исследовании электротехнического устройства непосредственно под нагрузкой. В связи с тем, что на функциональном этапе диагностики цепи задающие воздействия не должны выходить за пределы рабочих значений, для целей диагностики предлагается весьма небольшой набор различающихся режимов. Это обстоятельство крайне ограничивает возможности экспериментального этапа диагностики. В результате на расчетном этапе диагностики составляется не вполне

корректная математическая модель, и результаты диагностики, как правило, не обладают высокой точностью.

Суть диагностики цепей по частям сводится к такой организации экспериментального и расчетного этапов диагностики, в основу которой положено условное разбиение рассматриваемой цепи на подцепи.

4.1 Диагностика по частям линейных резистивных цепей

Класс электрических цепей, состоящих только из резисторов и источников энергии (источников ЭДС и источников тока) с независимыми от интенсивности электромагнитных процессов этих цепей параметрами, т.е. сопротивлениями или проводимостями резисторов и значениями ЭДС или токов источников, называют линейными резистивными цепями. Такой класс цепей, как наиболее простой в отношении происходящих в цепях физических процессов и их математического описания, считается в настоящее время и наиболее изученным. Досконально разработанные методы исследования данного класса цепей обычно рассматриваются как своеобразные шаблоны применительно к исследованию других классов цепей. Поэтому разработку методов диагностики электрических цепей по частям имеет смысл первоначально реализовать на примере именно линейных резистивных цепей.

Рассмотрим пассивную резистивную цепь, в ветвях которой отсутствуют амперметры, а все узлы доступны для проведения диагностических экспериментов, т.е. к ним свободно могут подсоединяться внешние ветви с необходимыми для диагностирования измерительными приборами и/или источниками. Структуру цепи будем полагать известной, а значения проводимостей резисторов ветвей подлежащими определению при диагностировании. Положим также, что в цепи отсутствуют кратные (параллельные) ветви. Диагностика цепи в случае, когда не удастся непосредственно определить токи в ветвях, но зато можно свободно измерять неизвестные напряжения, возбуждаемые внешними токами, может проводиться согласно методу узловых сопротивлений.

Согласно методу узловых сопротивлений, экспериментально определяется матрица узловых сопротивления P -полюсника, элемент которой численно равен напряжению узла при возбуждении единичным задающим током определенного узла.

Определив матрицу узловых проводимостей можно рассчитать и значения проводимостей всех ветвей.

Пассивная электрическая цепь может содержать зависимые источники четырех типов:

- 1) источник ЭДС, управляемый напряжением (ИНУН) с коэффициентом управления ИНУН;
- 2) источник ЭДС, управляемый током (ИНУТ) с коэффициентом управления ИНУТ;
- 3) источник тока, управляемый напряжением (ИТУН) с коэффициентом управления ИТУН;
- 4) источник тока, управляемый током (ИТУТ) с коэффициентом управления ИТУТ.

При наличии управляющей связи, например, источника тока, управляемого напряжением, (ИТУН) с начальным коэффициентом управления, матрица узловых проводимостей изменится.

Вычисление параметров взаимных элементов цепи предполагает сначала вычисление начального коэффициента управления ИТУН и приведение несимметричной матрицы узловых потенциалов к симметричной.

С ростом размерности исследуемого многополюсника резко возрастает трудоемкость реализации метода узловых сопротивлений. Однако с ростом размерности многополюсника заполненность его матрицы узловых проводимостей ненулевыми элементами, как правило, падает, т.е. матрица становится так называемой разреженной матрицей (так называют матрицу, у которой число ненулевых элементов относительно мало). Очевидно, что для слабосвязных цепей большой размерности числа измерений и вычислительных операций в описанном выше методе узловых сопротивлений явно завышены. Их можно сократить за счет учета структуры ненулевых элементов разреженных матриц, определяемой топологией исследуемой электрической цепи. Тогда в экспериментальной части можно ограничиться нахождением не всех элементов матрицы, а только некоторого их подмножества, зависящего от расположения ненулевых элементов матрицы.

При выборе декомпозиции цепи на подцепи выделение граничной подцепи не является обязательным. Когда в слабосвязной диагностируемой цепи всякое выделение граничной подцепи подразумевает формирование сильно разреженного граничного блока матрицы узловых проводимостей с достаточно большой размерностью (по сравнению с размерностью блоков, соответствующих подцепям), целесообразно ограничиться диагностикой сначала отдельных подцепей. Потом произвести перенумерацию так, чтобы оставшаяся неопределенная часть цепи, в свою очередь, разбить на подцепи.

Диагностику пассивной линейной резистивной цепи, условно разделенной на несколько подцепей, можно проводить с помощью внешней аппаратуры (вольтметра и источника тока) в базисе узловых напряжений по частям, используя последовательные и параллельные процедуры как возбуждения подцепей внешними источниками, так и обработки экспериментальных данных. Параллельная процедура диагностики значительно сокращает объем экспериментов, а следовательно, и время на их проведение, что важно для практики. Таким образом, необходимо использовать методы диагностики сложных резистивных цепей по частям в базисе узловых напряжений, позволяющие решить эту задачу с учетом ограничений как на время реализации экспериментальной части работы, так и на ресурс имеющейся в наличии вычислительной техники при обработке данных экспериментов.

Часто в электрической цепи имеется возможность измерения токов в ветвях, в процессе диагностирования измерительную аппаратуру удается вмонтировать в ветвь. В таком случае представляет интерес решение задач диагностики с использованием встроенной в цепь измерительной аппаратуры. Для осуществления диагностики пассивной линейной резистивной цепи используется встроенная измерительная аппаратура, представляющая собой последовательное соединение амперметра для измерения тока и регулируемого источника ЭДС для возбуждения ветви. При измерении тока и возбуждении всех ветвей, отнесенных к связям графа схемы цепи, определение сопротивлений ветвей может проводиться согласно методу, который мы назовем методом контурных проводимостей.

Диагностика пассивной линейной резистивной цепи, условно разделенной на несколько подцепей, может быть осуществлена с использованием внутренней аппаратуры (амперметров и источников ЭДС) в базисе контурных токов. Данный подход аналогичен методам диагностики цепей по частям в базисе узловых напряжений и включает последовательные и параллельные процедуры как возбуждения подцепей внутренними (при необходимости и внешними) источниками, так и обработки экспериментальных данных.

Экспериментальная часть диагностики линейной резистивной электрической цепи может быть затруднена из-за недоступности некоторых узлов и, следовательно, сложности решения задачи диагностики в базисе узловых напряжений или невозможности измерения токов во всех ветвях связей графа схемы цепи и, следовательно, сложности решения задачи диагностики методом контурных сопротивлений. Проблемы, связанные с описанными трудностями проведения опытов, решаются с помощью использования

гибридного базиса, на основе которого можно диагностировать цепь методом смешанных величин.

Диагностику пассивной линейной резинной цепи в гибридном базе можно проводить по частям с помощью встроенной измерительной аппаратуры, дополненной в случае необходимости внешней аппаратурой. Комбинация методов контурных проводимостей и узловых сопротивлений позволяет решить задачу диагностики в условиях, когда применение каждого из этих методов по отдельности невозможно вследствие недопустимости для измерения напряжения всех узлов цепи и определения токов во всех ветвях связи графа цепи. Реализация в этом случае диагностики по частям позволяет оптимизировать число требуемых измерений и вычислительных операций или же время её выполнение.

Таким образом, возможности проведения диагностики сложных электрических цепей по частям с использованием узлового, контурного или гибридного базиса цепи в диагностических экспериментах показывают высокую эффективность подобного подхода, реализация которого даёт резкое сокращение числа измерений, измерительных приборов вычислений, рассматриваемых режимов.

4.2 Предельные случаи декомпозиции резистивных цепей при их диагностике по частям

Методы диагностики электрических цепей по частям, основанные на получении блочно-диагональных с окаймлением матричных структур, жестко увязанных с топологическими особенностями исследуемых цепей, имеют недостатки, одним из которых является невозможность выделения абсолютно всех нулевых элементов матриц в специальные блоки. Таким образом, ненулевые блоки матрицы узловых проводимостей, матрицы контурных сопротивлений либо соответствующих гибридных матриц сами могут содержать нулевые элементы. Поэтому представление матрицы в блочно-диагональном с окаймлением виде хотя и сокращает объем диагностических работ, но не дает минимального числа измерений и вычислительных операций. Это происходит из-за того, что выделение подцепей в рассматриваемом подходе ведет за собой соответствующее выделение граничных узлов, контуров для каждой подцепи в отдельности, а определению подлежат все элементы блоков матриц, соответствующих также подматрицам связей подцепей и граничных элементов. В этой связи представляет интерес предельный случай

декомпозиции цепи, когда в качестве подцепей рассматриваются отдельные узлы и контуры.

Реализация метода контуров может осуществляться последовательно контур за контуром либо одновременно для всех или нескольких контуров за один цикл диагностических экспериментов.

Предельным случаем декомпозиции цепи при ее диагностике по частям в базисе узловых напряжений является звезда, а в базисе контурных токов – контур. Параметры звезды или контура могут быть найдены вместе с коэффициентами управления как управляющих, так и управляемых ветвей, принадлежащих элементарным подцепям, но могут быть найдены и без них. Общая задача диагностики (т.е. определение параметров всех элементов диагностируемой цепи) решается с помощью последовательного или параллельного определения параметров всех звезд или контуров. Анализ электрической цепи, осуществляемый с помощью методов «звезд» или «контуров», характеризуется временными затратами на измерения, пропорциональными количеству узлов или контуров в цепи, а не их квадрату. Данный подход существенно сокращает общее число необходимых измерений по сравнению с другими методами диагностики.

С ростом размерности цепей проблема простоты их описания и экономичности алгоритмов формирования их уравнений приобретает все большее значение. Методы «звезд» и «контуров», хотя и эффективны в реализации, но достаточно сложны в описании, так как основаны на блочно-матричном представлении уравнений, кроме того, они сложны алгоритмически из-за, например, необходимости выбора базисного узла. Гораздо проще описывать эти методы и алгоритмы их реализации при использовании самых простых базисов, а именно базисов напряжений и токов ветвей диагностируемой цепи.

Диагностика ветвей любой звезды или контура, содержащих ветви с зависимыми источниками энергии любого типа, проводится по данным экспериментов, число которых равно числу неизвестных параметров. При этом в ходе этих экспериментов измерению подлежат напряжения или токи ветвей звезды или контура и напряжения или токи управляющих ими ветвей. Причем воздействия на другие элементы в расчетах не используются, что позволяет задаваться специальными воздействиями, упрощающими процесс диагностирования или входящими в допустимые пределы, разрешенные для конкретной электрической цепи.

Для определения всех токов ветвей цепи достаточно измерить (рассчитать) токи ветвей связей, а для определения напряжений всех ветвей достаточно измерить (рассчитать) напряжения ветвей дерева графа схемы цепи. Знание величин,

характеризующих базис контурных токов, оказывается исключительно полезным в процессе решения задачи диагностики в узловом базисе. В идеальном случае свободы проведения экспериментов измерение токов ветвей, отнесенных к связям графа схемы цепи (контурных токов), и напряжений всех узлов (узловых напряжений) предоставляет возможность нахождения всех параметров элементов цепи после проведения одного эксперимента, т.е. требует рассмотрения всего одного режима. Однако описанную идеальную декомпозицию цепи возможно реализовать лишь в условиях полной свободы организации измерений в экспериментальной части диагностических работ, что на практике встречается крайне редко. Поэтому рассмотрим случаи, когда выполнение измерений ограничено.

Диагностику пассивной линейной резистивной цепи согласно методу «связи-дерево» («дерево-связи») можно проводить в базисе узловых напряжений/напряжений ветвей (в базисе контурных токов/токов ветвей), дополняя ее расчетами с использованием методов диагностики, описываемых в базисе контурных токов/токов ветвей (в базисе узловых напряжений/напряжений ветвей) по известным режимным параметрам и вычисленным параметрам некоторых элементов цепи. В цепях большой размерности поочередно используемое описание базисов напряжений и токов позволяет сократить число измерений до числа, соизмеримого с числом неизвестных параметров диагностируемой цепи.

Таким образом, рассмотренные способы определения параметров элементов линейных цепей при условном разделении цепи на примитивные подцепи с использованием базисов напряжений и токов, а также их сочетания в диагностических экспериментах, показывают, что при существенной экономии чисел измерений и диагностических экспериментов эти способы требуют и минимума вычислительных ресурсов, т.е. могут быть реализованы на базе простейших средств вычислительной техники.

5 Лабораторные работы

5.1 Лабораторная работа №1

«Исследование сложных цепей постоянного тока»

Цель работы: научиться собирать цепи постоянного тока, измерять токи и напряжения, а также рассчитывать их методами узлового напряжения, наложения (суперпозиции) и контурных токов.

Методические замечания

1. При подключении амперметра для измерения токов в ветвях с резисторами R_5 , R_4 и R_3 следует точку «а» или «в» (рисунок 39а) подключать к клемме амперметра, перенося от резистора два проводника, а не один, так как может получиться схема, изображенная на рисунке 39б. Из этой схемы видно, что вместо измерения тока в ветви с резистором R_4 измеряется ток в ветви с резистором R_4 и ЭДС E_1 .

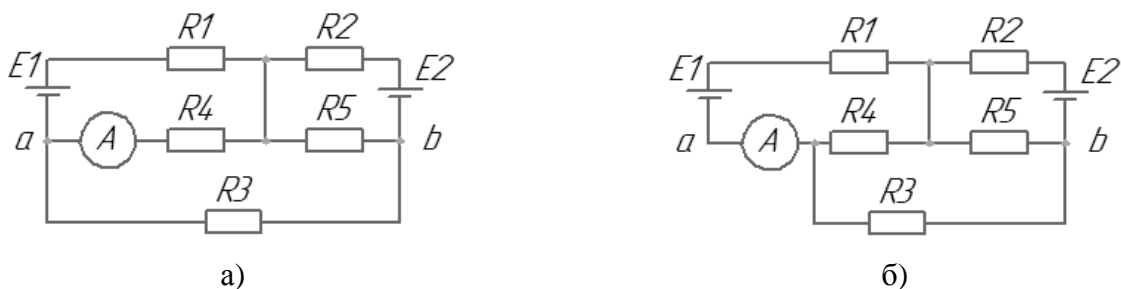


Рисунок 39 – Схема подключения амперметра

2. Следует обратить особое внимание на класс схемы, к которым применим тот или иной метод расчёта электрической цепи.
3. Схему, собранную по рисунку 1-1 (бланк лабораторной работы №1) [8], следует рассчитать методом узловых напряжений, схему 1-2 – методом суперпозиции и схему 1-3 – методом контурных токов.
4. При подготовке к отчёту необходимо знание законов Ома и Кирхгофа, методов расчёта цепей: эквивалентных преобразований, контурных токов, суперпозиции, узлового напряжения. Знать внешние характеристики элементов цепей постоянного тока (резистивного и источников питания).
5. Уметь представлять реальный источник питания схемой замещения с источником ЭДС и источником тока, записывать уравнение электрического состояния цепи по схеме замещение с источником ЭДС и источником тока.

5.2 Лабораторная работа №2 «Проверка технических электроизмерительных приборов»

Цель работы: поверить градуировку технических приборов: амперметра, вольтметра, ваттметра, счётчика активной энергии однофазного тока путём сравнения их показаний с показаниями образцовых приборов. Определить погрешности этих приборов и поправки к их показаниям.

Методические замечания

1. Устанавливать измеряемую величину следует по испытываемому прибору, а не по образцовому.
2. При подготовке к лабораторной работе и при отчёте к ней следует особое внимание обратить на различие таких приборов как амперметр, вольтметр и ваттметр одной и той же системы приборов, на способы включения приборов и на способы расширения пределов измерения приборов изучаемой системы.
3. Особое внимание обратить на принцип действия, конструкцию приборов магнитоэлектрической, электродинамической (ферродинамической) и индукционной системы.
4. Следует иметь в виду, что прибор характеризует только относительная приведённая (основная) погрешность, так как выражение для неё

$$\beta\% = \frac{\Delta X}{X_H} \cdot 100,$$

входит величина X_H – номинальное значение величины, которую может измерить прибор, поэтому основная погрешность принята для определения классов точности.

Относительная погрешность:

$$\gamma\% = \frac{\Delta X}{X_o} \cdot 100,$$

где X_o – действительное значение измеряемой величины, показывает лишь с какой точностью измерена данная величина относительно действительного значения, поэтому характеризовать прибор не может.

Абсолютная погрешность:

$$\Delta X = X_o - X_{изм}$$

даёт только количественную оценку измеряемой величины, не может служить качественной оценкой ни способа измерения, ни приборов.

5. Перед началом проведения лабораторной работы обязательно записать паспортные данные приборов в таблицу следующего образца.

Таблица 3 – Паспортные данные приборов

Наименование прибора	Испытуемый			Образцовый		
	Класс точности	Номинальное значение	Тип измерительного механизма	Класс точности	Номинальное значение	Тип измерительного механизма
Амперметр	2,5	5,0	Электромагнитный	0,5	5,0	Электромагнитный
Вольтметр	2,5	250	Электромагнитный	0,5	300	Электромагнитный
Ваттметр	2,5	500	Динамический	1,0	500	Динамический
Счётчик		1 кВт/ч 1200 об. диска	Индукционный			

Примечание: В графе «Счётчик» проставляется значение передаточного числа отчётного механизма (счётчика) – N (число оборотов на 1 киловатт в час электрической энергии).

Список использованной литературы

1. Касаткин А.С. Электротехника. Учебник для вузов. / А. С. Касаткин. – 3-е изд., перераб. – Москва : Энергия, 1974. – 560 с. – с ил.
2. Анвельт М. Ю. Электротехника: Учебное пособие для неэлектротехнических специальностей вузов / М. Ю. Анвельт, В. Г. Герасимов, В. П. Данильченко и др. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Высшая школа, 1976. – 560 с. – ил.
3. Борисов Ю.М.Общая электротехника: Учебное пособие для неэлектротехнических специальностей вузов / Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов - Москва : Высшая школа, 1974. - 519 с. - ил.
4. Электротехника / Под общей редакцией И. А. Федоровой. – 2-е изд., испр. и доп. – Минск : Вышэйшая школа, 1977. – 392 с. – с ил.

Электронное учебное издание

Елена Леонидовна **Еремина**
Татьяна Александровна **Маслова**

Электротехника и электроника

Учебное пособие

Электронное издание сетевого распространения

Редактор Матвеева Н.И.

Темплан 2024 г. Поз. № 20.

Подписано к использованию 13.06.2024. Формат 60x84 1/16.

Гарнитура Times. Усл. печ. л. 4,1.

Волгоградский государственный технический университет.
400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.

ВПИ (филиал) ВолгГТУ.
404121, г. Волжский, ул. Энгельса, 42а.